

# Evaluación de sitio para la determinación de zona de vertimiento de sedimentos dragados mediante la aplicación del método Montecarlo

Site evaluation for the determination of a dredged sediment disposal area through the application of the Montecarlo method

Fecha de envío: 3 de noviembre 2022

Fecha de aceptación: 31 de marzo 2023

Felipe Galaz, Ariel González y Matías Quezada

Ecotecnos, Limache 3405, of. 31, edificio Reitz, Viña del Mar, Chile, [fgalaz@ecotecnos.cl](mailto:fgalaz@ecotecnos.cl), [agonzalez@ecotecnos.cl](mailto:agonzalez@ecotecnos.cl), [mquezada@ecotecnos.cl](mailto:mquezada@ecotecnos.cl)

*Entre algunas de las principales preocupaciones de los puertos se encuentra la generación y mantenimiento del calado de los sitios de atraque, los cuales requieren operaciones de dragado. El vertimiento del sedimento retirado no resulta ser una labor trivial, en relación a los efectos que pueda causar a la biota marina. Por esta razón, la localización del sitio de vertimiento requiere evitar los sectores más activos biológicamente. La elección del sitio óptimo en esta situación se convirtió en un análisis multivariable que se solucionó mediante el método Montecarlo, con el fin de obtener una respuesta más completa. En este estudio se ha propuesto un procedimiento de dragado que considera el retiro del sedimento mediante una excavadora y el traslado hacia el punto de vertimiento utilizando uno o dos gánguiles, dependiendo del caso analizado. La resolución de este problema se llevó a cabo en tres puertos localizados en la región de Valparaíso, Puerto de Ventanas, Puerto de Valparaíso y Puerto de San Antonio, que permitieron la evaluación de resultados bajo distintas características espaciales. Frente a los resultados encontrados se determinó que la aplicación de un gánguil adicional permite disminuir el riesgo en el procedimiento en una magnitud relevante. Por otro lado, a causa de la variabilidad espacial de la actividad biológica, fue más simple la selección del punto de vertimiento en ciertas locaciones, reduciendo la incertidumbre del procedimiento, como se estimó para el puerto de San Antonio.*

**Palabras clave:** método de Montecarlo, probabilidad tareas de dragado, vertimiento en el mar, disposición de sedimentos

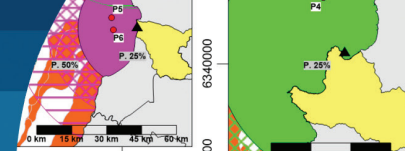
*Among some of the main concerns of the ports is the generation and maintenance of the depth of the docking sites, which require dredging operations. The dumping of the removed sediment is not a trivial task, in relation to the effects it may cause to the marine biota. For this reason, locating the dumping site requires avoiding the most biologically active spots. The choice of the optimal site in this situation was converted into a multivariable analysis that was solved using the Montecarlo method, to obtain a more complete answer. In this study, a dredging procedure has been proposed that considers the removal of the sediment by means of an excavator and the offshore dumping using one or two hoppers, depending on the case analyzed. This problem was solved in three ports in the Region of Valparaíso in Chile, namely, port of Ventanas, Valparaíso and San Antonio, which allowed the evaluation of the results for diverse spatial features. The results of this study determined that the application of an additional hopper allows to reduce the risk in the procedure in a relevant magnitude. On the other hand, due to the spatial variability of the biological activity, the selection of the dumping point was simpler, reducing the uncertainty of the procedure, as estimated for the port of San Antonio.*

**Keywords:** Montecarlo's method, probability dredge's jobs, shedding in sea, sediment placement

## Introducción

Dentro de las principales preocupaciones de los puertos, en diferentes partes del mundo, se encuentra la mantención de las profundidades de los terminales marítimos, así también,

la modificación de los sitios de atraque, en relación a la profundización o expansión de ellos, con el fin de poder atender a las naves que actualmente recorren el orbe distribuyendo cargas.



Los proyectos de profundización implican el movimiento de sedimentos marinos de un determinado lugar (zona portuaria) hacia un sitio de descarte, este material debe ser estudiado bajo aspectos físicos, químicos y biológicos, a modo de determinar sus principales características y si estas son o no un riesgo ambiental en alguna escala si son removidos y/o vertidos. Una vez que los sedimentos son retirados desde su ubicación actual, necesitan ser descartados ya sea a una zona en tierra o en algún sector de vertimiento en el mar, el cual se debe definir y analizar bajo diversas aristas físicas, químicas y biológicas, las que complementadas entre ellas deben permitir que el proyecto sea ambientalmente admisible.

La decisión del emplazamiento de la zona de vertimiento se encuentra ligado a un universo de variables, las cuales se puede clasificar dentro de criterios económicos, disponibilidad de espacios, criterios ambientales, entre algunos. La consideración de múltiples variables, usualmente independiente entre ellas, complejiza la búsqueda de una solución óptima. Por dicha razón, se decidió llevar a cabo el actual estudio, cuyo propósito fue la investigación de la combinación ideal de las variables mediante la aplicación del método de Montecarlo, que aborda el problema desde una considerable cantidad de escenarios distintos y aleatorios, asociados a los aspectos seleccionados por su mayor relevancia.

Para el desarrollo de este estudio se debió escoger un procedimiento específico, cuyas características más importantes presentan una variabilidad dentro de rangos supuestos en base de documentos técnicos y la experiencia

profesional del equipo. Por ende, se debe destacar el análisis aplicado por sobre los resultados numéricos estimados, pues estos se encuentran subordinados al detalle del procedimiento elegido como, por ejemplo, las características del equipamiento empleado.

Dicha solución fue evaluada en tres puertos de la Región de Valparaíso, siendo seleccionados el Puerto de Ventanas, el Puerto de Valparaíso y el Puerto de San Antonio (Figura 1), para los cuales, pese a localizarse próximamente, exhiben distintas situaciones que permitieron examinar diferentes resultados.

## Alcances y limitaciones

El estudio de evaluación de sitio se realizó para determinar puntos posibles de vertimiento de sedimentos provenientes desde el proceso de dragado en los tres puertos mencionados. El objetivo central de este estudio fue la elaboración de una nueva metodología para la determinación del punto de descarga de los sedimentos removidos del lecho, aplicando el método de Montecarlo, respondiendo a múltiples requerimientos nacidos desde el procedimiento de dragado considerado para este estudio. Por esta razón, los análisis indicados en este trabajo se centraron en la metodología establecida por sobre los resultados numéricos, que se encuentran susceptibles a cambiar según la maquinaria, procedimientos o técnicas empleadas.

