



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Programa de Magíster en Ciencias c/m en Pesquerías

Dinámica espacio-temporal de los caladeros de pesca de krill y evaluación de agotamientos locales mediante un modelo de depleción

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención en
Pesquerías

FRANCISCO JAVIER SANTA CRUZ CARRASCO
CONCEPCIÓN-CHILE
2017

Profesor Guía: Billy Ernst Elizalde
Depto. de Oceanografía
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Universidad de Concepción

La presente tesis se realizó en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción y ha sido aprobada por la siguiente Comisión Evaluadora.

Profesor Guía

Dr. Billy Ernst Elizalde
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Profesor Co-guía Externo



Dr. Javier Arata Soto
Centro IDEAL
Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas
Universidad Austral de Chile

Comisión Evaluadora

Dr. Luis Antonio Cubillos Santander
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Director del Programa

Dr. Luis Antonio Cubillos Santander
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción



..para que nunca extravíes el rumbo.....

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis sinceros agradecimientos al Dr. Billy Ernst Elizalde, quién me acogió y permitió trabajar en su laboratorio, junto a su excelente equipo de trabajo. Sin duda sus observaciones y múltiples puntos de vista me han permitido expandir mi capacidad de análisis, en el cuál siempre es necesario considerar las numerosas aristas que existen cuando se pretende abordar una problemática.

También, quisiera agradecer infinitamente al Dr. Javier Arata Soto, quien a pesar de la distancia, confió en mí y voluntariamente me apoyó en las etapas iniciales de la presente tesis, donde las interrogantes siempre fueron más que las respuestas. Gracias a él pude acceder a las bases de datos y una serie de documentos que me permitieron abordar de mejor manera mis planteamientos.

Por supuesto, agradecer al Dr. Luis Cubillos por el tiempo dedicado en la evaluación externa y correcciones de la tesis, las cuales han permitido mejorar su estructura y calidad.

Esta tesis corresponde al término de una etapa compleja pero enriquecedora, cargada de momentos de aprendizaje y desarrollo personal, pero también de dificultades, en lo familiar, personal y de amistad. Quisiera expresar mi eterno agradecimiento a las personas que están presentes en mí día a día y son fuente de motivación, fuerza y optimismo. A Camila Belmar, mi pareja/amiga incondicional, fuente infinita de motivación y compañía. A mis colegas y amigos del laboratorio Pablo, Chefa, Braulio, Luciano, quienes enriquecen y alegran lo cotidiano. Por supuesto a mi familia (Papá Alex, Mamá Alicia, Pía, Pablo, Claudia, Santiago), quienes han moldeado quien soy y son parte fundamental de mi pasado, presente y futuro.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
Manejo de la pesquería de krill.....	2
Evaluación espacial de la pesquería de krill.....	3
OBJETIVOS	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos.....	6
HIPÓTESIS	7
CAPÍTULO I: Spatio-temporal dynamics of Antarctic krill fishery: Identification of fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands	8
Summary.....	10
Introduction	11
Materials and methods.....	12
Catch data	12
Fishing hotspots identification	13
Temporal persistence and intra-seasonal variability	14
Operational aspects.....	15
Results	15
Spatio-temporal dynamics of fishing hotspots (FHs).....	15
Intra-seasonal spatial pattern	19
Operational aspects.....	20
Discussion.....	22
Location and persistence of fishing hotspots.....	22
Fishable biomass of krill	23
Potential impact on the ecosystem.....	24
Management implications	26

Acknowledgments	26
References	27
CAPÍTULO II: Análisis de la CPUE a escala fina dentro de los <i>hotspots</i> de pesca de krill en la Península Antártica occidental.....	34
Resumen	35
Abstract.....	36
Introducción.....	37
Materiales y métodos.....	40
Datos de captura y esfuerzo.....	40
Análisis de depleción local.....	40
Seguimiento espacial de la CPUE	41
Resultados.....	43
Series de depleción local	43
Dinámica espacial de la flota.....	46
Domos con avance secuencial sin revisita.....	46
Domos con avance secuencial con revisita.....	47
Efecto de la persistencia espacial	51
Discusión	56
Dimensión espacio-temporal de la CPUE de la pesquería de krill.....	56
Agotamiento local y señal de depleción	57
Tendencia de la CPUE intra-HPs	58
Agradecimientos.....	60
Referencias	61
VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS PLANTEADAS.....	67
BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figure 1: Study area. Corresponds to statistical subarea 48.1 of CCAMLR, showing the Small Scale Management Units. Thick continuous line along South Shetland Islands (SSI) represents the cutting axis for 10 day period analysis. 13

Figure 2: Fishing hotspots (FHs) identified for CCAMLR fishing seasons 2006-07 through 2013-14. Letter indicates hotspot identifier as indicated in Table 1. 18

Figure 3: Cumulative catch by 10 day periods depicted as geographical distance along the Drake and Bransfield sectors (as described in Figure 1). 20

Figure 4: Top panel shows vertical distribution of catch: median depth (point), 25% (upper bars) and 75% (lower bars) percentiles. Bottom panel shows percentage of catches taken by traditional (black) and continuous (gray) fishing system. 22

CAPÍTULO II

Figura 1: Esquema conceptual del comportamiento en forma de domo de la CPUE nominal diaria para la pesquería del krill antártico. 42

Figura 2: Ajuste del modelo de depleción para los catorce *hotspots* pesqueros de krill. 45

Figura 3: Domos de la CPUE nominal y desplazamiento secuencial de las capturas en los HPs A y D. 47

Figura 4: Desplazamiento secuencial de las capturas en el HP-M y domos de la CPUE nominal diaria. 50

Figura 5: Ubicación espacial de los lances de pesca y CPUE nominal diaria de los HPs F, I, M y N..... 51

Figura 6: Domos de la CPUE nominal y desplazamiento secuencial de las capturas en el HP-N. 53

Figura 7: Ajuste del modelo de Leslie a la data completa del HP-N (línea gris) y al periodo 25 marzo a 17 de mayo (línea negra). 55



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Table 1: Fixed band (FB), identifier for fishing hotspots (FH), hotspot persistence (HP), number of fishing vessels (NFV), total hotspot catch (HC), hotspot surface (HS), catch density (CD) and percentage of total catch within the hotspots (% SC) and overall season's catch (SC).	17
---	----

CAPÍTULO II

Tabla 1: Periodo de pesca, número de días efectivos de pesca (nde), captura acumulada (ca), pendiente (K) del modelo lineal de Leslie, significancia estadística (p) y CPUE promedio por <i>hotspot</i> pesquero.	44
--	----

Tabla 2: Duración, número de barcos, captura, revisita y porcentaje de caída de la CPUE en cada domo identificado en el HP M durante la temporada 2012/13.	49
---	----

Tabla 3: Duración, número de barcos, captura, revisita y porcentaje de caída de la CPUE en cada domo identificado en el HP N durante la temporada 2013/14.	54
---	----

RESUMEN

El krill antártico (*Euphausia superba*) es una especie fundamental para el ecosistema pelágico del océano austral, sosteniendo la alimentación de numerosas especies de depredadores. Las grandes agregaciones de krill son desde los años 1970s el objetivo de una flota pesquera multi-nacional. Las capturas máximas por temporada son reguladas por un límite de captura precautorio (LCP) calculado de acuerdo a la abundancia de krill estimada en la evaluación sinóptica del año 2000. Dada la alta incertidumbre detrás del LCP, se acordó un nivel de captura umbral de 620 mil toneladas anuales, distribuidas entre las distintas zonas de pesca (Oeste Península Antártica, Orcadas del sur, Georgias del sur y Sándwich del Sur) con el objeto de reducir la concentración de las capturas y disminuir el riesgo de agotamientos locales.

La flota desarrolla una estrategia de pesca basada en la explotación local de concentraciones de krill, por lo cual tiende a concentrarse en sectores específicos. El impacto de este comportamiento agregativo sobre las abundancias locales es desconocido, más aún en sectores relativamente nuevos para la pesquería como lo son los estrechos de Bransfield y Gerlache, reconocidos por su importancia para la renovación poblacional y constituir zonas de alimentación de depredadores.

El presente trabajo identifica y caracteriza *hotspots* pesqueros (HPs) mediante un análisis de hotspots aplicado sobre la captura de krill acumulada en la temporada de pesca. Este análisis se estructura en función de la escala de operación de la flota, y no sobre escalas regionales o administrativas. Los HPs contribuyen en acotados periodos de tiempo, con gran parte de la captura total acumulada durante la temporada de pesca, por lo cual, los hemos considerado como una nueva alternativa para evaluar la relación lineal entre la CPUE y la abundancia local de krill. En particular, analizamos mediante un modelo de depleción el proceso de agotamiento local de las agregaciones explotables de krill, su relación con la disminución de los rendimientos de pesca y el proceso de desplazamiento diario de la flota.

En el Oeste de la Península Antártica se identificaron catorce HPs entre las temporadas 2006/07 y 2013/14. Los HPs representaron zonas de alta agregación espacial de las capturas, contribuyendo con hasta el 60% de la captura acumulada en la temporada de pesca. En el

estrecho de Bransfield (EB) se identificaron HPs durante cinco temporadas, siendo su zona central un sector clave para el funcionamiento de la flota.

A pesar de las intensas capturas acumuladas a nivel de HPs, solo dos casos (ambos en el centro del EB) evidenciaron señales de depleción significativas. Hemos identificado que la CPUE en los HPs presenta un comportamiento de tipo domo, dado por una fase ascendente, fase máxima (CPUE con valor máximo) y fase descendente. Nuestros resultados indican que ante una disminución considerable de la CPUE, las embarcaciones desarrollan desplazamientos diarios entre zonas de pesca contiguas, lo cual permite obtener nuevas fases máximas. La obtención secuencial de nuevas fases máximas afecta la relación lineal entre la abundancia local y la CPUE a escala de HPs, por lo cual futuros análisis de depleción deben considerar una escala espacial menor y enfocarse en las fases descendentes de los domos identificados.



ABSTRACT

Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species of the Southern Ocean pelagic ecosystem, supporting the feeding of numerous natural predators.

Large krill aggregations are the target of a multi-national trawl fleet. The maximum catch per season is regulated by a precautionary catch limit (PCL) calculated according to the abundance of krill estimated in the year 2000 synoptic assessment. Given the high uncertainty behind the PCL, a trigger level of 620,000 tonnes was established, distributed between fishing zones (Antarctic Peninsula, South Orkney, South Georgia and South Sandwich) to avoid catch concentration and reduce localized depletion risk.

The trawler fleet develops a fishing strategy based on the local exploitation of krill concentrations, which tends to concentrate on specific sectors. The impact of this aggregative fishing behavior on local krill abundances is unknown, even less, in relatively new fishing sectors such as the Bransfield and Gerlache Strait, recognized for their importance for krill renewal or as feeding areas of natural predators.

The present work identifies and characterizes fishing hotspots (FHs) through a hotspot analysis applied on the accumulated krill catch in the fishing season. This analysis was performed according to the fleet operation scale (not on regional or administrative scales). The HPs contribute in short periods, with a great part of the total accumulated catch during the fishing season, so, we have considered the HPs as a new alternative to evaluate the linear relationship between CPUE and local krill abundance. In particular, we analyze using a depletion model the process of local depletion of exploitable krill aggregations, its relation with the decrease of the fishing yields and the process of daily displacement of the fleet.

Despite the intense catches accumulated at FHs scale, only two cases (both in the center of EB) showed significant signs of depletion. We showed that CPUE experiences a dome-shaped behavior, with an ascending phase, a maximum phase (CPUE with maximum value) and a descending phase. Our results indicate that when a significant decrease in CPUE occurs, vessels develop daily movements between contiguous fishing zones, allowing the emergence of new maximum stages. The sequential development of new maximum phases affects the linear relationship between local abundance and CPUE at FHs scale, therefore future depletion analyzes should consider a smaller spatial scale and focus on the descending phases of the identified domes.

INTRODUCCIÓN

El krill antártico (*Euphausia superba*) es la especie más abundante en los océanos mundiales y es una especie clave en la trama trófica del ecosistema pelágico del océano austral, sosteniendo la alimentación de numerosas especies de depredadores naturales como peces, cefalópodos, pingüinos, focas y ballenas (Atkinson *et al.*, 2012).

Las grandes agregaciones de krill han sido desde los años 1970s, la especie objetivo de una activa pesquería multi-nacional, multi-flota que alcanzó en el año 1982 su máximo histórico de capturas con más de 500 mil toneladas. Luego de una disminución durante los años 1983-84, las capturas volvieron a aumentar durante los años 1986-89 con 350 mil toneladas por temporada. A fines de los 1980s, luego de problemas en el mercado de krill por la detección de altos niveles de fluoruros en su exoesqueleto y posteriormente por la disolución de la Unión Soviética se produce una nueva disminución de las capturas (Constable *et al.*, 2000; Kawaguchi & Nicol, 2007). A partir de 1992 las capturas se mantuvieron estables en torno a las 100 mil toneladas, mientras que desde el año 2010 se ha observado un creciente interés económico, lo que ha determinado una expansión de la pesquería con capturas por sobre las 200 mil toneladas en años recientes (Nicol *et al.*, 2012). Las capturas en los años 1970s fueron realizadas exclusivamente en el sector del océano Índico Sur, mientras que desde 1980 comenzó un desplazamiento de la flota hacia el sector del Atlántico Sur, donde la flota ha desarrollado sus operaciones de pesca hasta la actualidad, concentrando sus capturas sobre la plataforma continental hasta el quiebre del talud de la Península Antártica e islas Georgias, Orcadas y Shetland del Sur (Kawaguchi & Nicol, 2007).

La pesca se realiza mediante buques arrastreros, los que pueden pescar repetidamente durante días sobre una misma agregación. Una vez identificada la presencia de agregaciones comerciales, las capturas son realizadas mediante un método tradicional de arrastre, el cual tiene una duración de 30 a 90 minutos, capturando en torno a 10-15 toneladas por lance (Kawaguchi & Nicol 2007). Desde el año 2006, buques noruegos han implementado el denominado arrastre continuo, en el cual el krill capturado es extraído directamente del copo de la red mediante una bomba de succión, sin la necesidad del virado de la red, lo que permite operar ininterrumpidamente durante las 24 horas del día (Kawaguchi & Candy 2009). Este método es considerado como un mecanismo altamente efectivo, capaz de proveer de materia prima constante al procesamiento a bordo (Nicol *et al.*, 2012).

En el sector del Atlántico Sur las temporadas de pesca se desarrollan en función de la dinámica temporal y espacial de la cobertura de hielo, comenzando desde el mes de noviembre en sectores próximos a la Península Antártica e islas Shetland del Sur. El debilitamiento y reducción espacial de la cobertura de hielo durante el invierno producto del cambio climático (Atkinson *et al.*, 2004), ha favorecido el desarrollo de operaciones de pesca en torno a la Península Antártica incluso durante el invierno, manteniendo intensas capturas en este sector durante prácticamente todo el año (Constable *et al.*, 2000; Nicol & Foster 2003; Kawaguchi & Nicol 2007; Nicol *et al.*, 2012).

Manejo de la pesquería de krill

La pesquería de krill es considerada como una actividad en expansión, sub-explotada y capaz de convertirse en una de las pesquerías más grandes del mundo (Gascon & Werner 2006; Constable, 2011; Nicol *et al.*, 2012). El manejo de la pesquería es efectuado por la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), quienes han desarrollado un enfoque de manejo que busca compensar tres criterios fundamentales: i) asegurar un proceso de reclutamiento suficiente para la renovación poblacional y estatus saludable del stock de krill (criterio de reclutamiento), ii) asegurar un nivel de escape de krill que permita satisfacer las demandas tróficas de las poblaciones de depredadores naturales del krill (criterio de depredadores) y iii) fomentar el desempeño y rendimiento sustentable de la pesquería (criterio de sustentabilidad) (Everson & de la Mare 1996; Costable *et al.*, 2000; Grant *et al.*, 2013b). Estos criterios han sido establecidos como objetivos de manejo y han sido implementados dentro de medidas de conservación que incorporan la variabilidad ambiental y se basan en un enfoque precautorio que permita mitigar efectos ecológicos adversos de las actividades extractivas (Nicol & Foster, 2003, Constable, 2011).