## Análisis de la compatibilidad del sitio

Para determinar la compatibilidad de un sitio con la implementación de un proyecto marino se requiere

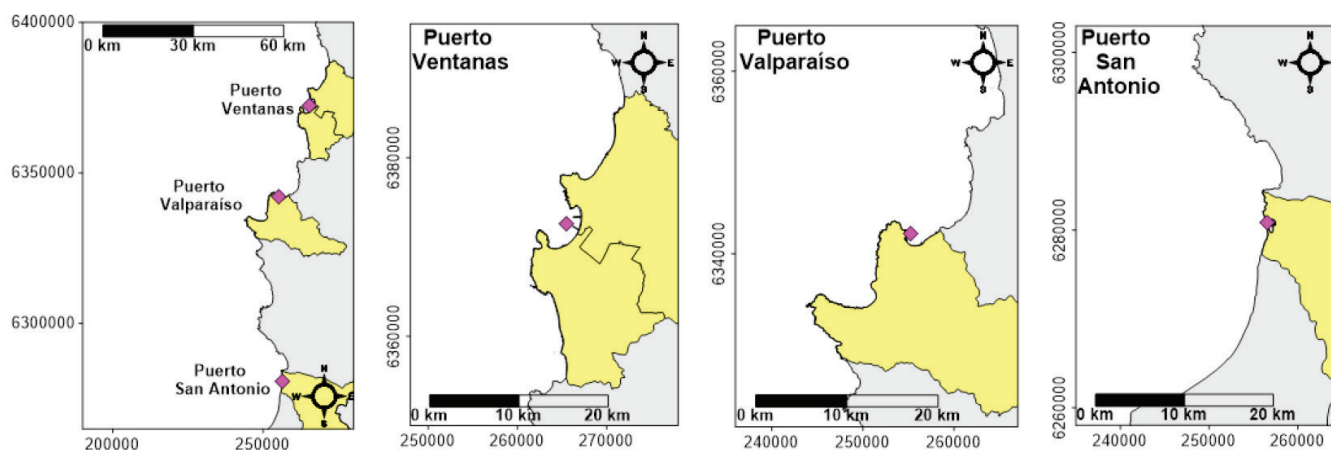
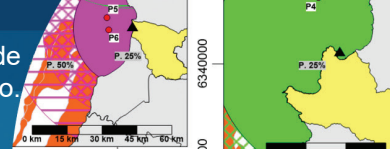


Figura 1: Ubicación de los puertos analizados



la verificación de aspectos como: el uso del sector, la relevancia histórica del sitio, junto a la presencia de sitios arqueológicos y la compatibilidad ambiental.

La actual utilización del sitio de interés o sus lugares cercanos, tiene como propósito general el determinar si existe alguna asignación previa del espacio marítimo, tal como una zona de AMERBS<sup>1</sup> o concesión marítima (solicitada o asignada).

La arqueología corresponde a una de las principales incompatibilidades, ya que eventuales hallazgos se encuentran legalmente protegidos en virtud de la Ley N° 17.288 de Monumentos Nacionales, lo que es válido para naufragios (pecios) de más de 50 años de data de su hundimiento. Pese a lo anterior, se encuentra fuera del alcance de este estudio, el poder determinar si en los sitios evaluados existe alguna condición de restricción por Patrimonio Cultural Subacuático (PCS), debido a que se requiere dilucidar mediante prospección sistemática realizada por arqueólogos PCS, la que debiera ejecutarse en un futuro sobre los sitios de vertimiento recomendados en este estudio.

Respecto de la incompatibilidad ambiental, el propósito de esta actividad es verificar si en el sitio de estudio existe presencia de especies marinas y/o costeras que se encuentren protegidas, constituyan un recurso hidrobiológico de importancia comercial o si estos se encuentran en una densidad compatible con la denominación de banco natural. Según la información disponible, se recurrió a las superficies denominadas como el Área de Reserva a la Pesca Artesanal (ARPA) y la cobertura de recursos hidrobiológico.

El Artículo 47 de la Ley General de Pesca y Acuicultura, establece que se reserva a la pesca artesanal el ejercicio de las actividades pesqueras extractivas en una franja del mar territorial de cinco millas marinas medidas desde la costa. Dentro de este sector se constituye la línea oficial respecto del cual se fiscalizan las actividades en ARPA que es presentada en la Figura 2a<sup>2</sup>.

La franja que se construye a partir del límite ARPA y la

<sup>1</sup> Área de manejo de recursos bentónicos.

<sup>2</sup> Establecida con la cartografía del software de Monitoreo Satelital de Naves Pesqueras THEMIS VIEWER y con los datos de las cartas náuticas electrónicas (CNE) entregadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA)

línea de costa (Figuras 2a y 2b), corresponde a una zona en la cual el Servicio de Evaluación Ambiental ha manifestado que no es adecuada para ejecutar vertimiento de sedimentos provenientes desde alguna operación de dragado, como lo han declarado en la adenda complementaria del proyecto TCVAL (SGA, 2016), de tal modo que, se ha considerado como una restricción para el estudio constituyendo de esta manera como una zona incompatible para la ejecución del vertido.

Basándose en estudios realizados por la Subpesca para determinar la biomasa, abundancia y distribución espacial de diferentes especies a lo largo de la costa de Chile con una metodología de evaluación directa utilizando el método de área barrida, se han determinado la presencia de recursos biológicos en la proximidad de los sitios de interés. Se obtuvieron las coberturas espaciales (Figura 2a) a partir de las versiones más recientes de los estudios de evaluación de disponibilidad que provee el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) de las especies Camarón Nailon (Acuña *et al.*, 2015), Gamba (Arana *et al.*, 2006), Langostino Amarillo (Acuña *et al.*, 2014) y Langostino Colorado (Acuña *et al.*, 2014). Estas especies sedentarias tienen baja capacidad de movimiento y, por lo tanto, es de esperar que su presencia se mantenga acotada al área detectada por el IFOP durante el tiempo. En el caso contrario se encuentra la merluza, especie con interés comercial y para la cual el IFOP ha realizado estudios similares. Sin embargo, corresponde a una especie nectónica y, por lo tanto, de caladero móvil, es decir, se desplaza horizontalmente a lo largo de su vida. Por dichas razones su detección en un punto determinado, no corresponde a una estimación absoluta, dado que en diversos instantes de tiempo se puede tener presencia o ausencia del organismo.

En base a la presencia de recursos biológicos sedentarios y a la delimitación del ARPA con la línea de costa, se ha construido un mapa de limitación de selección de sitio para efectos de vertimiento de los sedimentos en el medio marino, siendo sus resultados los ilustrados en la Figura 2b.

De la Figura 2b se puede apreciar que toda el área sombreada en rojo corresponde a lugares no adecuados para realizar el vertimiento de sedimentos, por lo tanto, los puntos a evaluar como sitio de vertimiento, no deben ubicarse dentro de dichas zonas.

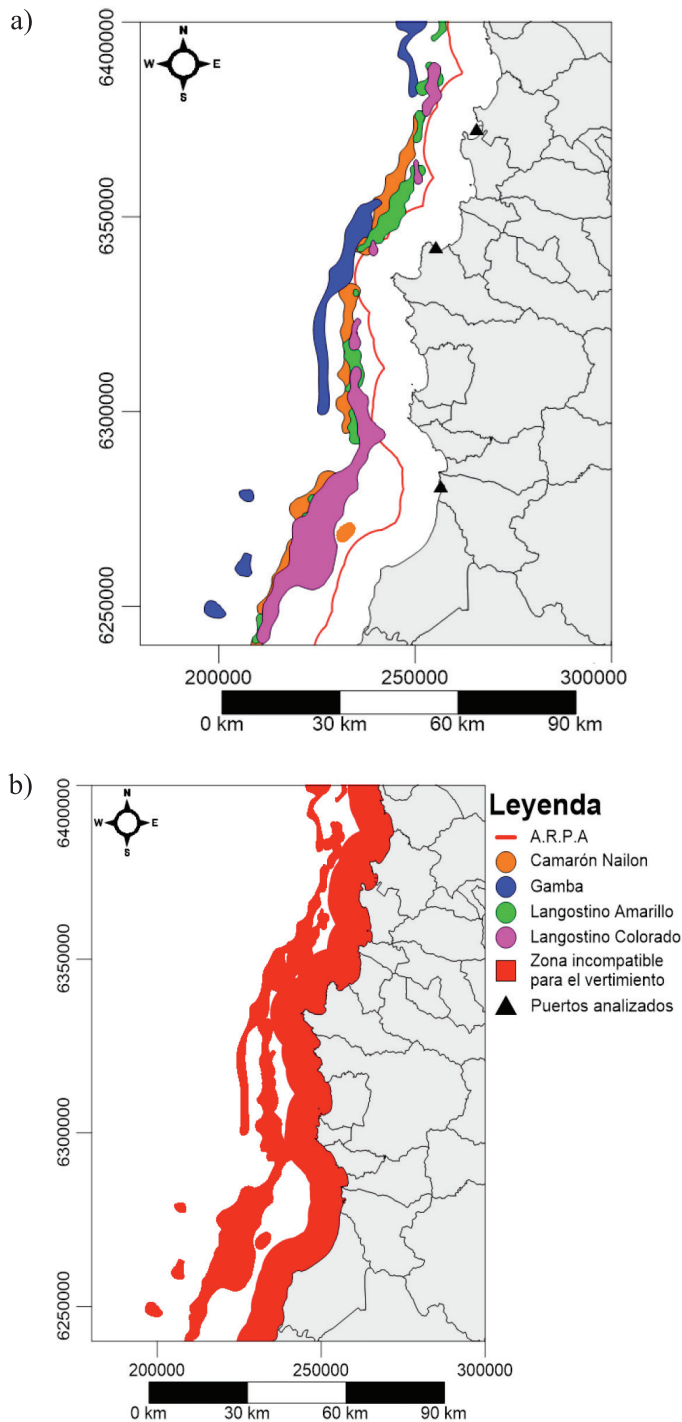
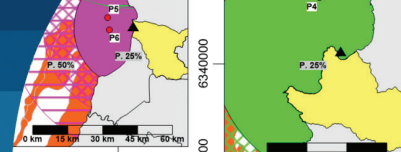


Figura 2: a) Trazado del límite ARPA y zonas de interés biológico detectadas en las costas de la Región de Valparaíso y b) zonas incompatibles para el desarrollo del vertimiento de sedimentos

## Estudio basado en simulación Montecarlo

El procedimiento de dragado considerado para este estudio, consiste en la aplicación de una máquina excavadora que retirará el sedimento desde el lecho marino, lo depositará sobre uno o dos gánguilos, para luego dirigirse hacia el

punto de vertimiento. Para el cumplimiento de los objetivos de estudio se aplicaron características tipo para la pala de la excavadora, así como, las características del gánguil.

En la sección anterior se determinó la disponibilidad de sitios cercanos a las zonas a dragar, donde se podría realizar el vertimiento de sedimentos, sin interacción directa con agentes biológicos o zonas de reserva para pesca artesanal. Sin embargo, no se ha determinado en qué punto o conjunto de ellos se puede realizar el vertido en consideración de que el proyecto sea técnicamente factible de ejecutar, en plazos de tiempo concordantes con la duración estimada de las faenas.

La duración total de la faena de dragado/vertimiento de los sedimentos, depende de diversos factores, los que en su mayoría no son determinísticos ni constantes y, por lo tanto, requieren un tratamiento probabilístico y evaluar mediante simulaciones de Montecarlo ante un set robusto de iteraciones, las condiciones bajo las cuales se puede ejecutar la faena.

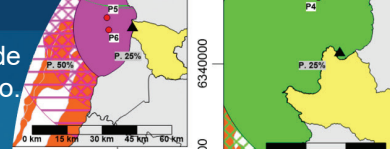
El método Montecarlo se utilizó con el propósito específico de definir el punto de descarga de los sedimentos extraídos desde el proceso de dragado para cada uno de los sitios portuarios estudiados.

El Método de Montecarlo permite resolver problemas físicos y matemáticos, de manera no determinística, aplicando múltiples casos de variables aleatorias las que son simuladas mediante distribuciones de probabilidad, que intentan describir el comportamiento natural de la variable en análisis. Con la simulación de Montecarlo se espera que el error asociado sea una función del número de iteraciones ( $N$ ) que se aplique y el cual alcanzaría una magnitud igual a  $1/\sqrt{N}$ .

Para las variables a emplear en este estudio se debe definir el tipo de distribución probabilística con el cual se representarán matemáticamente. Frente a lo anterior, se asumieron que las variables aleatorias de la faena de dragado se distribuyen en forma normal, debido a la presencia casi universal de la misma. En base a estas distribuciones se define cuáles valores tendrán una mayor frecuencia, dentro de un rango definido.

Referente a proyectos consultados<sup>3</sup> y la experiencia del

<sup>3</sup> DIA, Dragado Puerto de Iquique (Bentos, 2011), y EIA, Dragado Puerto de San Antonio (SIGA, 2013)



equipo de trabajo en distintos proyectos, para la estimación del radio de descarga y día de faena, se definieron los siguientes parámetros: un volumen de dragado total de 100 000 m<sup>3</sup>, un tiempo de descarga del gánguil de 30 minutos, una capacidad de la pala de 25 m<sup>3</sup>.

## Estimación del punto de descarga

La estimación del punto de descarga consistió en la simulación de Montecarlo asumiendo que el tiempo total para ejecución de la faena se encuentra definido y no puede ser modificado. Es decir, este escenario busca establecer cuáles son las distancias que se deben recorrer para realizar el vertimiento y afectar en la menor cantidad de tiempo posible las faenas de la operación portuaria.

El tiempo total de ejecución de las faenas se determinó mediante una estimación lineal relacionando el volumen a dragar en este estudio, con los valores temporales y volumétricos del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del Dragado del Puerto de San Antonio, llegando a un valor estimado de 46 días.

Para abordar el problema, se ha definido un set de variables conceptuales las que se indican a continuación de manera tabulada, identificando aquellas que se han tratado como variables determinísticas (Tabla 1) y aquellas que se han tratado como probabilísticas (Tabla 2).