El manejo de la pesquería de krill bajo un enfoque precautorio se materializó a través de la adopción de un límite de captura precautorio (LCP) basado en la estimación de una proporción (γ) de la biomasa pre-explotación (B_0), mediante un modelo generalizado estocástico de captura de krill (Generalized Yield Model, GYM) proyectado a 20 años. El modelo es basado en simulaciones Monte Carlo incorporando variabilidad aleatoria del reclutamiento, parámetros de crecimiento, mortalidad, selectividad a la edad y patrones estacionales de mortalidad por pesca. Como resultado se obtienen dos valores para el coeficiente de proporcionalidad γ . El primero (γ_1) estima qué valor de captura genera una

reducción de la biomasa desovante mayor o igual a un 20% del nivel medio pre-explotación (criterio de reclutamiento). El segundo (γ_2) estima qué nivel de captura genera que la mediana del tamaño poblacional alcance un 75% de la biomasa total pre-explotación, considerado como nivel de escape suficiente para las demandas de los depredadores naturales (criterio de los depredadores). El valor de proporcionalidad elegido corresponde al más bajo entre ambos γ , ya que elegir el mayor significaría romper uno de los criterios (Everson & de la Mare, 1996; Constable *et al.*, 2000).

A partir de un crucero sinóptico realizado por la CCRVMA en febrero del año 2000 se estimó una biomasa total de 44,3 millones de toneladas de krill en el Atlántico Sur (área 48) (Hewitt *et al.*, 2004). Este valor se utiliza como biomasa pre-explotación (B_0) para el cálculo del LCP para la pesquería de krill. De esta manera, considerando un coeficiente de proporcionalidad $\gamma = 0,116$ estimado por el GYM, el límite de captura anual establecido para el área 48 es de 5,61 millones de toneladas.

De acuerdo a la alta incertidumbre del GYM y ante el objetivo de salvaguardar la población de krill y las especies dependientes, la comisión internamente adoptó en 1991 una postura conservativa y estableció un nivel de captura de 620 mil toneladas anuales (denominado *trigger level*, medida de conservación CM 32/X), el cual fue subdividido desde la temporada 2010/11 entre las sub-áreas 48.1 (Península Antártica), 48.2 (Islas Orcadas del Sur), 48.3 (Islas Georgias del sur) y 48.4 (Islas Sandwich del Sur) (medida de conservación CM 51-01). Esta división fue con el objetivo de evitar la concentración de las capturas y disminuir el riesgo de agotamientos localizados de krill en sectores cercanos a colonias de depredadores (Constable, 2011; Flores *et al.*, 2012; Watters *et al.*, 2013).

Este *trigger level* fue diseñado para regular las capturas máximas anuales y corresponde a una estrategia de explotación precautoria que será removida sólo cuando la CCRVMA alcance un enfoque de manejo ecosistémico lo suficientemente desarrollado (Grant *et al.*, 2013b). A nivel mundial la pesquería de krill es considerada probablemente la única pesquería en donde las capturas anuales son hasta 40 veces menos que el límite de captura anual establecido (Nicol *et al.*, 2012).

Evaluación espacial de la pesquería de krill

La CCRVMA ha desarrollado diferentes alternativas para mejorar la resolución espacial del manejo de la pesquería de krill. Una de estas opciones corresponde a las “unidades de

ordenación de pequeña escala” (Small-Scale Management Unit, SSMU), diseñadas para vincular de manera más específica los patrones de distribución-abundancia del krill, con los depredadores naturales y la pesquería, a fin de evaluar el nivel de sobreposición y eventual competencia entre estos dos últimos componentes (Constable & Nicol 2002; Hewitt *et al.*, 2004; Hill *et al.*, 2009; Constable, 2011). A pesar de que fueron claramente definidas a nivel espacial, estas unidades de ordenación han sido sólo consideradas como referencia a nivel de análisis y discusión de diferentes iniciativas de investigación (Hewitt *et al.*, 2004; Plagányi & Butterworth, 2012), pero no han sido adoptadas formalmente como medidas de conservación para el manejo de la pesquería (Nicol *et al.*, 2012; Grant *et al.*, 2013a).

La flota ha cambiado sus patrones espaciales y temporales de operación, concentrando las capturas en sitios específicos a escala local (Grant *et al.*, 2013a). Estos lugares corresponden a zonas donde anualmente se producen los reclutamientos de la población o representan áreas importantes para la alimentación de colonias de depredadores naturales. Esta situación a determinado recomendaciones de relocalización del esfuerzo de pesca hacia sectores oceánicos, donde estarían las mayores abundancias de krill, pero en concentraciones menos favorables para la pesquería (Hewitt *et al.*, 2004; Kawaguchi *et al.*, 2006; Plagányi & Butterworth, 2012; Watters *et al.*, 2013).

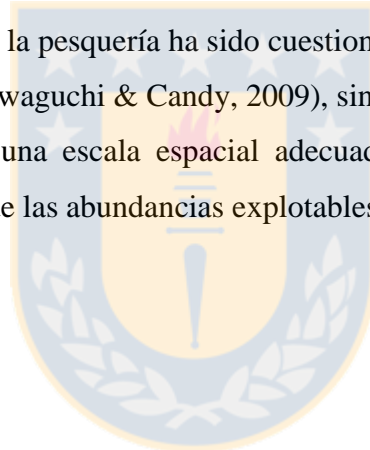
La sobreposición de las capturas de krill con las zonas de alimentación de depredadores naturales es un factor clave en el manejo de la pesquería. Se ha revelado una alta sobreposición entre ambos elementos en algunas SSMU’s costeras durante el invierno, mientras que para algunas especies de depredadores migratorios, como ballenas, la flota se sobreposiciona en importantes áreas de pesca históricas en las islas Orcadas y Georgias del Sur (Agnew & Phegan 1995; Alonzo *et al.*, 2003; Hewitt *et al.*, 2004; Hinke *et al.*, 2014).

En consecuencia, la discusión actual está centrada en definir cómo el límite de captura debe ser espacialmente distribuido (Grant *et al.*, 2013a). La disminución de abundancias locales de krill producto de la concentración de capturas es un escenario reconocido por la CCRVMA, por lo cual se ha fomentado el desarrollo de herramientas de evaluación de la pesquería espacialmente explícitas (WG-SAM, 2012), reconociendo que la influencia espacial y temporal de la estrategia de pesca es clave para la comprensión de la pesquería y sus impactos locales (WG-EMM, 2013). Una concentración permanente de las capturas en algunas SSMUs a lo largo del tiempo y ante un escenario de expansión de las capturas podría

ocasionar impactos profundos en el ecosistema (Agnew & Marin, 1994; Hewitt *et al.*, 2004; Nicol *et al.*, 2012; Plagányi & Butterwoth, 2012).

En la pesquería de krill la flota exhibe una importante variabilidad interanual en el uso espacial de las áreas de pesca. La estrategia por parte de los capitanes es visitar temporalmente los caladeros, hasta que los rendimientos de pesca (captura por unidad de esfuerzo, CPUE) disminuyen fuertemente (Kawaguchi & Candy, 2009). Ante este patrón se vuelve relevante analizar el desempeño local de la flota, ya que si bien desde el 2006 la pesquería se encuentra en un régimen de altos rendimientos (Gasyukov & Kasatkina, 2010), que no estarían vinculados a cambios a nivel operacional o tecnológico de la flota, sino a cambios en la abundancia de krill producto de la variabilidad ambiental (Kasatkina & Gasyukov, 2014), no han sido evaluados hasta ahora, posibles procesos de agotamiento local, vinculados a capturas significativas de la flota.

La información proveniente de la pesquería ha sido cuestionada para analizar la variabilidad de la abundancia del stock (Kawaguchi & Candy, 2009), sin embargo, un análisis cuidadoso de la CPUE, aplicado sobre una escala espacial adecuada, permitiría conocer sobre la dinámica espacial y temporal de las abundancias explotables de krill (Atkinson *et al.*, 2012).



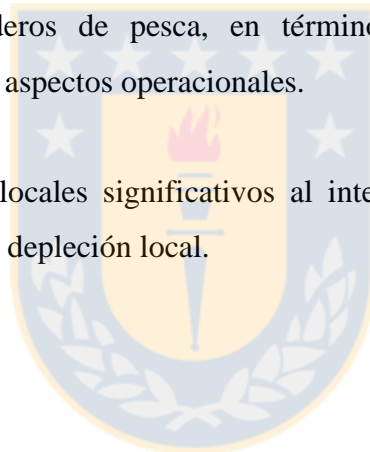
OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la dinámica espacial y temporal de las operaciones de pesca de la pesquería de krill, identificando sectores de alta concentración de captura (*hotspots* pesqueros) y evaluar el desarrollo de procesos de depleción local.

Objetivos específicos

- 1) Identificar las zonas de concentración de la captura acumulada en la sub-área estadística 48.1.
- 2) Caracterizar los caladeros de pesca, en términos de su dimensión espacial, persistencia temporal y aspectos operacionales.
- 3) Evaluar agotamientos locales significativos al interior de los *hotspots* pesqueros mediante un modelo de depleción local.



HIPÓTESIS

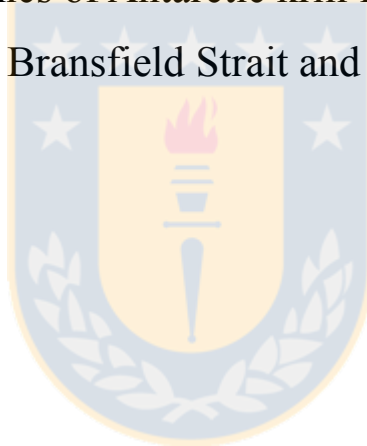
H1: Las operaciones de pesca de la flota ocurren de manera agregativa, concentrando la captura acumulada sobre *hotspots* pesqueros que mantienen una fuerte consistencia espacial y temporal durante la temporada de pesca.

H2: La actividad de pesca desarrollada en *hospots* pesqueros, genera disminuciones de los rendimientos de pesca debido a depleción significativa de la abundancia local de krill.



CAPÍTULO I

Spatio-temporal dynamics of Antarctic krill fishery: Identification of fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands



Spatio-temporal dynamics of Antarctic krill fishery: Identification of fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands

Francisco Santa Cruz^{1,*}, Billy Ernst², Javier A. Arata³

¹*Programa de Magíster en Ciencias con mención en Pesquerías, Universidad de Concepción, Concepción, Chile*

²*Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile*

³*Centro IDEAL, Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Edificio Pugin piso 1, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile*

* Corresponding author. Email: frasantacruz@udec.cl



submitted to ICES Journal of Marine Science

Summary

Antarctic krill is a key species in the food web and also a major resource for the fishing industry in the Southern Ocean. Fishery management is based on a precautionary catch limit divided by subarea. The Antarctic krill fishery has been operating continuously in the Antarctic Peninsula area since 1980s, and the spatial and temporal patterns have been described only on meso or macro scales ($\gg 100 \text{ km}^2$), even though its operation takes place at a smaller scale. In this paper we present a novel analysis to identify small-scale fishing hotspots (FHs), as well as a temporal persistence analysis of these FHs. Results indicate that those FHs have been the focus of fishing throughout the years, particularly in seasons where the precautionary catch limit was reached. Historically, the fishing grounds were located north of South Shetland and Elephant Islands, but they re-located in recent seasons to the center of the Bransfield Strait and north of the Gerlache Strait, showing a southward expansion of the fleet. In addition, there are strong catches during June and July, reflecting a temporary expansion into a winter fishery. Identified FHs have small surfaces, high catch densities ($>10 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and maximum temporal persistence of 5-6 months. These high and concentrated catches may decrease significantly the local abundances of krill, being harmful for the Antarctic ecosystem in areas where the fishing hotspots overlap with critical sectors for recruitment and population renewal or sectors where the decreasing of prey availability affects the foraging activities for natural predators.

Keywords: Antarctic krill, krill fishery, fishing hotspots, southern ocean, Antarctic Peninsula.

Introduction

Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species in the structure and functioning of the food web in marine ecosystems of the Southern Ocean (Schmidt *et al.*, 2014). Its enormous biomass and intermediate trophic level (Cornejo-Donoso and Antezana, 2008; Ainley and Pauly, 2014) give it influence over the abundances at lower and higher trophic levels, by consumption/production of nutrients from intensive predation on phytoplankton blooms during the summer. This way Antarctic krill sustains large populations of natural predators such as fish, cephalopods, penguins, seals and whales (Atkinson *et al.*, 2012), and recycles nutrients through its feces (Tovar-Sanchez *et al.*, 2007).

In the mid-1970s, Antarctic krill turned into one of the main fishing resources exploited in the Southern Ocean. Multivessel and multinational fishery started in the Indian Ocean and advanced gradually towards the South Atlantic in the 1980s, where the fleet operates almost exclusively since the 1990s. At present, the fleet concentrates activity off the Antarctic Peninsula and South Shetland, South Georgia and South Orkney Islands (Kawaguchi and Nicol, 2007; Nicol *et al.*, 2012). In these places, krill form dense aggregations, extending from a few hundred meters to kilometers. Such aggregations allow trawler vessels to fish repeatedly on the same spot (Kawaguchi and Nicol, 2007).

The spatial-temporal behavior of the krill fishery is primarily affected by ice condition, as trawlers can only operate in ice-free areas (Kawaguchi and Nicol, 2009). Fishing season begins in late spring (December) off the South Shetland Islands and the Western Antarctic Peninsula, moving eastward to the South Orkney Islands and in winter, close to South Georgia Islands where limitation regarding sea-ice coverage does not exist (Kawaguchi *et al.*, 2006). This historical pattern began changing in recent years due to a delay and reduction of sea-ice coverage around the Western Antarctic Peninsula during fall (Atkinson *et al.*, 2004), allowing trawlers to operate inside the Bransfield Strait throughout winter in some years (Constable *et al.*, 2000; Nicol and Foster, 2003; Kawaguchi and Nicol, 2007; Nicol *et al.*, 2012).

This shift in fishing pattern parallels an increase in krill catches, causing an increasing risk of local depletion of stocks due to concentration of catches. Several models indicate the negative impact fishing activity has on krill-dependent predators, given the aggregation level of the catches (Plagányi and Butterworth, 2012; Watters *et al.*, 2013). However, current

models and the current precautionary catch level distribution set by the Convention for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR) (620 thousand tonnes, divided by subarea) are based on the abundance and distribution of a single krill survey conducted in 2000 (Hewitt *et al.*, 2004a; Siegel *et al.*, 2004). This approach therefore ignores the enormous inter-annual variability of krill density and abundance (Flores *et al.*, 2012).

Efforts for characterizing krill fleet's fishing pattern have been focussed on regional and meso-scales ($\gg 100 \text{ km}^2$) delimited by subareas or small scale management units (SSMUs) (e.g., Hewitt *et al.*, 2004b; Plagányi and Butterworth, 2012; Watters *et al.*, 2013). However, the spatial scale of fishing operations works at smaller scales of $10\text{-}100 \text{ km}^2$ (Grant *et al.*, 2013), which renders it more local than the scale of conservation and management measures recognize (Hill *et al.*, 2009; Grant *et al.*, 2013). Despite this, no efforts have been made to identify small-scale fishing grounds or 'fishing hotspots' (FHs).

The aim of this study is to identify fishing hotspots exploited by the krill fishery northwest of the Antarctic Peninsula (statistical subarea 48.1), analyzing their i) position, ii) temporal persistence within the fishing season, iii) daily dynamics, and, iv) operational aspects of the fleet.

Materials and methods

Catch data

The spatial fishing pattern of the krill fishery for subarea 48.1 of the CCAMLR (Figure 1) in the 2006/07 and 2013/14 seasons were analyzed using haul-by-haul data. This data is reported monthly by the fishing industry on so-called C1 reporting forms, submitted to the CCAMLR Secretariat. These forms contain operational information of each haul. Relevant fields for the present study were catch (ton), date (day, month and season), location (latitude, longitude), depth (m) and fishing technique. Two fishing techniques had been used during the study period, the so-called traditional mid-water trawling fishing system (TFS) and the continuous fishing system (CFS). The latter method allows to extract captured krill directly from the codend via a suction pump without the need for tow haul. This enables uninterrupted trawling for days (see more details in Kawaguchi and Candy, 2009). At CCAMLR's disposition, in C1 forms the CFS catches are reported in haul intervals of two hours length, generating a registry compatible with the TFS report.