Tabla 1: Variables deterministas consideradas en la simulación de Montecarlo.

| Variable  | Justificación   |
|---|---|
| El tiempo de descarga es constante e igual a 30 min | Especificado en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del dragado del puerto de Iquique (Bentos, 2011)                    |
| Volumen máximo de la pala                           | Especificado en DIA del dragado del puerto de Iquique (Bentos, 2011). No hay cambio de excavadora en la faena, ni de su pala. |
| Volumen máximo del gánguil                          | Especificado en DIA del dragado del puerto de Iquique (Bentos, 2011). No se cambia gánguil durante la faena.                  |
| Cada viaje de descarga tomará el mismo tiempo       | Solución tipo <i>Steady State</i>   |
| Siempre se descarga en el mismo punto               | Condición necesaria para la unicidad de la solución   |

Tabla 2: Variables probabilísticas consideradas en la simulación de Montecarlo.

| Variable                               | Distribución <sup>4</sup> | Justificación   |
|--|---------------------------|---|
| Llenado de la pala                     | Normal                    | Trabajo depende de la experiencia del operador  |
| Tiempo de palada (ciclo)               | Normal                    | Ver ecuación (10)   |
| Volumen utilizado del gánguil          | Normal                    | No siempre el gánguil se llena a su máxima capacidad, dadas condiciones de operación. |
| Velocidad de viaje de ida a descarga   | Normal                    | El avance de la embarcación no es una constante                                       |
| Velocidad de viaje de vuelta a llenado | Normal                    | El avance de la embarcación no es una constante                                       |
| Accidentes no mortales                 | Normal                    | Las faenas tienen implicado un riesgo y puede generar accidentes                      |
| Ocurrencia de marejadas                | Normal                    | Puede implicar tiempos de espera de zarpe o trabajo                                   |
| Atraque de buques                      | Normal                    | Esto puede implicar detenciones de la maniobra  |

<sup>4</sup> La distribución utilizada es normal, pero no estándar, es decir, no está centrada en cero y no pueden tomar valores negativos.

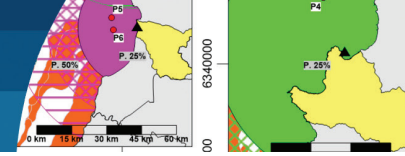
En consideración del set de variables definidas, se ha propuesto la simulación de 2 casos base, los que se presentan en la Tabla 3, y que tuvieron como finalidad determinar los lugares probables de vertido de sedimentos, al aplicar un gánguil individual (caso 1) y el incremento obtenido al emplear un gánguil adicional (caso 2) con las mismas características. Cada caso fue ejecutado con 1000 iteraciones de casos aleatorios.

Tabla 3: Casos simulados para definir el punto de descarga.

| Caso | Cap <sub>Gánguil</sub> | N <sup>o</sup> <sub>Gánguiles</sub> | $\overline{Vel}_{GC}$ | $\Delta Vel_{GC}$ | $\overline{Vel}_{GV}$ | $\Delta Vel_{GV}$ | Tiempo faena, días |
|------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| 1    | 2000                   | 1                                   | 7                     | 3                 | 13                    | 3                 | 46                 |
| 2    | 2000                   | 2                                   | 7                     | 3                 | 13                    | 3                 | 46                 |

Los valores utilizados para los casos simulados se basan en la características de los gánguiles descritos en SIGA (2013) y Bentos (2011).

El gánguil tipo seleccionado consideró una capacidad de 2000 m<sup>3</sup> y una velocidad media de cargado de 7 nudos con una variabilidad de 3 nudos, mientras que, al estar vacío se estima una velocidad de 13 nudos con una variabilidad de 3 nudos. Para el procedimiento completo se proyectó un tiempo de 46 días (tiempo faena).



Para todos los casos se tomaron los siguientes supuestos:

- Para la operación se considera que se trabajan 24 horas al día.
- El ciclo de llenado de la draga se distribuye de manera normal.
- Dependiendo del volumen que toma la pala en el ciclo de la draga, el ciclo de la misma presenta un aumento, el cual se distribuye de manera normal.
- Dependiendo de la composición del fondo (roca, grava, arenisca, arena, etc.), la draga debería rasgar para poder extraer el material, por tanto, el número de estos rasgados se distribuye de manera normal.
- El tiempo que toma un rasgado, es el 30% del tiempo del ciclo de llenado de la pala.
- El ciclo de llenado final (ciclo que realiza la pala), es el tiempo del ciclo más los aumentos producto del volumen de sedimento y el número de rasgados realizados.

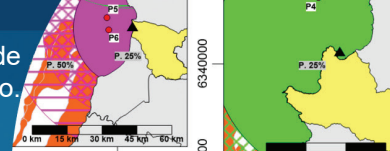
Basado en los supuestos anteriores y dado el propósito de la simulación de Montecarlo, se ha definido el radio de descarga ( $r(N)$ ), es decir, la distancia máxima donde se puede ir a descargar los sedimentos desde el proceso de dragado para cumplir con los días de faena disponibles, de acuerdo a la expresión (1) mostrada en la Tabla 4. A su vez, se presenta la dependencia por variables como el tiempo para la descarga del gánguil en la zona de vertimiento ( $T_{Descarga}$ ) y las velocidades de viaje del gánguil

cargado ( $Vel'_{GC}(N)$  y vacío ( $Vel'_{GV}(N)$ ) en km/día. Junto a lo anterior, se encuentra el tiempo por viaje ( $T_{pv}(N)$ ), que se estima según lo establecido en la ecuación (2), respecto al número total de viajes ( $N^{\circ}_{viajes}(N)$ ) y del tiempo total disponible para movilizar el volumen completo a dragar ( $T_{viajes}(N)$ ). La anterior expresión (2) se resuelve acorde lo indicado en la ecuación (3), que corresponde al tiempo disponible para el proceso de descarga del gánguil (tiempo faena) menos el tiempo de carga y los tiempos de castigo. El tiempo de carga total ( $TCT(N)$ ) se encuentra asociado a la toma de sedimentos del lecho y el depósito sobre el gánguil, estimado de acuerdo a la ecuación (4), respecto al volumen total ( $100\ 000\ m^3$ ) y a la velocidad de carga ( $Vel'_{carga}$ ) indicada en la siguiente sección. Los tiempos de castigos empleados para esta metodología se clasifican en accidentes laborales ( $TC_{ANM}(N)$ ), mal tiempo ( $TC_{clima}(N)$ ) y asociado a los tiempos de operación de puertos ( $TC_{OP}(N)$ ). Las sanciones relacionadas a los accidentes laborales y a la operación de puertos se estimaron respecto a las ecuaciones (5) y (7), respectivamente. Estas expresiones se desarrollaron entorno de la experiencia del equipo que desarrolló el estudio y, por ende, puede enfrentar cambios a sus valores según el puerto a analizar o los profesionales a cargo. En el caso de las interrupciones por el clima, se asociaron a los efectos de las marejadas, en razón a ello, se consideró con un *downtime* del 2% de acuerdo declarado por TPS el 2021<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> <https://www.tps.cl/tps/noticias/2021/abr-may-jun/tps-destaca-ventas-de-la-bahia-de-valparaiso-frente-a-los-cierres-de>

Tabla 4: Variables y ecuaciones de radio y tiempo

| Variable   | Ecuación   |     |
|--|--|-----|
| Radio de descarga  | $r(N) = \left( T_{pv}(N) - \frac{T_{Descarga}}{24 \times 60} \right) \left( \frac{Vel'_{GC}(N)Vel'_{GV}(N)}{Vel'_{GC}(N) + Vel'_{GV}(N)} \right)$ [km] | (1) |
| Tiempo por viaje   | $T_{pv}(N) = \frac{T_{viajes}(N)}{N^{\circ}_{viajes}(N)}$ [días]   | (2) |
| Tiempo total disponible para movilizar el volumen completo a dragar                              | $T_{viajes}(N) = \text{Tiempo faena} - TCT(N) - TC_{ANM}(N) - TC_{clima}(N) - \left( \frac{TC_{OP}(N)}{24} N^{\circ}_{viajes}(N) \right)$ [días]       | (3) |
| Tiempo de carga total requerido para tomar los sedimentos del lecho y depositarlos en el gánguil | $TCT(N) = \frac{100\ 000}{Vel'_{carga}}$ [días]  | (4) |
| Tiempo de castigo por accidente laboral  | $TC_{ANM}(N) = 3.5 + f(TC_{ANM})$ [días] $-3.5 \leq f(TC_{ANM}) \leq 3.5$  | (5) |
| Tiempo de castigo por mal tiempo   | $TC_{clima}(N) = 0.64 \pm f(TC_{clima})$ [días] $-0.21 \leq f(TC_{clima}) \leq 0.21$   | (6) |
| Tiempo de castigo por operación de puerto  | $TC_{OP}(N) = 1 \pm f(TC_{OP})$ [horas] $-0.5 \leq f(TC_{OP}) \leq 0.5$  | (7) |



## Determinación de las velocidades de trabajo

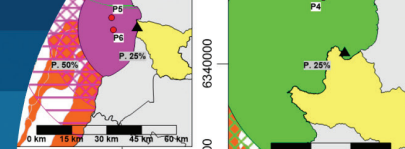
La velocidad de carga del gánguil ( $Vel_{carga}$ ), expresada en la ecuación (8) en la Tabla 5, corresponde a una de las variables más relevantes del proceso analizado. Se define esta velocidad entorno del volumen de la pala ( $V_{pala}$ ) y el tiempo total requerido en la palada desde el lecho y su depósito en el gánguil ( $T'_{ciclo}$ ), según las ecuaciones (9) y (10), respectivamente. La variable  $T'_{ciclo}$ , por su parte, se compone del tiempo requerido en cada palada ( $T_{ciclo}$ ) y retrasos asociados a la maniobrabilidad de la pala con mayores volúmenes ( $TC_{vp}$ ) y al tiempo empleado en rasgar el fondo marino ( $TC_{rasgados}$ ) que, a su vez, depende de la variable probabilística, número de rasgados, calculada según la ecuación (14), asumiendo un suelo consolidado.

Por otra parte, el número de viajes ( $N^{\circ}_{viajes}$ ) es estimado como el volumen total a dragar (100 000 m<sup>3</sup>) respecto al volumen mínimo para comenzar el viaje hacia la zona de vertimiento, el cual se denominó como el volumen de partida ( $V_{partida}(N)$ ), determinado con la ecuación (16) en forma probabilística y en base de la capacidad del gánguil ( $Cap_{Gánguil}$ ).

Respecto de las velocidades del gánguil, según lo mencionado, se consideraron las velocidades de cargado ( $Vel_{GC}$ ) y vacío ( $Vel_{GV}$ ), los cuales se estiman como se indica en las ecuaciones (17) y (18), a partir de la velocidad media ( $Vel_{GC}(N)$  y  $Vel_{GV}(N)$ , respectivamente) y una variabilidad asociada a dificultades en la navegación ( $\Delta Vel_{GC}$  y  $\Delta Vel_{GV}$ , respectivamente).

Tabla 5: Variables y ecuaciones usadas en el estudio

| Variable  | Ecuación  |      |
|---|---|------|
| Velocidad de carga del gánguil  | $Vel_{carga}(N) = \frac{V_{pala}(N)}{T'_{ciclo}(N)} \text{ [m}^3/\text{min]}$   | (8)  |
| Volumen total de sedimentos que contiene la pala  | $V_{pala}(N) = 21.5 + f(V_{pala}) \text{ [m}^3]$<br>$-3.75 \leq f(V_{pala}) \leq 3.75$  | (9)  |
| Tiempo total que se necesita para que una palada tome sedimentos del lecho y lo deposite en el gánguil            | $T'_{ciclo}(N) = T_{ciclo}(N) + TC_{vp}(N) + TC_{rasgados}(N) \text{ [min]}$  | (10) |
| Tiempo necesario para realizar cada palada  | $T_{ciclo}(N) = 2 + f(T_{ciclo}) \text{ [min]}$<br>$-0.9 \leq f(T_{ciclo}) \leq 0.9$  | (11) |
| Retraso (castigo) asociado al volumen de la pala  | $TC_{vp}(N)$<br>$= (\text{Máximo}(T_{ciclo}) - \text{mínimo}(V_{pala}))$<br>$- T_{ciclo}(N) \left( \frac{V_{pala}(N) - \text{mínimo}(V_{pala})}{\text{Máximo}(V_{pala}) - \text{mínimo}(V_{pala})} \right) \text{ [min]}$ | (12) |
| Retraso (castigo) asociado a la necesidad de realizar rasgados del lecho marino para poder remover los sedimentos | $TC_{rasgados}(N) = (30\% \times T_{ciclo}(N)) N^{\circ}_{rasgados}(N) \text{ [min]}$   | (13) |
| Número de rasgados  | $N^{\circ}_{rasgados}(N) = 2.5 \pm f(N^{\circ}_{rasgados})$<br>$-2.5 \leq f(N^{\circ}_{rasgados}) \leq 2.5$   | (14) |
| Número de viajes necesarios   | $N^{\circ}_{viajes}(N) = \frac{100\ 000}{V_{partida}}$  | (15) |
| Volumen mínimo para comenzar el viaje hacia a la zona de vertimiento  | $V_{partida}(N) = (70\% + f(V_{partida})) Cap_{Gánguil} \text{ [m}^3]$<br>$-20\% \leq f(V_{partida}) \leq 20\%$   | (16) |
| Velocidad del gánguil cargado   | $Vel_{GC}(N) = \overline{Vel_{GC}} \pm \Delta Vel_{GC} \text{ [nudos]}$   | (17) |
| Velocidad del gánguil vacío   | $Vel_{GV}(N) = \overline{Vel_{GV}} \pm \Delta Vel_{GV} \text{ [nudos]}$   | (18) |



## Procesamiento de la información

A partir de las simulaciones de Montecarlo se obtuvieron distancias máximas para ejecutar el vertimiento y posteriormente, mediante la definición de un punto, el tiempo máximo para la ejecución de la faena. Es importante mencionar que, la ecuación (1) del radio, depende del tiempo disponible para viajes según la ecuación (3), el cual puede ser negativo en escenarios muy pesimistas, representando que la faena necesita un tiempo mayor al disponible. Por lo tanto, tendría un valor negativo matemáticamente, pero físicamente no existiría e implicaría la inviabilidad del proyecto de dragado.