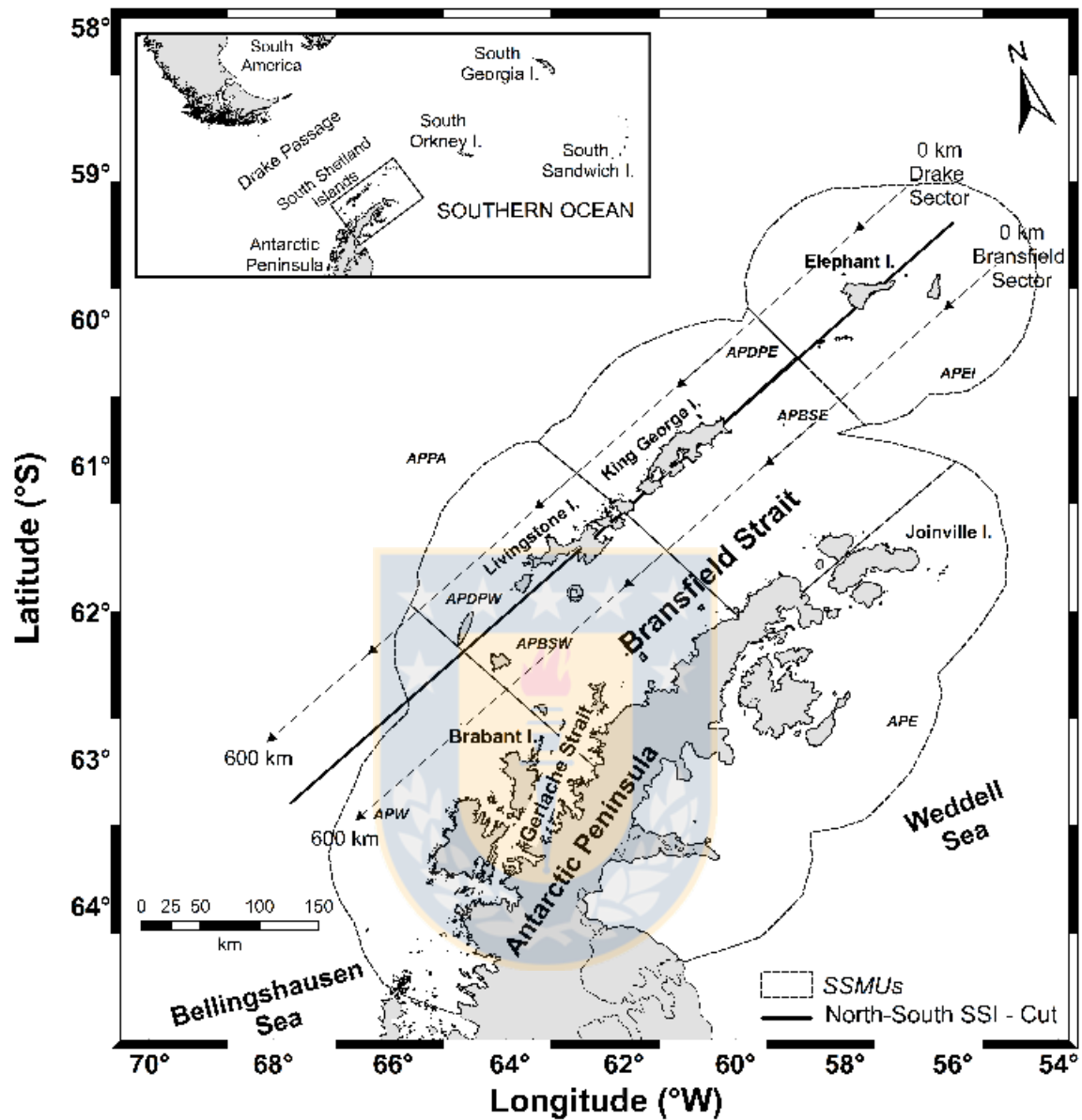


Figure 1: Study area. Corresponds to statistical subarea 48.1 of CCAMLR, showing the Small Scale Management Units. Thick continuous line along South Shetland Islands (SSI) represents the cutting axis for 10 day period analysis.

Source: Own elaboration.

Fishing hotspots identification

Krill fishing operations mostly occur at a pica-scale site (Grant *et al.*, 2013), with typical tow distances of around 6 km (3.5 nautical miles; Hill *et al.*, 2009). Considering this, we built a

fine-scale grid of 9x9 km², assuming that this dimension represents a scale unit relevant to fishing operations. All data selected from C1 forms were integrated into the fine-scale grid through the spatial join tool, and all geographic analysis was conducted using WGS 1984 Antarctic Polar Stereographic projection.

Fishing hotspots were spatially identified via hotspot analysis based on the local *Getis Ord Gi statistic* (Getis and Ord, 1992) to detect cells with low/high clustering of intra-season cumulative catch. This analysis compares proportionally the cumulative annual catch of a group of neighboring cells with the cumulative annual catch of all cells, testing statistical significance of clustering values by the degree to which the local cumulative catch of a group of cells differs from the expected local cumulative catch (Anselin, 1995; Ord and Getis, 1995). This approach is sensitive to spatial radius value of search between neighboring cells and requires a specific fixed distance band value to find the highest level of spatial clustering (z-score) of the cumulative catch. We estimated the fixed distance band (expressed in km) by measuring the intensity of spatial autocorrelation of Global Moran's I for a series of increasing distances (10 to 150 km). Hotspots analysis was run using euclidean distance and estimated fixed-band distance. Cells with z-score > 1.65 were considered statistically significant (Jalali *et al.*, 2015).

Temporal persistence and intra-seasonal variability

The level of temporal persistence of the catches inside the identified fishing hotspot was calculated by separating the catch data into monthly layers, integrated into a 9x9 km² grid and assessed by overlay analysis, estimating the number of months that each cell was continually fished. The overlaying value represents the coverage and temporal consistency of the fleet as an estimation of the level of sustained fishing pressure (Jalali *et al.*, 2015).

Exploratory visualization of daily hauls position, allowed preliminary detection of the fleet movement between fishing grounds. Like a general pattern, the fleet exhibits a southwest direction displacement, that start at Elephant Island, advances to Livingston Island and entering from the south into the center of the Bransfield Strait. To corroborate and reflect this pattern, a cut-line was made along the South Shetland Islands, separating the area into a northern (Drake) and southern sector (Bransfield). For each sector, a starting point is fixed in its northeastern edge (0 m) and with southwesterly direction the catch was grouped every 30 km and 10 days, to arrive at the southwestern edge (~600 km) (Figure 1).

Operational aspects

All underlying haul-by-haul data inside the identified fishing hotspot were extracted to characterize operatively the fleet's activities. We assessed the depth range of catches and estimated the depth of 25%, 50% and 75% of capture. Finally, a stacked barplot was constructed to represent the proportion of catches taken by traditional and continuous fishing system.

Results

Spatio-temporal dynamics of fishing hotspots (FHs)

The fishing pattern and yield of the Antarctic krill fishery showed low catches during the first three years analysed (2006-07 to 2008-09), rising to almost the maximum allowed quota (155.000 ton) in 2009-10 season, with catch densities greater than $10 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$ (Table 1). This pattern was repeated in the following years except in the 2010-11 season, when overall catches and FHs catches remained very low. The increase in overall catches in subarea 48.1 and the concentration of catches in specific FHs coincides with changes in the spatio-temporal dynamics of the fleet. During fishing seasons with low overall catches and low catch density within FHs, the fleet concentrated mainly north of the South Shetland Islands, whereas in years of high overall catches and high catch densities the fleet operated mainly within the Bransfield Strait (Figure 2). During fishing seasons 2006-07 and 2007-08 the fleet concentrated on three FHs off the northern coast of Livingston and Elephant Islands (Figure 2). Catch densities were low ($2.1\text{-}4.0 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and seasonal (2-3 months of duration, mainly autumn).

Fishing season 2008-09 was the first with a significant FH inside the Bransfield Strait, mainly off the northern tip of the Antarctic Peninsula and Joinville Island (Figure 2). This FH, labeled as *D*, was the single largest estimated (8000 km^{-2}), having a low catch density ($2.2 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and being short-lived (1-2 months), indicative of low krill aggregation.

In the 2009-10 fishing season the fleet remained in the Bransfield Strait and began to yield large catches in small areas, reflecting an increasing concentration of the catch. The identified FHs (*E*, *F*, *G*) presented high catch densities (range: $9.6\text{-}19.6 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and were operative for 3-4 months (March to October), when the fishing quota was eventually consumed. In the following season, 2010-11, no fishing hotspots were detected in the Bransfield Strait but a

single FH (*H*) off the northern shore of King George Island. Overall catch during this season was low (Table 1), with a low catch density ($2.6 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and short persistence (2 months). During fishing season 2011-12, three FHs were detected, one off the northwestern tip of Livingstone Island (*K*), one in the center of the Bransfield Strait (*I*) and one in the Gerlache Strait (*J*); this latter one became relevant in terms of monthly catch (5,514 ton per month) (Table 1, Figure 2). Catch densities were medium ($8.7\text{-}11.3 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$), linked to a short persistence of the FHs (2-4 months).

Fishing seasons 2012-13 and 2013-14 were characterized by the existence of a prominent fishing hotspot in the center of the Bransfield Strait (Figure 2), with high catch density (FH-*M*= 30.33 and FH-*N*= $20.1 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}$) and long persistence (5-6 months). These two seasons filled respectively 99% and 94% of the precautionary catch limit for subarea 48.1 (Table 1). Notably in all fishing seasons in which the established precautionary catch limit for subarea 48.1 was reached, the fleet concentrated on 1-3 concise fishing hotspots (*E*, *F* and *G*; *I* and *J*; *M*; *N*) in the Bransfield Strait. This shows that the process of increasing catches correlates with a concentration pattern of the fleet, determining large catches in relatively small areas in relation to the total area for which the quota is provided. The temporal persistence of identified FHs varies between fishing seasons, reaching their highest values in 2012-13 and 2013-14 seasons with fishing hotspots (*M* and *N*) used for up to 6 and 5 months respectively (Table 1).

Table 1: Fixed band (FB), identifier for fishing hotspots (FH), hotspot persistence (HP), number of fishing vessels (NFV), total hotspot catch (HC), hotspot surface (HS), catch density (CD) and percentage of total catch within the hotspots (% SC) and overall season's catch (SC).

CCAMLR fishing season	FB (km)	FH	HP (n° months)	NFV (n°)	HC (ton)	HS (km²)	CD (ton km⁻²)	% SC	SC (ton)
2006-07	14	A	4	3	6508	1539	4.2	40.8	15937
		B	3	3	1539	729	2.1	9.7	
2007-08	20	C	3	1	1778	648	2.7	68.9	2579
2008-09	54	D	2	3	17869	8019	2.2	52.4	34089
2009-10	35	E	4	7	41570	3402	12.2	26.9	154264
		F	3	7	33524	3483	9.6	21.7	
		G	2	3	12679	648	19.6	8.2	
2010-11	20	H	2	4	5112	1944	2.6	55.7	9180
2011-12	19	I	5	4	13454	1539	8.7	17.8	75621
		J	2	4	11028	972	11.3	14.6	
		K	3	5	18505	1701	10.9	24.5	
2012-13	19	L	2	3	15105	648	23.3	9.9	153252
		M	6	8	63865	2106	30.3	41.7	
2013-14	29	N	5	8	84734	4212	20.1	57.9	146263

Source: Own elaboration.

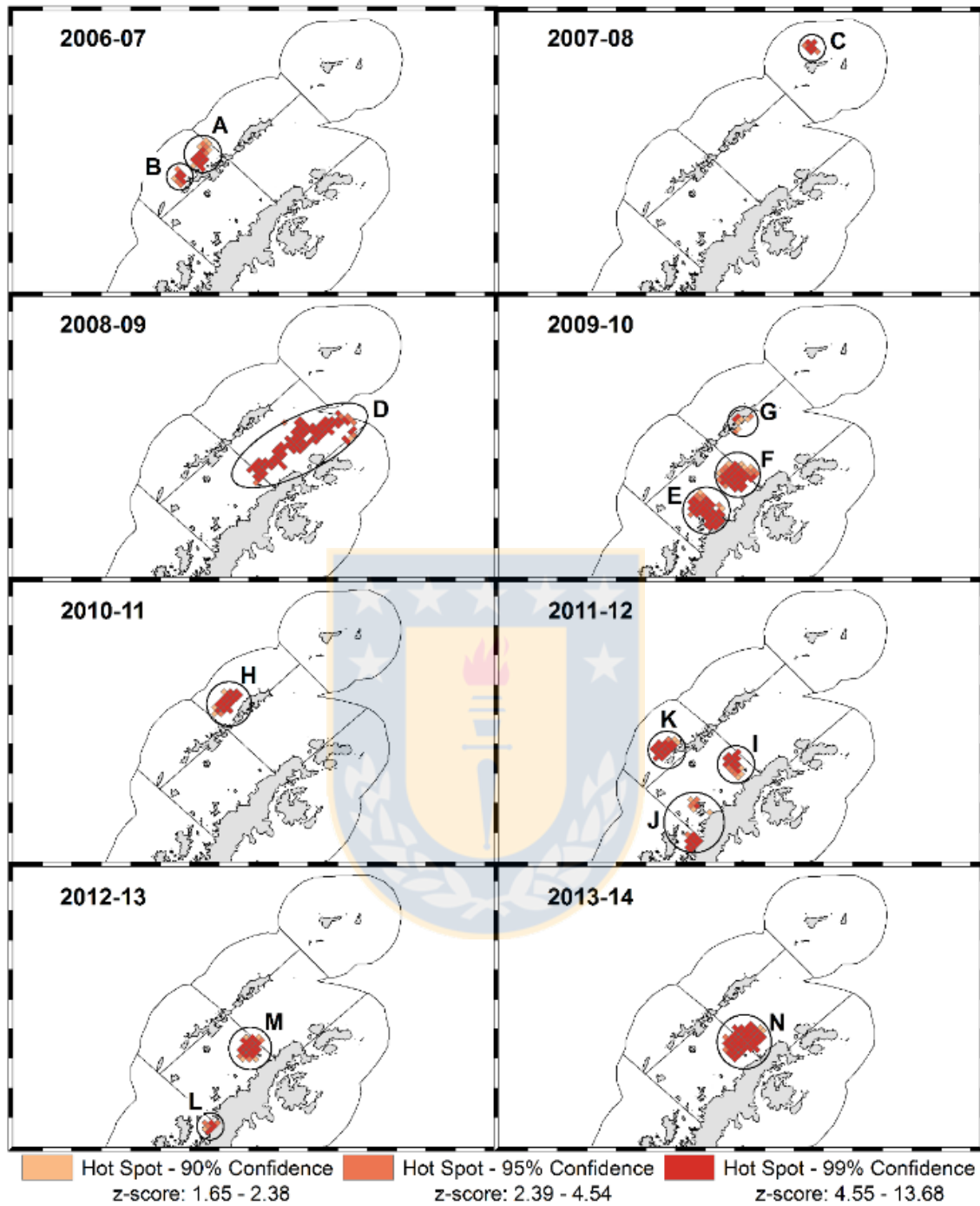


Figure 2: Fishing hotspots (FHs) identified for CCAMLR fishing seasons 2006-07 through 2013-14. Letter indicates hotspot identifier as indicated in Table 1.

Source: Own elaboration.

Intra-seasonal spatial pattern

The identified fishing hotspots represent the areas with highest accumulated catch over the fishing season, however, their spatial location and persistence was strongly influenced by the intraseasonal variability of vessel movement between fishing sectors. We represented this movement by tracking the cumulative catch in 10 day-periods, along a NE-SW axis across the South Shetland Islands, dividing the study area in northern (Drake) and south (Bransfield) sector (Figure 1 and 3).

Seasons 2006-07, 2007-08, 2010-11 share a similar pattern dominated by catches only in the Drake sector and limited to the period between December and May. Oppositely, in seasons 2008-09, 2012-13 and 2013-14 the pattern showed marginal catches in the Drake sector at the beginning of season, and a shift of the fleet toward the Bransfield sector, where practically they got all the catch for the season. In this case, catches were the highest among the analyzed seasons with the 2012-13 season completing six months' of continued fishing operations, from January to June. The season 2009-10 is a bit different from other seasons. Despite having much of catches in the Bransfield sector, there was a shift in catches towards the Drake sector in mid-season (May), returning later again to the Bransfield sector. Finally, another particular case is season 2011-12, with catches that begin in December in the Bransfield sector, and since mid-February, continue simultaneously both in Bransfield and Drake sectors (Figure 3).