En el caso de la distancia del sitio de vertimiento, se contó con una restricción asociada al límite ARPA, de tal modo que todas aquellas distancias máximas dentro de dicha área, se consideraron estadísticamente como probabilidad de falla, es decir, escenarios en los cuales no tendría éxito la faena en consideración de que existe un plazo acotado para la ejecución de las tareas.

Las distribuciones estadísticas de los resultados simulados mediante Montecarlo, se analizaron para definir tres resultados característicos, los que se definen a continuación:

- Escenario pesimista: corresponde a aquella situación en la cual se presentan todas las condiciones adversas para la ejecución de las tareas y, por lo tanto, requiere de una distancia más corta para el vertimiento (percentil 25%).
- Escenario normal: corresponde a aquella situación en la cual no se presentan de manera significativa las condiciones adversas para la ejecución de las tareas y, por lo tanto, tanto la distancia como el tiempo requerido se asocian al percentil 50%.
- Escenario optimista: corresponde a aquella situación en la cual no se presentan condiciones adversas para la ejecución de las tareas y, por lo tanto, se puede recorrer una distancia mayor para el vertimiento (percentil 75%).

## Resultados

Siguiendo las ecuaciones establecidas en las Tablas 4 y 5 y con las características de las maquinarias seleccionadas se determinaron las distancias posibles de circular,

cumpliendo las condiciones del proyecto. La Tabla 6 indica las distancias asociadas a los correspondientes escenarios pesimista (percentil 25%), normal (percentil 50%) y optimista (percentil 75%), que fueron ilustradas para cada uno de los puertos relevantes en las Figuras 3 y 4 para los casos 1 y 2, respectivamente. Es importante notar que, para el caso 2 donde se agrega gánguil adicional las distancias experimentan incrementos sobre el doble del caso 1.

**Tabla 6: Distancias asociadas a los distintos percentiles, en los correspondientes casos**

| Casos | Percentiles, km |       |       |
|-------|-----------------|-------|-------|
|       | 25%             | 50%   | 75%   |
| 1     | 7.02            | 13.74 | 20.20 |
| 2     | 25.49           | 38.63 | 52.82 |

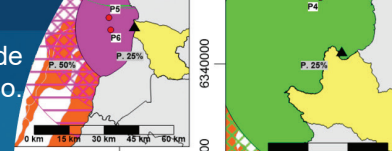
Para la aplicación de la actual propuesta metodológica, se sugirieron dos puntos de vertimiento por cada puerto, con la condición de que cada uno se encontrara fuera del límite ARPA y de las áreas de interés biológico, seleccionados con anterioridad. Los puntos escogidos se resumen en la Tabla 7, donde se indica que las distancias requeridas comienzan desde los 10 km, siendo la menor la asociada al Puerto de San Antonio (P6) con 10.40 km, a diferencia del punto P3, relacionada con el Puerto de Valparaíso, cuya distancia alcanzó los 18.08 km. Los posibles puntos de vertimiento fueron ilustrados en las Figuras 3 y 4, localizándose entre los espacios libres de las áreas de interés biológico, con el fin de conseguir las menores distancias.

**Tabla 7: Probabilidad de falla respectiva a cada punto de vertimiento.**

| Puntos dragados | Id. | Punto de descarga |               | Distancia desde el punto de dragado, km | Probabilidad de falla, % |        |
|-----------------|-----|-------------------|---------------|---|--------------------------|--------|
|                 |     | Este, m           | Norte, m      |   | Caso 1                   | Caso 2 |
| Ventanas        | P1  | 261.326,511       | 6.387.058,203 | 15.12                                   | 51.50                    | 19.00  |
|                 | P2  | 255.090,81        | 6.378.275,705 | 11.92                                   | 46.31                    | 17.34  |
| Valparaíso      | P3  | 253.581,178       | 6.360.136,041 | 18.08                                   | 55.24                    | 20.20  |
|                 | P4  | 251.062,598       | 6.353.310,689 | 11.94                                   | 45.85                    | 17.20  |
| San Antonio     | P5  | 245.321,613       | 6.285.272,432 | 12.05                                   | 44.80                    | 16.86  |
|                 | P6  | 246.152,744       | 6.280.134,528 | 10.40                                   | 43.17                    | 16.34  |

Para cada punto seleccionado se estimó la probabilidad de falla para cubrir tales distancias y cumplir el vertimiento (ver Tabla 7), aplicándose para los dos casos estudiados, con los cuales se demostró una disminución importante en la incertidumbre con la aplicación de un gánguil adicional





(caso 2).

Los resultados del caso 1, donde se consideró solo un gánguil, son ilustrados en la Figura 3, plasmando los radios probabilísticos correspondientes para cada puerto analizado. Los escenarios simulados bajo la configuración del caso 1 son esquematizados con un gráfico de frecuencias (Figura 3), representando una distribución normal, cuyo promedio se estimó con una magnitud semejante a las distancias mínimas desde los puertos a los extremos de las zonas incompatibles para el vertimiento. Por dicha razón, los escenarios pesimistas (percentil 25%) se extendieron dentro del ARPA impidiendo el vertimiento allí. Dentro de los escenarios normales (percentil 50%) comenzaron a aparecer sectores disponibles para el vertimiento, coincidiendo con algunos de los puntos seleccionados. Para el puerto Ventanas, fuera de la Bahía de Quintero, se encontró el punto P2, entre el límite del ARPA y área de interés biológico, que se encuentra cubierto por los escenarios normales. De la misma forma, correspondiente al percentil 50%, se tiene el punto P4, ubicado hacia el norte del puerto de Valparaíso, como uno

de sus posibles sitios para el vertimiento. Para el puerto de San Antonio, los puntos P5 y P6 se encontraron dentro de la superficie delimitada en los escenarios normales, en los límites del ARPA, pero bastante alejados de las áreas de interés biológicas. Se indica que, en los posibles sitios de vertimientos, P1, asociado el puerto de Ventanas y P3, respecto del puerto de Valparaíso, presentaron los mayores riesgos, con probabilidades de falla de 45.85% y 55.24%, respectivamente (Tabla 7). Estos se encontraron cercanos a los escenarios normales (percentil 50%), requiriendo las mejores condiciones.