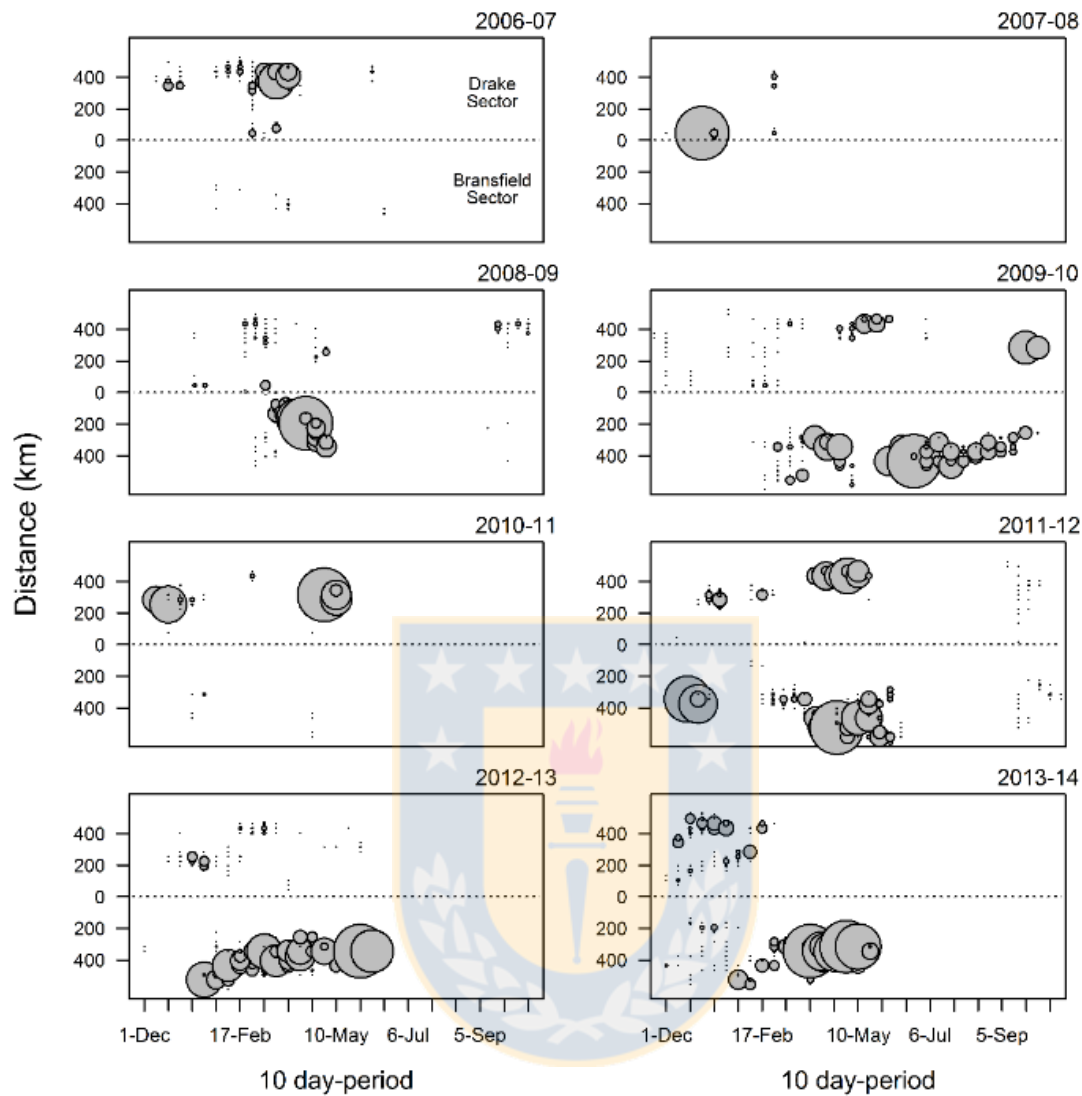


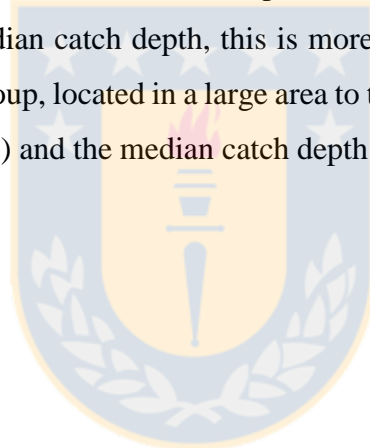
Figure 3: Cumulative catch by 10 day periods depicted as geographical distance along the Drake and Bransfield sectors (as described in Figure 1).

Source: Own elaboration.

Operational aspects

Two fishing techniques were used by trawlers during fishing operations, with relatively equal representation within fishing hotspots throughout the analysed fishing seasons: the traditional and the continuous trawling systems (Kawaguchi and Candy, 2009). Depth range of catches was 2-395 m, with 50% of catches being taken between 20 and 95 m, being similar between fishing gear within each hotspots. The main differences in the depth of 50% of catches are

among fishing sectors evaluated. Fishing hotspots located in the Drake sector were dominated by the operation of traditional trawling system. In fishing hotspots A, B, H and K, the traditional system yielded 100% of the catch sharing the location on Drake sector, and show that 50% of catches is taken in between 55 and 75m. An exception was fishing hospot C, located off Elephant Island, where the continuous system accounted for over 90% of catches and catch depth was shallower, with 50% of catches being at 50m. By contrast, fishing hotspots in the Bransfield sector were similarly exploited by the traditional and continuos trawling systems. The main fishing hotspots located in the center of the Bransfield Strait (E, F, I, M and N) were similarly exploited by both fishing systems, with 50% of catches taken in a depth range between 40 and 95 m. Particulary, the fishing hotspot N, which involves a place with the highest catches among all fishing hotspots (Table 1), is used mainly by vessels using traditional trawling system. Unlike other hotspots dominated by the traditional system that tend to have a deeper median catch depth, this is more superficial (45 m). The fishing hotspot D is also part of this group, located in a large area to the north of the Bransfield Strait, near Joinville Islands (Figure 2) and the median catch depth was moderately deeper, with 60 m (Figure 4).



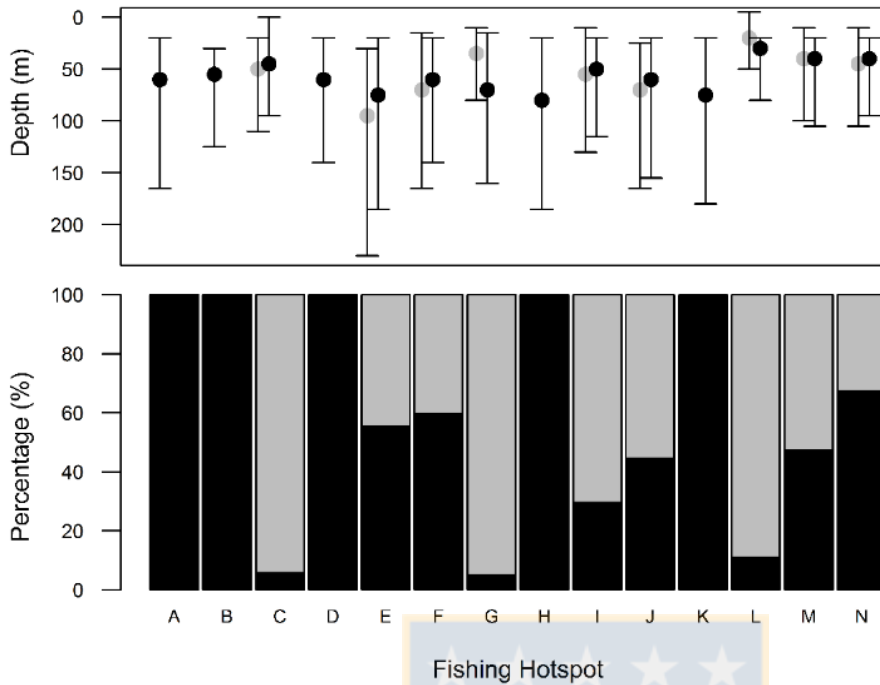


Figure 4: Top panel shows vertical distribution of catch: median depth (point), 25% (upper bars) and 75% (lower bars) percentiles. Bottom panel shows percentage of catches taken by traditional (black) and continuous (gray) fishing system.

Source: Own elaboration.

Discussion

Location and persistence of fishing hotspots

Analysis of the krill fishery during recent years 2006 to 2014 reveals a major shift in the spatial and temporal activity of the fleet compared to previous decades (see Kawaguchi *et al.*, 2006). From 1980 to 2003, the fleet operating in CCAMLR subarea 48.1 concentrated around Elephant Island and north off Livingstone and King George Islands, with some minor catches within the Bransfield Strait in 1999/2000 (Kawaguchi *et al.*, 2006). In the period analyzed here, the fleet was operating continuously in the Drake Passage area off Elephant and South Shetland Islands, but their relative importance has diminished. By contrast, in seasons 2008/09, 2009/10, 2011/12, 2012/13 and 2013/14, fishing hotspots were located mainly in the Bransfield Strait and were coincidental with those years when the total precautionary catch limit was reached (Table 1, Figure 2).

High catches recorded in recent years were the result of a learning process of the fleet of areas with high and persistent catches, a higher aggregation of the fleet and an extended fishing season thanks to a reduced sea-ice cover (Piñones and Fedorov, 2016). Fishing vessels are congregating in greater numbers (Figure 4) in small areas – fishing hotspots (Figure 2) – and from summer through winter, allowing for 3 to 5 months of continuous fishing (Figure 3). Furthermore, the location of fishing hotspots persisted during four of the last five seasons (2009/10, 2011/12, 2012/13, 2013/14), particularly the FHs located in the center of the Bransfield Strait (fishing hotspots F, I, M and N; Figure 2), indicative of a learning curve by the fishing fleet on the location of fishable krill swarms.

The fleet has maintained its operation on the northern sector during summer months (Kawaguchi *et al.*, 2006), but it has also consolidated a winter activity that has provided the greatest catches of the season. This extension in the fishing season was coupled with the use of the Bransfield Strait as the main fishing area, and secondarily, the appearance of fishing hotspots in the Gerlache Strait and a minor number of cells off Brabant Island during seasons 2009-10, 2011-12 and 2012-13, are a novel finding and indicates the fleet's southern expansion. Both winter expansion with persistent catches in May and June, and the southern expansion of the fleet with persistent catches in areas never reported before, is the result of the process of gradual reduction of sea-ice cover in the West Antarctic Peninsula, which has allowed a great accessibility of the stock of krill to the fishing fleet (Kawaguchi and Nicol, 2009). Current trends in sea-ice cover and duration suggest that this pattern will continue (Piñones and Fedorov, 2016).

Fishable biomass of krill

The concentration of fishing operations is not an isolated process within the world-wide fisheries dynamics. It is quite common that fishing fleets concentrate in delimited areas, following fishermen's knowledge and previous experiences about zones with favorable environmental conditions and high yields (Russo *et al.*, 2013). Particularly, trawlers need dense aggregations of krill to operate optimally (Kawaguchi and Nicol, 2007), and thus fishermen opt for the strategy of temporarily keep fishing in areas with high density of krill, operating continually until yields decline. Both factors justify the assumption that each fishing hotspot reflects the location of areas with high and persistent fishable biomass of krill, maintaining intense catches. These locations have an average of 1956 km² (range: 648-4212

km²), or a radius of 25 km, to get a highly profitable catch density (>10 ton·km⁻²). As the overall catches rise and approach CCAMLR's precautionary limits, the fleet tends to increase catch densities, reflecting a new state of the fishery, characterized by a stable and enduring use of fishing hotspots.

The fleet could be considered as one more predator in the extensive list of krill-dependent predators that inhabit the Antarctic ecosystems. The fishery dependence on large aggregations of krill to achieve optimum performance (Kawaguchi and Nicol, 2007) determines that the locations of fishing hotspots are largely dictated by the local krill density (Kawaguchi and Nicol, 2009). This pattern appears to be similar to the dynamics of foraging movement of humpback whales, which moves or remains in an area according to the abundance of krill, keeping always close to the largest krill swarms (Nowacek *et al.*, 2011; Curtice *et al.*, 2015). Movement of whales has been proposed as an indicator of overall distribution and movement pattern of high densities of krill (Curtice *et al.*, 2015); likewise, the fishing hotspots identified in this paper provide great information about the location and temporal persistence of fishable biomass of krill.

The identification of fishing hotspots open the possibility of analyzing catch and effort data under the spatial and temporal scales at which the fleets actually operates and not under a regional context that has proved to be inappropriate (Kawaguchi and Candy, 2009) to assess the variability in density and abundance of the krill population.

The catch per unit effort (CPUE) based on fleet catch and effort data, widely used as an indicator of relative abundance of a target resource (Maunder *et al.*, 2006), has been questioned when applied to the krill fishery (Kawaguchi and Candy, 2009). However, as was indicated by Atkinson *et al.* (2012), a careful analysis of CPUE trends based on spatially explicit methods and applied at the right scale, such as the fishing hotspots presented in this work, could favor its use as an indicator of local relative abundance, especially, given the lack of direct information on the abundance of krill (Flores *et al.*, 2012).

Potential impact on the ecosystem

Fishing grounds are entities emerging from the pattern depicted by fishermen behavior at a given spatial and temporal reference scale. They can be identified by using the concept of spatio-temporal autocorrelation of the fishing pressure (Russo *et al.*, 2013), which many times is evaluated according to the distribution of fishing effort (Stelzenmuller *et al.*, 2008;

Piet and Hintzen, 2012; Probst *et al.*, 2013). Challenging this classic approach, we consider fishing pressure as areas that yield high levels of catch, building hotspot analysis by using the cumulative catch, assuming that a high magnitude of this indicator might affect the availability of krill to natural predators. Additionally we assess the level of temporal persistence, recognizing that this factor has been neglected when identifying hotspots (Santora and Viet, 2013), but is likely a key indicator to determine the effect of the fishery on the krill population.

The renewal of krill population and sustenance of sufficient biomass for feeding natural predators are key objectives that drive the operation of CCAMLR (Constable and Nicol, 2002; Plagányi and Butterworth, 2012). In this sense, the Western Antarctic Peninsula plays a key role in the population dynamics of krill, being a significant area for krill spawning and recruitment, and sustaining important foraging hotspots of krill predators, including marine birds and mammals (Alonzo *et al.*, 2003; Hewitt *et al.*, 2004b; Santora *et al.*, 2010; Santora and Viet, 2013; Hinke *et al.*, 2014). A major challenge in the management of the krill fishery is to avoid potential impacts on dependent species due to local depletion (Constable 2011; Watters *et al.*, 2013). The current lack of updated estimates of krill biomass and predators' demand for krill make it extremely difficult to assess potential competition between fishery and predators, but the likelihood of this competition is high (Watters *et al.*, 2013). Also crucial, krill are behaviorally complex, with high social interaction, densely packed and highly polarized schools (Hamner and Hamner, 2000). The operation of setting and hauling a net made by the vessels may break the aggregative dynamics of schools (Dean *et al.*, 2012), and the lack of dense patches may affect the foraging patterns of dependent predators.

The Bransfield Strait is a semi-closed system 350 km long and 100 km wide, with a cyclonic flow pattern (Savidge and Amft, 2009) composed of a southwest-northeast direction current (Bransfield Current) near the South Shetland Islands, carrying waters from the Bellingshausen Sea towards the Elephant Island, and a counter-current emerging from the Weddell Sea, upon the Antarctic Peninsula shelf (Huneke *et al.*, 2016). These physical processes are influenced by the convoluted coastline (Nicol, 2006) and complex bathymetry of the strait (Huneke *et al.*, 2016), favoring retention and concentration of large biomass of krill recruits <40 mm (Santora *et al.*, 2010, Siegel *et al.*, 2013). The main fishing hotspots in recent seasons matches with these areas of high recruits, being able to affect population

renewal processes, which are highly variable between seasons. Also, the location of this fishing hotspots matches the location of the foraging areas of chinstrap and Gentoo penguins (Miller *et al.*, 2010, Kokubun *et al.*, 2010), numerous species of flying seabirds (Santora and Viet, 2013) and high density hotspots of humpback whale sightings (Santora and Viet, 2013; Herr *et al.*, 2016). All these predators use the Bransfield Strait as foraging ground, preying on medium-size krill that resides there (Santora *et al.*, 2010). Further south, the Gerlache Strait is the last area on the west Antarctic Peninsula to be covered with sea ice, allowing Humpback whales to access krill swarms until June, favoring a long foraging period (Curtice *et al.*, 2015). The recent fishing activity described here on the Gerlache Strait raise concerns about the impact on the local abundance of krill in this place and the associated foraging activity of Humpback whales.

Management implications

During the last decades, important efforts have been made to find the best way for allocating the precautionary catch limit. For the western Antarctic Peninsula, eight small-scale management units (SSMUs) were created as an option that considers the scale of interaction between the standing stock of krill, natural predators and fishery (Hewitt *et al.*, 2004b, Figure 1), although they have not yet been adopted as CCAMLR conservation measures (Nicol *et al.*, 2012; Grant *et al.*, 2013). Nonetheless, noting the location and dimension of fishing hotspots obtained in this work, the management scale behind the SSMUs is currently not pertinent. In the fishing seasons 2012/13 and 2013/14 the main hotspot was in the middle of the APBSE and APBSW (Hewitt *et al.*, 2004b, Figure 1; this paper, Figure 2), showing that both SSMUs proposals from 2004 need a restructuring. The location of fishing hotspots should be considered in this restructuring and their monitoring may contribute to the spatial management of the fishery, which becomes relevant considering the renovated and growing interest in krill-derived products (Foster *et al.*, 2011), which favours an increase in the fleet size, pushing for an increase in the seasonal catch limits.

Acknowledgments

The principal author thanks the Dirección de Postgrado of the Universidad de Concepción (UdeC) for providing financial support for his graduate work. The authors thank the

Secretariat of CCAMLR for providing the krill fishery data, to Mr. Marcelo Gonzalez (UdeC) for his advice on the use of geographic information tools and to Dr. Luis Cubillos (UdeC) for his comments that improved this manuscript.

References

Ainley, D. and D. Pauly. 2014. Fishing down the food web of the Antarctic continental shelf and slope. *Polar record* 50(252): 92-107

Alonzo, S., Switzer, P. and M. Mangel. 2003. An ecosystem-based approach to management: using individual behaviour to predict the indirect effects of Antarctic krill fisheries on penguin foraging. *Journal of Applied Ecology* 40: 692-702

Anselin, L. 1995. Local Indicators of Spatial Association - LISA. *Geographical Analysis* 27(2): 93-115

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. and P. Rothery. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432: 100-103

Atkinson, A., Nicol, S., Kawaguchi, S., Pakhomov, E., Quetin, L., Ross, R., Hill, S., Reiss, C. and V. Siegel. 2012. Fitting *Euphausia superba* into southern ocean foodweb models: a review of data sources and their limitations

Constable, A., de la Mare, K., Agnew, D., Everson, I. and D. Miller. 2000. Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCRVMA). *ICES Journal of Marine Science*, 57: 778-791

Constable, A. and S. Nicol. 2002. Defining smaller-scale management units to further develop the ecosystem approach in managing large-scale pelagic krill fisheries in Antarctica. *CCRVMA Science* 9: 117-131;

Constable, A.J. 2011. Lessons from CCAMLR on the implementation of the ecosystem approach to managing fisheries. *Fish and Fisheries* DOI: 10.1111/j.1467-2979.2011.00410.x

Cornejo-Donoso, J. and T. Antezana. 2008. Preliminary trophic model of the Antarctic Peninsula Ecosystem (Sub-area CCAMLR 48.1). *Ecological Modelling* 218: 1-17

Curtice, C., Johnston, D., Ducklow, H., Gales, N., Halpin, P. and A. Friedlaender. 2015. Modeling the spatial and temporal dynamics of foraging movements of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the Western Antarctic Peninsula. *Movement Ecology* 3:13. doi:10.1186/s40462-015-0041-x

Dean, M., Hoffman, W. and M. Armstrong. 2012. Disruption of an Atlantic Cod Spawning Aggregation Resulting from the Opening of a Directed Gill-Net Fishery. *North American Journal of Fisheries Management* 32(1): 124-134

Flores, H., Atkinson, A., Kawaguchi, S., Krafft, B., Milinevsky, G., Nicol, S., Reiss, C., Tarling, G., Werner, R., Bravo Rebolledo, E., Cirelli, V., Cuzin-Roudy, J., Fielding, S., Groeneveld, J., Haraldsson, M., Lombana, A., Marschoff, E., Meyer, B., Pakhomov, E., Rombolá, E., Schmidt, K., Siegel, V., Teschke, M., Tonkes, H., Toullec, J., Trathan, P., Tremblay, N., Van de Putte, A., van Franeker, J. and T. Werner. 2012. Impact of climate change on Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series* 458: 1-19

Foster, J., Nicol, S. and S. Kawaguchi. 2011. The use of patent databases to predict trends in the krill fishery. *CCAMLR Science* 18:135-144

Getis, A. and K. Ord. 1992. The analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis* 24: 189-206

Grant, S., Hill, S. and P. Fretwell. 2013. Spatial distribution of management measures, Antarctic krill catch and southern ocean bioregions: implications for conservation planning. *CCAMLR Science* 20: 1-19

Hamner, W. and P. Hamner. 2000. Behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*) schooling, foraging, and antipredatory behavior. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 57(Suppl. 3): 192-202

Hewitt, R., Watkins, J., Naganobu, M., Sushind, V., Brierley, A., Demer, D., Kasatkina, S., Takao, S., Goss, C., Malysko, A., Brandon, M., Kawaguchi, S., Sielgel, V., Trathan, P., Emery, J., Everson, I. and D. Miller. 2004a. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. Deep-Sea Research II 51: 1215-1236

Hewitt, R., Watters, G., Trathan, P., Croxall, J., Goebel, M., Ramm, D., Reid, K., Trivelpiece, W. and J. Watkins. 2004b. Options for allocating the precautionary catch limit of krill among small-scale management units in the Scotia Sea. CCRVMA Science 11: 81-97

Herr, H., Viquerat, S., Siegel, V., Kock, K., Dorschel, B., Huneke, W., Bracher, A., Schroder, M. and J. Gutt. 2016. Horizontal niche partitioning of humpback and fin whales around the West Antarctic Peninsula: evidence from a concurrent whale and krill survey. Polar Biology 39: 799-818

Hill, S., Trathan, P. and D. Agnew. 2009. The risk to fishery performance associated with spatially resolved management of Antarctic krill (*Euphausia superba*) harvesting. ICES Journal of Marine Science 66: 2148-2154

Hinke, J., Goebel, M., Santos, M., Trathan, P., Trivelpiece, W. and G. Watters. 2014. Spatial overlap of krill-dependent predators and krill fishery catches and a proposal for subdivision of catch limits in Subarea 48.1. EMM-14-36. SCCRVMA 22 pp

Huneke, W., Huhn, O. and M. Schröder. 2016. Water masses in the Bransfield Strait and adjacent seas, austral summer 2013. Polar Biology 39: 789-798

Jalali, M., Ierodiaconou, D., Gorfine, H., Monk, J. and A. Rattray. 2015. Exploring Spatiotemporal Trends in Commercial Fishing Effort of an Abalone Fishing Zone: A GIS-Based Hotspot Model. PLoS ONE 10(5): e0122995. doi:10.1371/journal.pone.0122995

Kawaguchi, S., Nicol, S., Taki, K., and M. Naganobu. 2006. Fishing ground selection in the Antarctic krill fishery: trends in patterns across years, seasons and nations. CCRVMA Science 13: 117-141

Kawaguchi, S. and S. Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. Antarctic Science 19(2): 219-230

Kawaguchi, S. and S. Nicol. 2009. Direct effects of climate change on the Antarctic krill fishery. Fisheries Management and Ecology 16: 424-427

Kawaguchi, S. and S. Candy. 2009. Quantifying movement behaviour of vessels in the Antarctic krill fishery. CCRVMA Science 16: 131-148

Kokubun, N., Takahashi, A., Mori, Y., Watanabe, S., and H. Shin. 2010. Comparison of diving behavior and foraging habitat use between chinstrap and Gentoo penguins breeding in the South Shetland Islands, Antarctica. Marine Biology 157: 811-825

Maunder, M., Sibert, J., Fonteneau, A., Hampton, J., Kleiber, P. and S. Harley. 2006. Interpreting catch per unit effort data to assess the status of individual stocks and communities. ICES Journal of Marine Science 63: 1373-1385

Miller, A. K., Kappes, M. A., Trivelpiece, S. G. and W. Z. Trivelpiece. 2010. Foraging-niche separation of breeding Gentoo and Chinstrap penguins, South Shetland Islands, Antarctica. Condor 112 (4): 683-695.

Nicol, S. and J. Foster. 2003. Recent trends in the fishery for Antarctic krill. *Aquatic Living Resources* 16(1): 42-45

Nicol, S. 2006. Krill, Currents and Sea Ice: *Euphausia superba* and Its changing Environment. *BioScience* 56 (2): 111-120

Nicol, S., Foster, J. and S. Kawaguchi. 2012. The fishery for Antarctic krill – recent developments. *Fish and Fisheries* 13: 30-40

Nowacek, D., Friedlaender, A., Halpin, P., Hazen, E., Johnston, D., Read, A., Espinasse, B., Zhou, M. and Y. Zhu. 2011. Super-Aggregations of krill and Humpback Whales in Wilhelmina Bay, Antarctic Peninsula. *PLoS ONE* 6(4): e19173. doi:10.1371/journal.pone.0019173

Ord, J. and A. Getis. 1995. Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis* 27: 286-306

Piet, G. and N. Hintzen. 2012. Indicators of fishing pressure and seafloor integrity. *ICES Journal of Marine Science* 69(10): 1850-1858

Piñones A. and A.V. Fedorov. 2016. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century. *Geophysical Research Letters* 43, doi:10.1002/2016GL069656.

Plagányi, E. and D. Butterworth. 2012. The Scotia Sea krill fishery and its possible impacts on dependent predators: modeling localized depletion of prey. *Ecological Applications* 22(3): 748-761

Probst, W., Kloppmann, M. and G. Kraus. 2013. Indicator-based status assessment of commercial fish species in the North Sea according to the EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD). *ICES Journal of Marine Science* 70(3): 694-706

Russo, T., Parisi, A. and S. Cataudella. 2013. Spatial indicators of fishing pressure: Preliminary analyses and possible developments. *Ecological Indicators* 26: 141-153

Santora, J., Reiss, C., Loeb, V. and R. Viet. 2010. Spatial association between hotspots of baleen whales and demographic patterns of Antarctic krill *Euphausia superba* suggests size-dependent predation. *Marine Ecology Progress Series* 405: 255-269

Santora, J. and R. Veit. 2013. Spatio-temporal persistence of top predator hotspots near the Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series* 487: 287-304

Savidge, D. and J. Amft. 2009. Circulation on the West Antarctic Peninsula derived from 6 years of shipboard ADCP transects. *Deep-Sea Research I* 56: 1633-1655

Schmidt, K., Atkinson, A., Pond, D. and L. Ireland. 2014. Feeding and overwintering of Antarctic krill across its major habitats: The role of sea ice cover, water depth, and phytoplankton abundance. *Limnology and Oceanography* 59(1): 17-36

Siegel, V., Trathan, P., Emery, J., Everson, I. and D. Miller. 2004. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep Sea Research* 51: 1215 – 1236

Siegel, V., Reiss, C. S., Dietrich, K. S., Haraldsson, M. and G. Rohardt. 2013. Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) along the Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research I* 77: 63-74

Stelzenmüller, V., Maynou, F., Bernard, G., Cadiou, G., Camilleri, M., Crec'hriou, R., Criquet, G., Dimech, M., Esparza, O., Higgins, R., Lenfant, P. and A. Pérez-Ruzafa. 2008. Spatial assessment of fishing effort around European marine reserves: implications for successful fisheries management. *Marine Pollution Bulletin* 56(12): 2018-2026

Tovar- Sanchez, A., Duarte, C.M., Hernández-León, S. and S.A. Sañudo-Wilhelmy. 2007. Krill as a central node for iron cycling in the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters* 34 (11):L11601-doi:10.1029/2006GL029096

Watters, G., Hill, S., Hinke, J., Mathews, J. and K. Reid. 2013. Decision-making for ecosystem-based management: evaluating options for a krill fishery with an ecosystem dynamic model. *Ecological Applications* 23(4): 710-725 dynamic model. *Ecological Applications* 23(4): 710-725



CAPÍTULO II

Análisis de la CPUE a escala fina dentro de los *hotspots* de pesca de krill en la Península Antártica occidental



Resumen

El krill antártico es una de las especies más abundantes en los océanos del mundo. Es un componente clave para la trama trófica pelágica y el recurso objetivo de una de las pesquerías más importantes del Océano Austral. La flota pesquera que opera sobre este recurso desarrolla una estrategia de pesca basada en la búsqueda y explotación de concentraciones de krill de un tamaño que garantice abordó un nivel de producción adecuado. En este proceso, ante disminuciones importantes de los rendimientos de pesca, los capitanes se desplazan hacia zonas contiguas no explotadas, sin embargo, al no encontrar nuevas concentraciones, persisten y concentran sus capturas durante días, sobre las mismas concentraciones previamente explotadas. El impacto de esta persistencia espacio-temporal de las capturas es desconocido, sobre todo en sectores como el estrecho de Bransfield donde previamente no han existido remociones importantes de krill. El presente trabajo analiza las tendencias de los rendimientos de pesca (CPUE) para evaluar procesos de depleción local en una escala de *hotspots* pesqueros (HPs), en respuesta al comportamiento agregativo que exhibe la flota. Nuestros resultados indican que pocos HPs exhiben señales de depleción significativas, debido a que la flota opera sobre concentraciones de krill basadas en una resolución espacial menor a la evaluada a nivel de HPs. La CPUE nominal diaria de krill presenta un patrón basado en la formación de domos, los cuales se desarrollan en respuesta a desplazamientos diarios secuenciales de la flota que pueden generar eventos de revisita. Las fases descendentes (FD) de domos vinculados a procesos de revisita, pueden corresponder a una señal de agotamiento local de las concentraciones de krill. Las FDs motivan el desplazamiento de la flota hacia zonas contiguas, en búsqueda de nuevas concentraciones, que permiten mantener una CPUE alta, afectando la relación lineal entre la CPUE y la abundancia local a nivel de HPs. Desde la temporada 2008/09, las mayores capturas ocurren en el centro del estrecho de Bransfield, el cual gracias a una presencia interanual consistente de concentraciones de krill, se estructura como un sector clave para el funcionamiento actual de la pesquería.

Palabras claves: Krill antártico, depleción local, CPUE, variabilidad espacial, Península Antártica Occidental.

Abstract

Antarctic krill is one of the most abundant species in the world's oceans. It is a key component for the pelagic food webs and target resource for one the most important fishery in the Southern Ocean. The fishing fleet develops a fishing strategy based on search and exploitation of krill concentrations of sizes that guarantees an adequate level of production. In this process, when fishing yield decreases, skippers move to unexploited contiguous areas, however, if new concentrations are not found, they persist on previously exploited concentrations. The impact of this spatio-temporal persistence of catches is unknown, especially in the Bransfield Strait where no significant removals have been documented. The present work analyzes CPUE trends to evaluate local depletion processes to fishing *hotspot* (FH) scale, in response to the aggregative behavior exhibited by the fleet. Our results indicate that few FHs exhibit significant depletion signals, because the fleet operates on krill concentrations of smaller spatial dimensions than evaluated FHs scale. The daily nominal CPUE of krill presents a dome-shaped pattern, developed in response to sequential daily movements with re-towing events. The downward phase (DP) of domes with revisit events may correspond to a local krill depletion signal. The DPs motivate the fleet movement towards contiguous zones, searching new concentrations that allow maintain a high CPUE. At FHs scale, these movement affecting the linear relationship between the CPUE and the local krill abundance. Since the 2008/09 season, largest catches occur in the center of Bransfield Strait, where, thanks to a consistent year-to-year krill concentrations, is structured as a key sector for the current performance of the fishery.

Keyword: Antarctic krill, local depletion, CPUE, spatial variability, Western Antarctic Peninsula.

Introducción

El krill antártico es una de las especies más abundantes en los océanos mundiales (Atkinson *et al.*, 2009), que se caracteriza por formar densos cardúmenes y ser una fuente esencial de alimentación para numerosas especies de mamíferos marinos, aves y peces (Santora *et al.*, 2010; Santora y Viet, 2013; Hinke *et al.*, 2014), posicionándose como una especie clave para la trama trófica pelágica del océano austral (Atkinson *et al.*, 2012).