Se puede notar que, para los puertos de Ventanas y Valparaíso, los sitios disponibles bajo los escenarios normales son escasos, localizándose allí los puntos propuestos, sin embargo, en los escenarios optimistas se obtiene una mayor cantidad de posibilidades. Por el contrario, para el puerto de San Antonio se muestra una gran superficie disponible para el vertimiento, debido a la ausencia de áreas de interés biológico en la proximidad del puerto.

La disposición de un gánguil adicional para los procesos

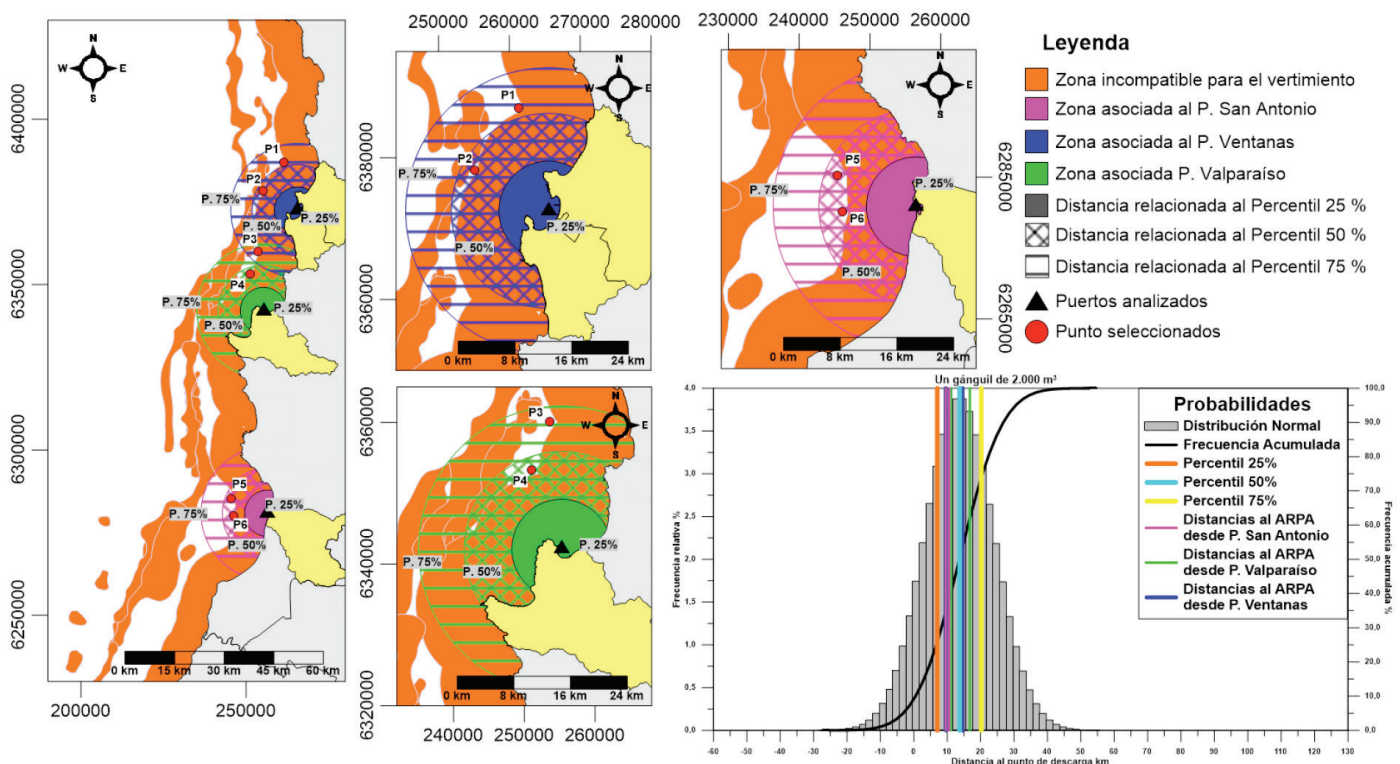


Figura 3: Radios probabilísticos para la realización del vertimiento en los distintos puertos, correspondientes al caso 1, empleando un gánguil

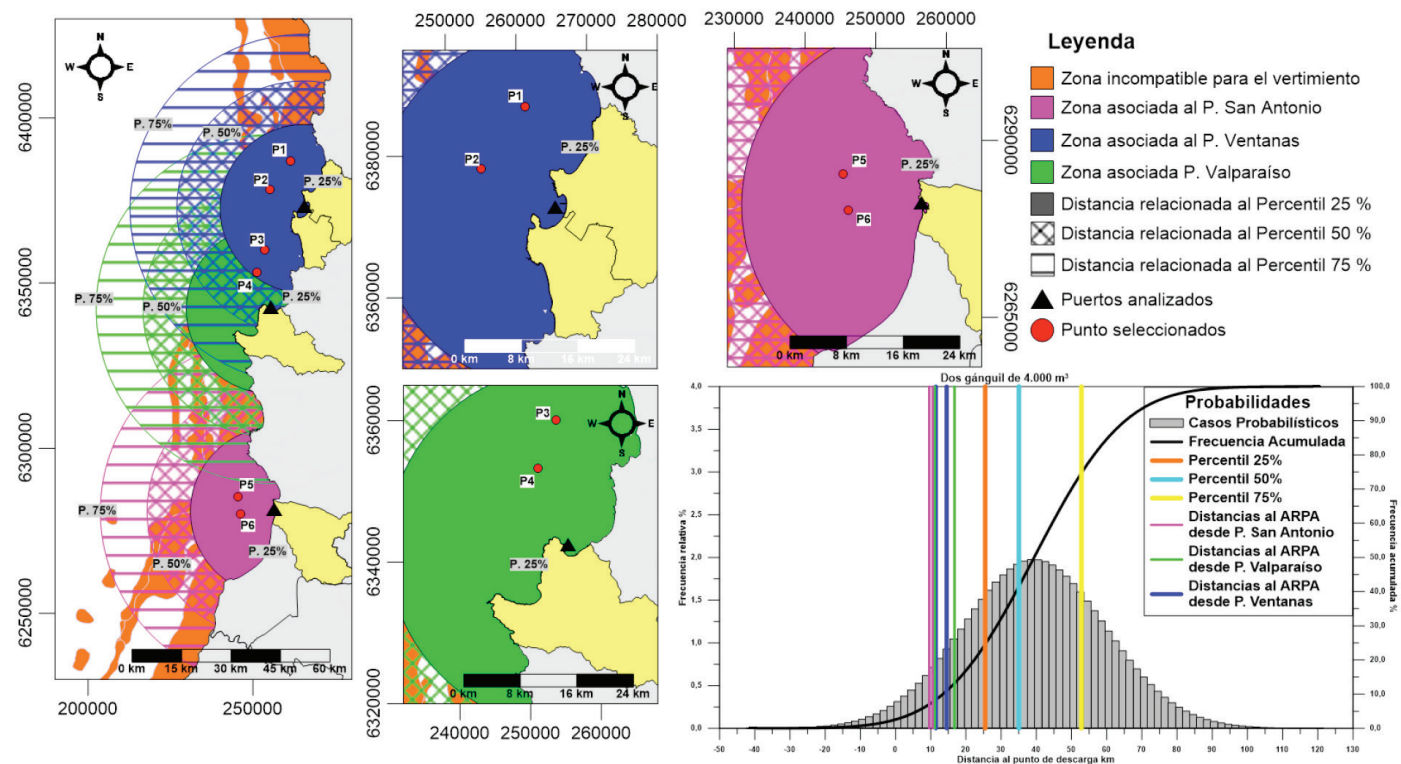


Figura 4: Radios probabilísticos para la realización del vertimiento en los distintos puertos, correspondientes al caso 2, empleando dos gánguiles.