Esta especie es uno de los principales recursos marinos explotados en el océano austral. Las operaciones de pesca son realizadas desde los años 1970s, por una flota multi-nacional que en la década de 1980s alcanzó las máximas capturas con más de 400 mil toneladas por temporada. Durante las décadas 1990s y 2000s las capturas disminuyeron y se estabilizaron en torno a 100 mil toneladas por temporada, mientras que desde el año 2010 se ha observado un creciente interés en este recurso, lo cual ha determinado un aumento en el esfuerzo de pesca y capturas por sobre las 200 mil toneladas. Hasta la década de 1980s las capturas fueron circumpolares, con una fuerte explotación en el sector del océano Índico Sur; sin embargo, desde mediados de 1990s las capturas se han restringido al sur del océano Atlántico Sur, en la denominada área estadística 48, compuesta por la Península Antártica e islas Shetland del Sur (48.1), islas Orcadas del sur (48.2) e islas Georgias del Sur (48.3) (Nicol *et al.*, 2012; Nicol y Foster, 2016).

La pesquería de krill es administrada por la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), quien ha establecido límites de captura precautorios (LCP) que buscan garantizar un nivel suficiente de escape de krill, para favorecer tanto su renovación poblacional como satisfacer la demanda trófica de los depredadores naturales (Constable *et al.*, 2000; Grant *et al.*, 2013). El LCP asciende a 6 millones de toneladas, sin embargo dada la alta incertidumbre en torno a las estimaciones de abundancia de krill, se acordó interinamente establecer un nivel umbral (*trigger level*) de 620.000 toneladas distribuido entre cuatro sub-áreas de manejo (48.1, 48.2, 48.3 y 48.4) (Constable *et al.*, 2000). El LCP vigente fue calculado como una fracción de la biomasa de krill a partir de la estimación de abundancia obtenida del crucero de evaluación sinóptica del año 2000 (Hewitt *et al.*, 2004). El uso de un nivel constante de explotación es contrastante con la alta variabilidad interanual del reclutamiento y abundancia de krill (Reiss *et al.*, 2008), haciendo altamente probable que las estimaciones de abundancia del crucero del año 2000

estén lejos de reflejar la condición actual del stock y la cantidad de krill permitida para ser capturada por la pesquería (Hill *et al.* 2016), sobre todo cuando existen fuertes sugerencias de una disminución a largo plazo del stock de krill producto de cambios ambientales que afectan su desarrollo poblacional (Atkinson *et al.*, 2004; Flores *et al.*, 2012; Piñones y Fedorov, 2016). Por otra parte, la actual subdivisión de las capturas entre sub-áreas (48.1, 48.2, 48.3 y 48.4) parece insuficiente para evitar la concentración de la flota en determinados sectores, dado que estas sub-áreas representan una escala espacial superior a la escala del funcionamiento de la flota (Grant *et al.*, 2013). Estudios que indican el potencial impacto local de la flota de pesca sobre la abundancia de krill (Plagányi y Butterworth, 2012; Grant *et al.*, 2013; Watters *et al.*, 2013), han evaluado opciones de distribución de la captura entre estructuras espaciales de mayor resolución, por ejemplo SSMUs o grupos de SSMUs, con la intención de minimizar el riesgo de disminuciones locales de krill.

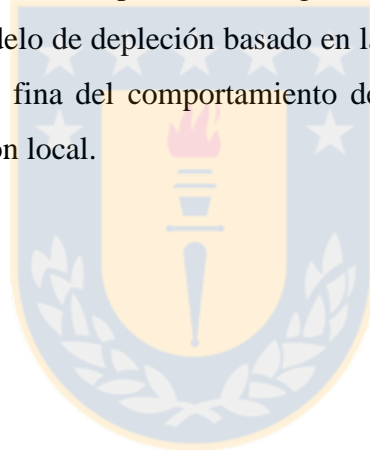
Históricamente la pesquería se ha desarrollado acorde a la búsqueda y explotación de agregaciones de un tamaño que garantice abordó un nivel de producción adecuado (Kawaguchi y Nicol, 2007). Bajo esta estrategia y ante una situación de disminución considerable en los rendimientos de pesca, los capitanes se desplazan hacia nuevas zonas contiguas; sin embargo, de no encontrarse nuevas concentraciones, la flota revisita zonas ya explotadas, pudiendo operar persistentemente sobre las mismas concentraciones durante días (Sushin, 1998).

Al oeste de la Península Antártica (OPA) la flota ha desarrollado en la última década una: i) expansión espacial hacia el sur, obteniendo gran parte de las capturas al interior del estrecho de Bransfield, ii) una expansión temporal, extendiendo la temporada de pesca desde el verano hasta el periodo invernal y iii) una concentración local de las capturas sobre *hotspots* pesqueros (HPs), que por ejemplo, en la temporada 2013/14 (HP-N), proporcionaron el 58% de las capturas en 4200 km² (Santa Cruz *et al.*, en revisión).

Las características y el impacto de este comportamiento agregativo de la flota son desconocidos, sobre todo en sectores como el estrecho de Bransfield donde previamente no han existido capturas importantes. El agotamiento local es un proceso reconocido pero aun no evaluado, dada la falta de antecedentes actualizados sobre abundancia de krill en el OPA. La información proveniente de la pesquería de krill se ha vuelto relevante para evaluar su abundancia (Godo *et al.*, 2014). Los datos de captura y esfuerzo pueden ser utilizados en este

propósito, pudiendo proporcionar información sobre la abundancia local del stock e información sobre señales de la respuesta del stock ante la presión de pesca. A pesar del cuestionamiento sobre el uso de la CPUE para este propósito, debido a restricciones operacionales que dificultan el uso de la CPUE como un indicador de abundancia relativa (Butterworth, 1989; Kawaguchi y Candy, 2009), un análisis a escala fina de la CPUE basado en series temporales relacionadas a la escala de operación de la flota, permitiría proporcionar antecedentes importantes sobre la dinámica espacial y consistencia temporal de las abundancias locales explotables de krill (Atkinson *et al.*, 2012).

Los *hotspots* pesqueros descritos para la pesquería de krill en la OPA (Santa Cruz *et al.*, en revisión) representan zonas de concentración y persistencia temporal de las capturas y están basados en la escala de operación de la flota, por lo que son propuestos como una nueva alternativa para la evaluación local de procesos de agotamiento local. El objetivo de este trabajo es implementar un modelo de depleción basado en la extensión temporal de los HPs y realizar un análisis a escala fina del comportamiento de la CPUE nominal diaria para detectar evidencias de depleción local.



Materiales y métodos

Datos de captura y esfuerzo

En este trabajo se analizan los registros oficiales de captura y esfuerzo de la pesquería de arrastre de krill en el área 48.1 (Oeste de la Península Antártica, OPA). Estos reportes presentan una resolución lance-a-lance, conteniendo información sobre la fecha, captura (ton), esfuerzo (horas de arrastre), ubicación geográfica (latitud y longitud) y tipo de lance (tradicional o continuo) realizado. En el caso de los lances de arrastre continuo, el registro de captura y esfuerzo fue reportado como la captura cada dos horas de arrastre. Todos los lances con capturas superiores a 100 toneladas o duración mayor a 500 minutos fueron descartados del análisis, ya que actualmente se encuentran bajo un proceso de análisis independiente impulsado por la secretaria de la CCAMLR para asegurar su calidad (WG-EMM-16/10).

Análisis de depleción local

Dada la variabilidad espacial y temporal de las operaciones de pesca de una determina flota, no toda la data de captura y esfuerzo es apropiada para implementar el modelo de depleción (Parkes *et al.*, 1996). La data utilizada en este análisis consistió en series de tiempo basadas en la extensión temporal de los HPs descritos por Santa Cruz *et al.* (en revisión). Se asumió que dada la alta concentración de las capturas se generan tasas de capturas significativas que determinan una tendencia negativa de la CPUE en función de la captura acumulada (Hilborn y Walters, 1992). Para este propósito se utilizó un modelo de depleción (Leslie y Davis 1939), el cual se estructura considerando que la abundancia en el tiempo t (N_t) es el resultado de la abundancia inicial (N_0) menos la captura acumulada (K_{t-1}), según la ecuación:

$$N_t = N_0 - K_{t-1} \quad , \quad (\text{ec. 1})$$

Donde K_{t-1} es:

$$K_{t-1} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_{t-1} = \sum_{i=1}^{t-1} C_i \quad , \quad (\text{ec. 2})$$

Donde C_i es la captura en el i -ésimo evento de captura. Para este modelo se asumió que ante una fuerte intensidad de captura, una alta persistencia temporal de la flota al interior

de los HPs y un reducido reemplazo poblacional de krill, existe una relación proporcional entre la tasa de captura (CPUE) y la abundancia de las concentraciones explotables de krill, lo cual queda definido como:

$$\frac{C_t}{f_t} = q * N_t \quad (\text{ec. 3})$$

$$\frac{C_t}{f_t} = q(N_0 - K_{t-1}) \quad (\text{ec. 4})$$

$$\frac{C_t}{f_t} = CPUE_t = q * N_0 - q * K_{t-1} \quad (\text{ec. 5})$$

Donde f_t es el nivel de esfuerzo expresado en horas de arrastre para el día t y q es una constante de proporcionalidad o también llamado coeficiente de capturabilidad. La ecuación 5 es un modelo de regresión lineal en el cual C_t/F_t es la variable respuesta, K_{t-1} es la variable explicativa, q es una constante vinculada al valor de la pendiente y $q*N_0$ una constante vinculada al intercepto. La captura por unidad de esfuerzo fue estimada de forma nominal en una escala diaria, quedando definida como la suma total de toneladas sobre suma total de horas arrastre en un día de operación (ton/hr/día).

Seguimiento espacial de la CPUE

Mediante inspección visual se analizó la tendencia de la CPUE nominal diaria en cada HPs. Nuestras observaciones preliminares permitieron evidenciar la existencia de un patrón repetitivo entre los HPs, en el cual la CPUE diaria presenta una estructura temporal tipo domo, estructurado de acuerdo a una fase de aumento (FA), luego estabilización (fase máxima, FM) y posterior fase descendente (FD) (Figura 1). Se asumió que cada domo termina cuando comienza la FA de un nuevo domo. Siguiendo este criterio, se dividió la data en sub-series de tiempo basadas en la extensión temporal de cada domo identificado. Estas sub-series fueron aisladas y ubicadas espacialmente para evaluar consistencia espacial de los domos o desplazamientos permanentes de la flota en el interior de cada HP. Los domos fueron caracterizados de acuerdo a su duración temporal (días), número de embarcaciones, captura

(toneladas) y un estadístico de diferencia porcentual entre la FM y el término de la FD para cuantificar la caída en la CPUE que determina el término del domo.

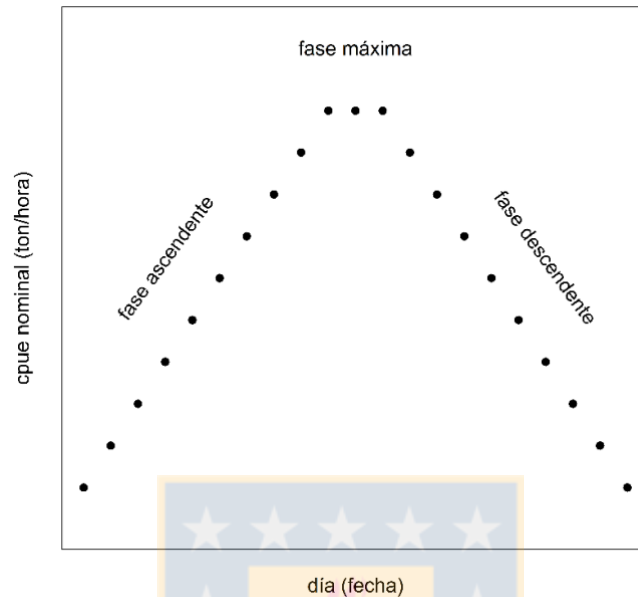


Figura 1: Esquema conceptual del comportamiento en forma de domo de la CPUE nominal diaria para la pesquería del krill antártico.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de Leslie fue implementado en el lenguaje de programación R (R Studio v1.0.44) utilizando el paquete de evaluación de stock FSA (Ogle, 2016). El trazado de mapas fue realizado en un programa de sistema de información geográfica (SIG).

Resultados

Series de depleción local

Las operaciones de pesca realizadas entre las temporadas 2006-07 a 2013-14 en la OPA están marcadas por una concentración de las capturas en catorce HPs (Figura 2, Capítulo I). La CPUE promedio diaria en cada HPs fluctuó entre 3.46 ton/hora (HP-C) y 20.11 ton/hora (HP-D). En las temporadas 2008-09 y 2009-10 los HPs D, E y F presentan los mayores valores de CPUE promedio, con 20.1, 19.8 y 18.4 ton/hora respectivamente, representando las primeras temporadas de pesca donde la flota concentró sus capturas al interior del estrecho de Bransfield. Entre la temporada 2010-11 y 2013-14 se encuentran dos HPs al norte de las SSI (H y K) y tres HPs en el centro del estrecho de Bransfield (I, M y N) con una CPUE diaria menor que fluctuó entre 8.84 y 13.05 ton/hora (Tabla 1).

Seis de los catorce HPs (A, C, D, F, I y M) presentaron pendientes significativas, siendo en cuatro de estos casos (HPs A, C, D y M) pendientes positivas sin evidencias significativas de depleción local y dos casos (HPs F e I) pendientes negativas que proporcionan señales significativas de depleción local (Figura 2, Tabla 1). En ocho HPs (B, E, G, H, J, L y N) las pendientes no presentan una tendencia significativa sin proporcionar información sobre depleción local. Los HPs con pendiente positiva A y C presentan una captura acumulada relativamente baja de 6508 y 1778 ton que podría explicar la ausencia de depleción local, sin embargo, en HPs con mayor captura acumulada como el HP-D con 17869 toneladas, tampoco se evidencia una señal de agotamiento significativo. Este HP corresponde al de mayor superficie con 8019 km², lo que favorecería la ausencia de un proceso de depleción local. El HP-M sostiene la segunda mayor captura acumulada con 63865 toneladas en sólo 2106 km², determinando la mayor densidad de captura con 30.3 ton/km², sin embargo exhibe una pendiente significativamente positiva, sin evidencias de depleción local.

Los únicos HPs que presentan pendientes negativas significativas corresponden a los HPs F e I. Ambos tienen la misma ubicación espacial, en el centro del estrecho de Bransfield, sosteniendo una captura acumulada relativamente alta de 33524 y 13454 toneladas respectivamente, pero con densidades de captura de 9.6 y 8.7 ton/km², que en términos comparativos es baja en relación a los HPs de mayor captura acumulada.

Tabla 1: Periodo de pesca, número de días efectivos de pesca (nde), captura acumulada (ca), pendiente (K) del modelo lineal de Leslie, significancia estadística (p) y CPUE promedio por *hotspot* pesquero.

HP	Periodo de pesca	nde	ca (ton)	K	p	CPUE promedio
A	20/12/2006 – 09/04/2007	40	6462	0.00245	p < 0.001	9.4
B	28/03/2007 - 04/04/2007	8	1539	0.00336	NS	9.8
C	27/12/2007 - 07/01/2008	12	1778	0.00124	p<0.01	3.4
D	29/03/2009 - 15/05/2009	44	17869	0.00067	p<0.01	20.1
E	28/04/2010 -10/10/2010	60	41570	-0.00009	NS	19.8
F	10/03/2010 – 18/09/2010	73	33524	-0.00036	p<0.01	18.4
G	18/09/2010 – 10/10/2010	21	12679	0.00124	NS	22.5
H	27/04/2011 – 17/05/2011	20	5112	-0.00048	NS	9.8
I	13/12/2011 – 10/04/2012	39	13454	-0.00039	p<0.01	7.6
J	18/04/2012 – 16/05/2012	29	11028	0.000067	NS	6.8
K	13/04/2012 – 07/06/2012	54	18505	-0.00005	NS	10.6
L	13/01/2013 – 12/02/2013	29	15105	0.00003	NS	8.8
M	16/02/2013 – 14/06/2013	103	63865	0.00015	p<0.001	10.5
N	24/02/2014 – 17/05/2014	83	84734	-0.00002	NS	13.0

Fuente: Elaboración propia.

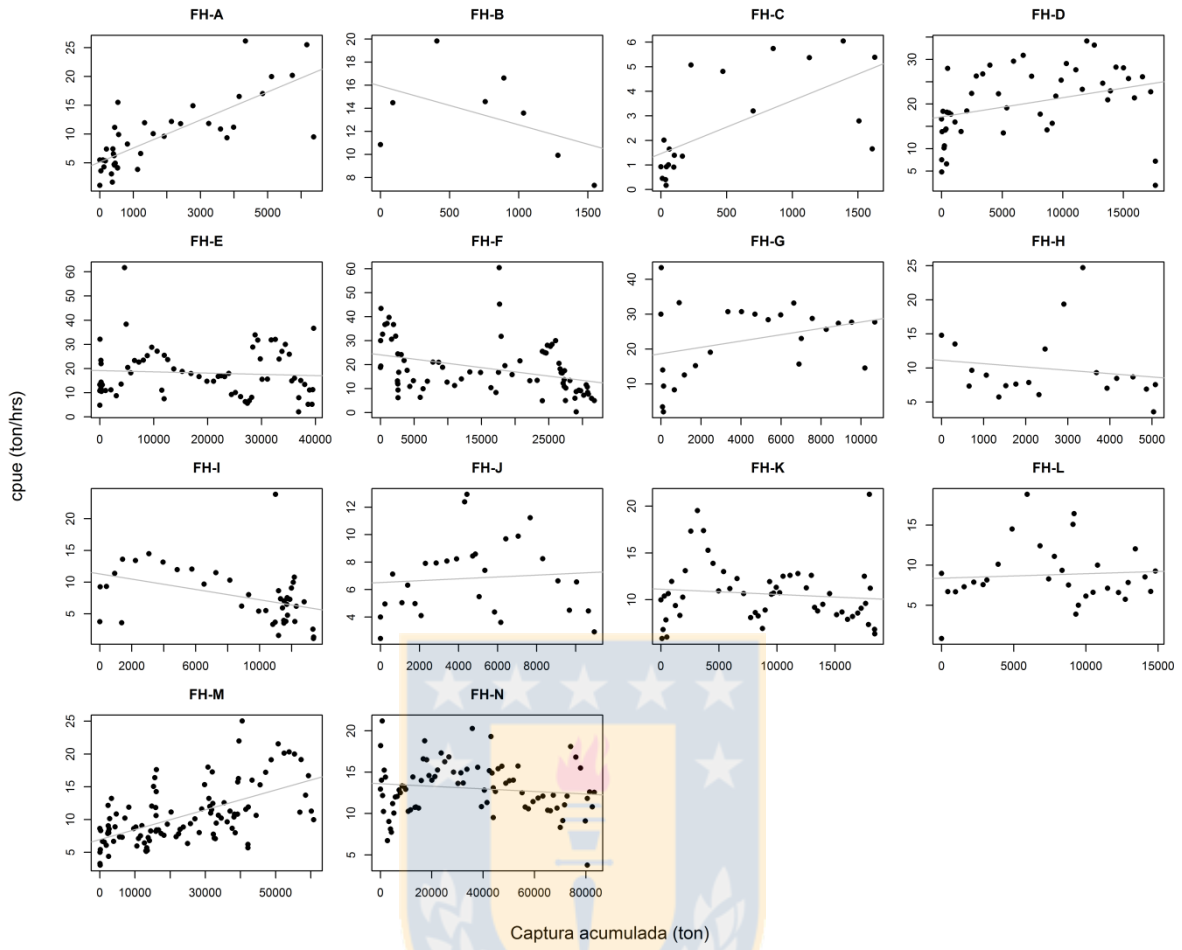


Figura 2: Ajuste del modelo de depleción para los catorce *hotspots* pesqueros de krill.

Fuente: Elaboración propia.

Dinámica espacial de la flota

El análisis visual de la tendencia diaria de la CPUE nominal permitió identificar que los rendimientos de pesca exhiben un patrón de comportamiento de tipo domo, que se estructuran de acuerdo a una FA, una FM y una FD, donde la CPUE disminuye gradualmente hasta alcanzar un valor mínimo (Figura 1). La ubicación de los lances de pesca que componen los domos identificados, muestran desplazamientos de la flota hacia zonas de pesca contiguas, cada vez que un domo alcanza su valor mínimo en la FD. La formación sucesiva de domos basados en desplazamientos secuenciales surge como un factor clave que permite a la flota obtener nuevas FM en sus rendimientos de pesca, determinando que el modelo de Leslie no proporcione señales de depleción local. Según la consistencia espacial de los domos y la eventual revisita a medida que avanza la temporada, hemos reconocido dos patrones de comportamiento de la flota: (i) domos con avance secuencial sin revisita y (ii) domos con avance secuencial con revisita hacia zonas contiguas previamente explotadas.

Domos con avance secuencial sin revisita

Los HPs A, D y H presentan un patrón de desarrollo de domos vinculados a un avance secuencial de la flota sin eventos de revisita. En el HP-A y D la tendencia lineal del modelo de Leslie arrojó una pendiente positiva significativa, donde la CPUE fue aumentando a pesar de experimentar una acumulación de las capturas. Al observar la CPUE nominal diaria se evidencia la formación de seis domos en el HP-A y cinco domos en el HP-D, todos bien definidos. Estos domos se desarrollan de acuerdo a un proceso de desplazamiento secuencial de la flota, el cual ocurre luego de alcanzar un valor mínimo en la fase descendente. En ambos HPs el desplazamiento ocurre con dirección suroeste, culminando el último domo del HP-A en las inmediaciones del sector norte de isla Livingston, mientras que en el HP-D culmina en el centro del estrecho de Bransfield (Figura 3). El desarrollo de cada domo permite a la flota la obtención secuencial de nuevos máximos rendimientos (fases máximas), volviendo poco clara la señal de depleción.

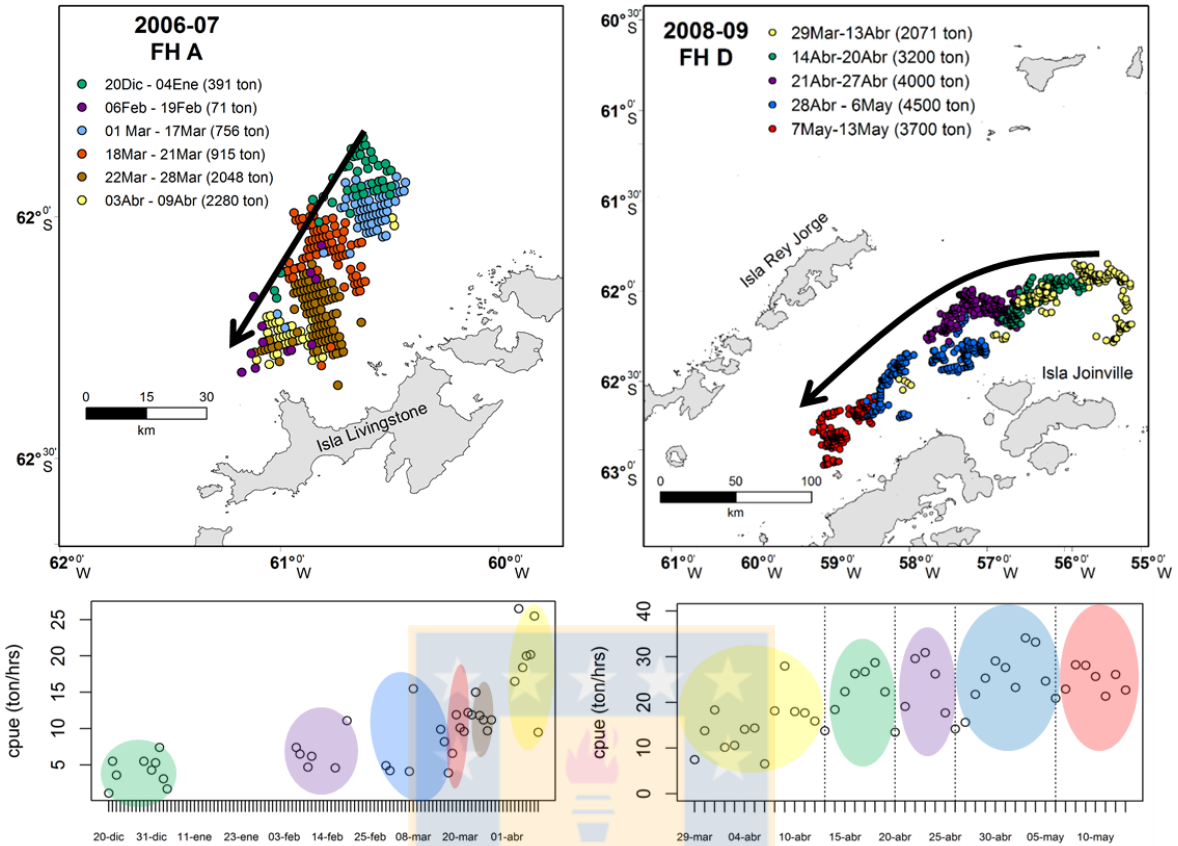


Figura 3: Domos de la CPUE nominal y desplazamiento secuencial de las capturas en los HPs A y D.

Fuente: Elaboración propia.

Domos con avance secuencial con revisita

Los HPs E, F, I, J, K, M y N presentan un patrón de CPUE en forma de domos estructurados espacialmente sobre avances secuenciales de la flota y revisitas. De estos, uno de los HPs más importantes en términos de captura acumulada (63865 toneladas) es el HP M, la cual es obtenida en sólo 2106 km², determinando la mayor densidad de captura con 30.3 ton/km² (Tabla I, Cap. I). El HP M exhibe una pendiente significativamente positiva sin evidencias de depleción local (Figura 2). Al analizar el patrón diario de la CPUE, se identifican trece domos distribuidos en 103 días de operaciones de pesca, los cuales se extienden entre 3 a 17 días (promedio de 7.9 ± 4.0 días), con una participación de hasta 8 embarcaciones y una caída porcentual entre la fase máxima y el término de la fase descendente que fluctuó entre 32.6 % en el domo 3 y 76.2% en el domo 12 (Tabla 2). Los mapas de distribución espacial de los

domos exhiben un desplazamiento permanente de la flota entre zonas contiguas al interior del HP M, lo cual determina la formación de nuevos domos y nuevas fases máximas, modulando la tendencia positiva en el modelo de Leslie (Figura 4). Los primeros cuatro domos corresponden a lances claramente separados espacialmente, que muestran un avance secuencial de las capturas. Desde el quinto domo se mantiene el patrón de desplazamiento secuencial pero surge un proceso de revisita de las zonas explotadas durante los domos previos. A pesar que desde el quinto hasta el decimocuarto domo existe revisita, las fases máximas siempre fueron en aumento, incluso presentando los valores más altos en los dos últimos domos entre el 20 de mayo y 14 junio, luego de haber obtenido más de 29000 toneladas acumuladas (Figura 4). Cabe considerar que estos últimos dos domos comienzan luego de diez días de reposo, pudiendo esto favorecer la renovación de las concentraciones de krill y sostener las 23000 toneladas obtenidas en aquellos 24 días de pesca continua.



Tabla 2: Duración, número de barcos, captura, revisita y porcentaje de caída de la CPUE en cada domo identificado en el HP M durante la temporada 2012/13.

Domo	Duración (días)	n° barcos	Captura (toneladas)	Revisita	Fase Máxima (ton/hrs/día)	FD-Mínimo (ton/hrs/día)	Caída FM-FDM (%)
1	10	6	2386	-	12.15	4.37	64.0
2	5	2	1794	-	13.21	6.66	49.6
3	4	3	2783	-	10.84	7.31	32.6
4	5	5	3872	-	11.88	5.95	49.9
5	8	5	2729	+	9.06	5.26	41.9
6	8	5	2274	+	16.38	8.18	50.1
7	7	6	3186	+	17.6	7.59	56.9
8	3	7	3234	+	11.13	7.39	33.6
9	14	7	9601	+	18	11.49	36.2
10	5	4	1115	+	17.25	7.07	59.0
11	10	6	6073	+	12.56	7.97	36.5
12	7	5	2974	+	25.04	5.96	76.2
13	17	8	21665	+	22.68	9.96	56.1
promedio	7.9		4898.9		15.2	7.3	49.4
desv. est.	4.0		5487.9		4.8	1.9	13.1

Fuente: Elaboración propia.

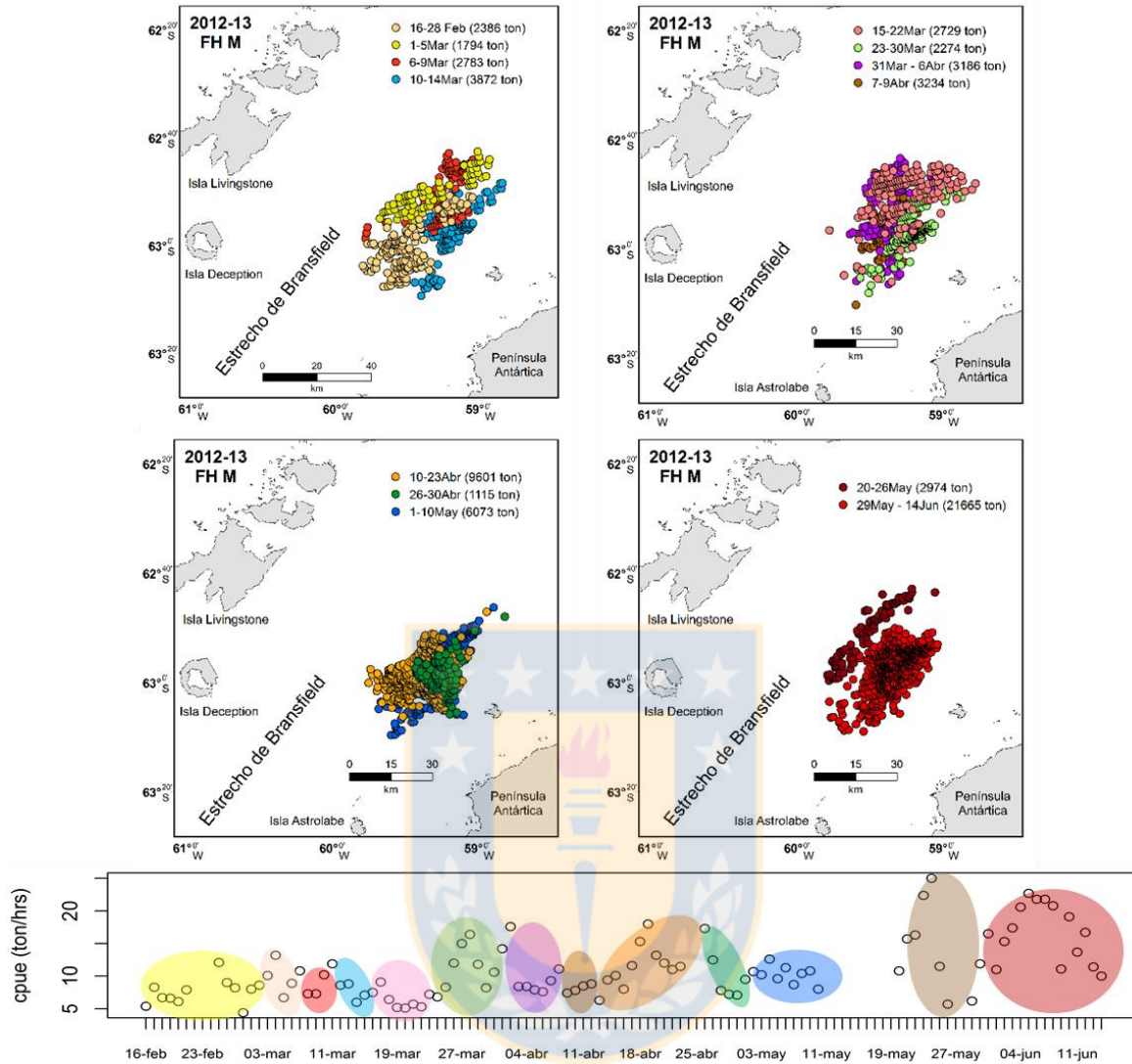


Figura 4: Desplazamiento secuencial de las capturas en el HP-M y domos de la CPUE nominal diaria.