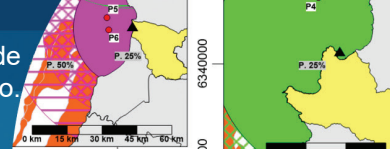
de vertimiento, presentes en el caso 2, incrementan notablemente la distancia capaz de transitar según las condiciones establecidas (Figura 4). El gráfico de frecuencias demostró un aumento en la variabilidad de los casos, ampliando las distancias máximas posibles a alcanzar. Para estas circunstancias, todos los puntos de vertimientos se encontraron dentro de la superficie que considera el escenario pesimista (percentil 25%), identificándose variadas opciones. Por otro lado, para este caso se indican las intercepciones de los escenarios normales (percentil 50%) y escenario optimista (percentil 75%) entre los distintos puertos.

En los posibles sitios de vertimiento del puerto de Ventanas se encontraron probabilidad de falla entre 19.00% para el punto P1 y 17.34% para P2. De forma similar, para el puerto de Valparaíso se estimó una probabilidad de falla del 17.20% en el punto P4 y, por el contrario, en el punto P3 alcanzó una magnitud del 20.20%, respecto de su mayor distancia. En el puerto de San Antonio, el punto P5 mantuvo un valor similar (16.86%), mientras que, P6, en función de su cercanía al puerto disminuyó su incertidumbre con 16.34%.

## Conclusiones

Mediante la investigación realizada en este estudio, se determinaron zonas de incompatibilidad para el vertimiento de sedimentos, frente a los puertos seleccionados. Estas superficies consideran un ancho constante desde la línea de costa en relación del ARPA, sin embargo, la integración con las áreas de interés biológico, centrada en especies con baja movilidad, otorgaron variabilidad en el espacio. Por dicha razón, en los puertos de Ventanas y Valparaíso el procedimiento de vertimiento se vio dificultado, en comparación al puerto de San Antonio, que dispone de una amplia superficie después del ARPA, libre de registros de especies, de acuerdo a la bibliografía encontrada.

Los resultados obtenidos indicaron que, para el caso 1, las evaluaciones con menores distancias, dentro del percentil del 25% (escenario pesimista) no logran sobrepasar el límite del ARPA. Por otro lado, al menos uno de los puntos asociados a los puertos se encontró dentro del percentil 50% (escenario normal), destacando el puerto de San Antonio que, por la lejanía de las especies analizadas, permitió disponer ambos puntos en distancias semejantes. Para los puertos de Ventanas y Valparaíso, dentro del radio



descrito con el percentil 50% se debe mencionar la escasez de posibilidades donde fuera posible verter el sedimento. El radio correspondiente al percentil 75% contenía el resto de puntos seleccionados, además de identificarse otras opciones. Entre los puntos estudiados, el P6, relacionado al puerto de San Antonio, demostró ser la posición más segura de vertimiento, con una probabilidad de falla de 43.17%. Por el contrario, P3, correspondiente al puerto de Valparaíso demostró el mayor riesgo, con probabilidad de falla de 55.24%.

El caso 2, que incluyó un gánguil adicional, otorgó un incremento importante en las distancias posibles de circular para la operación (debido al mayor volumen por viaje). Con los resultados encontrados se estimaron radios correspondientes al percentil 25% (escenario pesimista) de 25.49 km, permitiendo sobrepasar el límite del ARPA y alcanzar todos los puntos evaluados al vertimiento. Debido a que el riesgo en la opción es principalmente asociado a la distancia, los sitios P6 y P3 consideraron los valores extremos de probabilidades de falla de 16.34% y 20.20%, respectivamente. Estimándose una reducción del riesgo cercana al 60%, según los puntos mencionados, por la adición de un gánguil. Con los antecedentes dispuestos, se estableció el incremento en la factibilidad de la ejecución por la adición de un gánguil para dar cumplimiento al proyecto en los plazos acordados, cuya aplicabilidad dependerá de factores particulares del proyecto.

Se debe destacar que los resultados determinados corresponden a la solución de un problema de múltiples variables simplificado, de acuerdo a los parámetros obtenidos, sin embargo, la solución determinada puede ser mucho más certera según la información del sitio a emplear. Por ejemplo, con un conocimiento más basto de las principales localizaciones de las especies se puede incrementar la seguridad ambiental del procedimiento. En este estudio se dio prioridad a los parámetros ambientales, no obstante, es claramente posible agregar variables comerciales al problema y determinar la solución más económicamente factible, bajo el cumplimiento ambiental. Así también, las condiciones establecidas en este problema son fácilmente ajustables según variaciones de las características de la maquinaria disponible.

De acuerdo al estudio establecido, la determinación del sitio óptimo se decidió a partir del menor riesgo asociado

en el desplazamiento al punto de vertimiento, aunque en consideración del medio marino, es importante estudiar las condiciones hidrodinámicas de los sitios con la finalidad de conocer el transporte de la pluma generada a partir del vertimiento. El análisis mencionado otorga una nueva variable de decisión, compleja de obtener, pues es recomendable la implementación de modelos numéricos que representen la hidrodinámica espacial, con una veracidad física que permita disminuir el riesgo, y para efectos de este estudio, se consideró fuera del alcance.

## Referencias

- Acuña, E., Acuña, R., Arancibia, H., Cortés, A., Cubillos, L. y Cid, L. (2014). Evaluación directa de Langostino Amarillo y Langostino Colorado entre la II y VIII regiones, año 2013. Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile
- Acuña, E., Alarcón, A., Arancibia, H., Cubillos, L. y Cid, L. (2015). Evaluación directa de camarón Nailon entre la II y VIII regiones, año 2013. Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile
- Arana, P., Ahumada, M., Guerrero, A., Melo, T., Queirolo, D., Barbieri, M., Bahamonde, R., Canales, C. y Quiroz, J.C. (2005). Evaluación directa de Camarón Nailon y Gamba entre la II y VII regiones, año 2005. Proyecto FIP, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile
- Bentos (2011). DIA: Dragado de profundización portuaria, Iquique, Chile.
- SGA (2016). ADENDA TCVAl: Respuestas al informe consolidado de solicitud de aclaraciones, rectificaciones y/o ampliaciones al Estudio del Impacto Ambiental. Santiago, Chile.
- SIGA (2013). EIA: Dragado en zona marítima común del puerto San Antonio. Santiago, Chile