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de la persistencia espacial

Durante las últimas temporadas de pesca, el centro del estrecho de Bransfield, ha representado un sector clave en la estrategia de pesca de la flota. Luego de sostener bajos niveles de captura en la temporada 2008-09 (durante el domo seis, al final de la actividad del HP-D), desde la temporada 2009/10 a la 2013/14 cuatro HPs (F, I, M y N) se desarrollaron en la misma ubicación al centro del estrecho de Bransfield (Figura 5). Estos HPs presentan una captura acumulada de 195777 toneladas, lo cual corresponde al 59.7% de todas las capturas realizadas dentro de los HPs durante el periodo de estudio. Las primeras capturas en el centro del estrecho de Bransfield se encuentran en el HP-F, durante la temporada 2009-10, las cuales comienzan con una CPUE de 35-45 ton/hora y luego disminuyen a lo largo de la temporada hasta 5-10 ton/hora. En las temporadas siguientes este lugar exhibe una CPUE menor pero estable. En el HP-I durante el 2011-12 se encuentra una CPUE que alcanza un máximo de 15 ton/hora y cae rápidamente por debajo de 5 ton/hora. Durante el HP-M la CPUE comienza con 5-10 ton/hora, alcanza un máximo de 25 ton/hora y luego disminuye a 10 ton/hora. Finalmente, en la temporada 2013-14 el HP-N comienza con 10 ton/hora, alcanza unos máximos de 20 ton/hora y disminuye gradualmente hasta finalizar con 10 ton/hora (Figura 5).

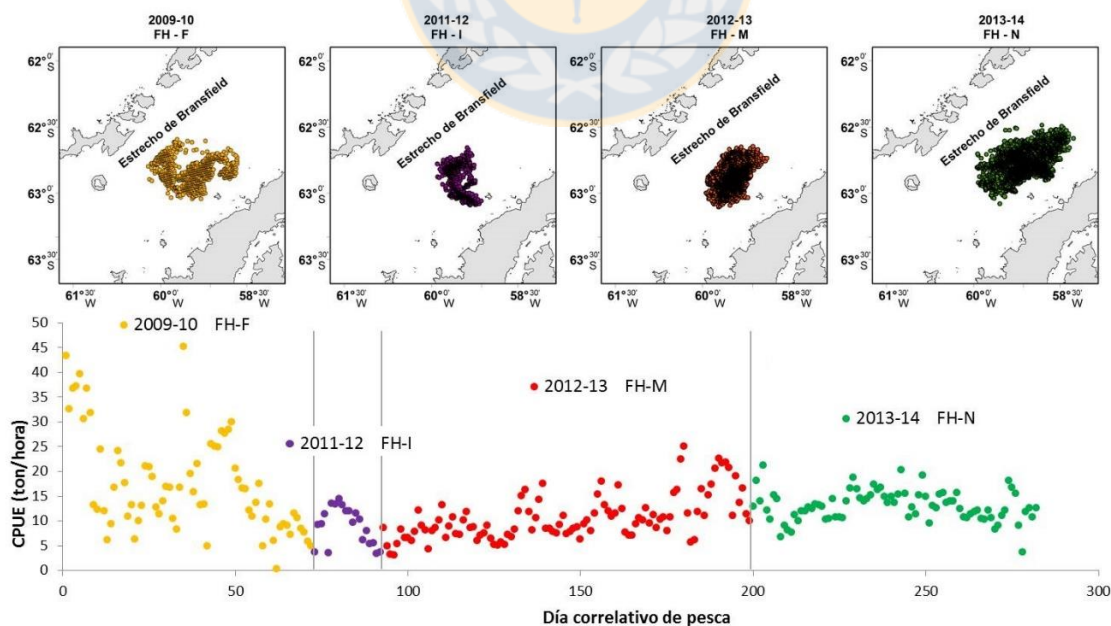


Figura 5: Ubicación espacial de los lances de pesca y CPUE nominal diaria de los HPs F, I, M y N.

Fuente: Elaboración propia.

El HP-N presenta un patrón diario de CPUE de tipo secuencial con revisita. Este HP representa el último HPs en el centro del estrecho de Bransfield dentro de la serie de temporadas analizadas, y contiene la mayor captura acumulada de todos los HPs evaluados, con 84734 toneladas (Tabla 1). El análisis de Leslie determinó que no presenta una tendencia negativa significativa de la CPUE a través de toda la temporada, sin embargo, dada la alta captura acumulada reportada para este lugar, se analizó el patrón de ubicación espacial de los domos, con el propósito de analizar el potencial efecto de la persistencia espacial que ha ejercido la flota en las últimas temporadas de pesca. El HP-N se estructura sobre doce domos desarrollados en 83 días de pesca continua entre el 24 de febrero al 17 de mayo del 2014. Al igual que el HP-M, la gran cantidad de domos responden a desplazamientos constantes de la flota entre zonas contiguas al interior del HP. Los primeros dos domos entre el 27 de febrero y 7 de marzo contienen 4740 toneladas, con una separación espacial evidente. Desde el tercer domo entre el 8 y 18 de marzo, no existe una separación evidente y comienza el proceso de revisita de los lugares de pesca. Los siguientes nueve domos desarrollados hasta el 17 de mayo se basan en desplazamientos secuenciales revisitando zonas contiguas ya explotadas en los domos previos (Figura 6). Entre los doce domos que componen el HP-N, su duración se extiende entre 3 y 11 días (promedio 6.9 ± 2.8 días), una participación entre 3 y 9 embarcaciones y una disminución porcentual de la CPUE que varía entre un 14.4% en el domo 2 y 79.3% en el domo 11 (Tabla 3).

A pesar que el proceso de revisita de la flota entre áreas contiguas comienza desde el 8 de marzo (domo tres), la CPUE nominal diaria continuó aumentando hasta un máximo de 18.8 ton/hora el 25 de marzo (domo cinco). Luego de este máximo se mantuvieron los desplazamientos diarios entre zonas contiguas que proporcionaron nuevas fases máximas. Sin embargo, al evaluar la tendencia del modelo de Leslie luego de esta fecha (periodo entre el 25 de marzo a 17 de mayo), se obtiene una pendiente negativa significativa ($p < 0.001$), vinculada a una CPUE que disminuye un 33.6% desde los 18.8 ton/hora el 25 de marzo a 12.5 ton/hora el 17 de mayo. Este periodo acumula 64373 toneladas (78.8% de la captura total en el HP-N), obtenidas en 54 días de pesca continua y sostiene la señal de agotamiento local de la biomasa explotable de krill (Figura 7).

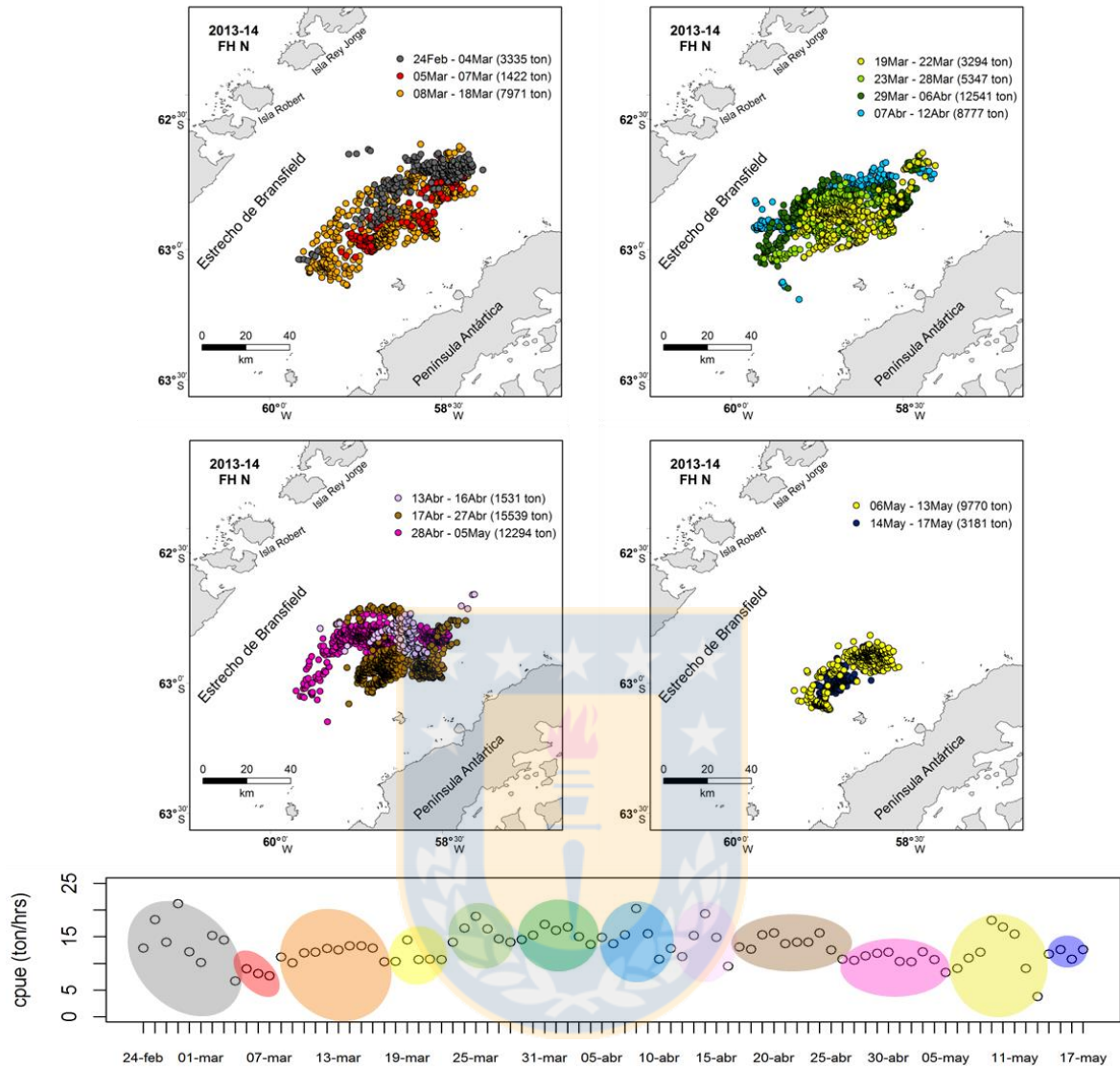


Figura 6: Domas de la CPUE nominal y desplazamiento secuencial de las capturas en el HP-N.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Duración, número de barcos, captura, revisita y porcentaje de caída de la CPUE en cada domo identificado en el HP N durante la temporada 2013/14.

Domo	Duración (días)	n° barcos	Captura (Toneladas)	Revisita	Fase Máxima (ton/hrs/día)	FD-Mínimo (ton/hrs/día)	Caída FM-FDM
1	9	5	3335	-	21.2	6.7	68.4
2	3	5	1422	-	9	7.7	14.4
3	11	7	7971	-	13.3	10.4	21.8
4	4	8	3294	+	14.4	10.7	25.7
5	6	8	5347	+	18.8	14	25.5
6	9	9	12541	+	17.3	13.7	20.8
7	6	9	8777	+	20.3	11.3	44.3
8	4	5	1531	+	19.3	9.5	50.8
9	11	9	15539	+	15.7	10.6	32.5
10	8	8	12294	+	12.2	8.3	32.0
11	8	9	9770	+	18.1	3.8	79.0
12	4	5	3181	+	12.6	10.8	14.3
promedio	6.9		7083.5		16.0	9.8	35.8
desv. est.	2.8		4756.3		3.8	2.9	20.9

Fuente: Elaboración propia.

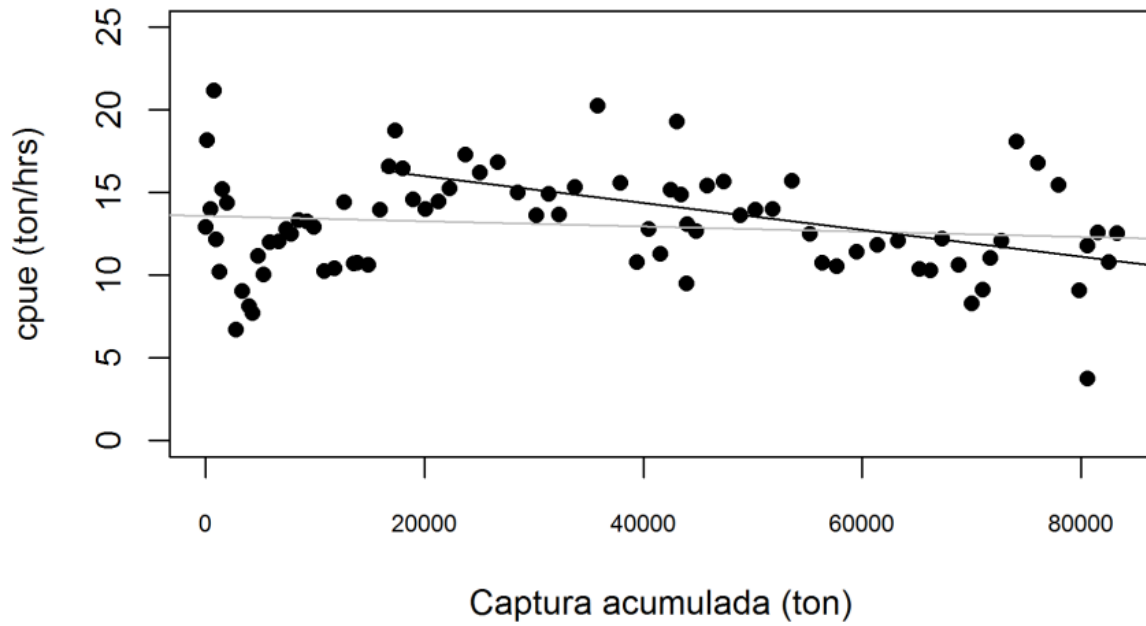


Figura 7: Ajuste del modelo de Leslie a la data completa del HP-N (línea gris) y al periodo 25 marzo a 17 de mayo (línea negra).

Fuente: Elaboración propia.



Discusión

Dimensión espacio-temporal de la CPUE de la pesquería de krill

La captura por unidad de esfuerzo (CPUE) es un indicador relacionado a la abundancia poblacional local (Mauri and Gascuel, 2001), por lo que ha sido utilizada en la evaluación de procesos de depleción local como producto de capturas persistentes (Bez *et al.*, 2006; Hanzelman *et al.*, 2007). Factores operacionales, biológicos, ambientales y vinculados al manejo pueden afectar la interpretación de la CPUE y su relación proporcional con la abundancia poblacional (Maunder *et al.*, 2006). En la pesquería de krill la CPUE ha sido cuestionada cuando es expresada como captura por lance o captura por día ya que está limitada por la capacidad de procesamiento del producto de cada embarcación y por el aplastamiento del krill en la red, que restringe la cantidad total capturada en cada lance y la cantidad total de krill capturado por día de pesca (Butterworth, 1989). Por otra parte, con el propósito de evaluar los cambios de la abundancia de krill en el océano austral, las estimaciones de CPUE han sido realizadas sobre escalas espaciales regionales y temporales anuales (Siegel *et al.*, 1998). Sin embargo, la CPUE es un indicador íntimamente relacionado a la dimensión espacio-temporal en la cual operan las embarcaciones y es proporcional cuando es calculado a escala pequeña reflejando la abundancia local de la población (Mauri and Gascuel, 2001). Los HPs identificados por Santa Cruz *et al.* (en revisión) indican que la flota de krill concentra sus capturas sobre una escala espacial local (pica-escala, Grant *et al.*, 2013), mientras que los resultados del presente trabajo exponen que la CPUE desarrolla un patrón de comportamiento temporal estructurado a escala de días, vinculado a desplazamientos diarios de la flota entre zonas contiguas. Ambos elementos determinan que exista un desacople espacio-temporal entre este indicador y su utilización como herramienta de evaluación regional bajo escalas de tiempo estacional o anual.

En este trabajo hemos utilizado la CPUE expresada como captura por tiempo de arrastre sobre una escala diaria, considerando que de esta forma, representa un indicador adecuado para dimensionar en el tiempo y espacio la relación proporcional entre los rendimientos de pesca y la abundancia de las concentraciones de krill. Esta unidad permite evitar los problemas inherentes al uso del tiempo de arrastre a nivel de lance de pesca como unidad de esfuerzo, el cual está condicionado por la capacidad de factoría de la embarcación o

precauciones en la cantidad de captura máxima para salvaguardar el producto (Butterworth, 1989). Los resultados obtenidos sugieren que la escala temporal diaria utilizada es apropiada para evaluar cambios en la tasa de captura a nivel de HP (ver figuras 3-6), no obstante, el patrón de comportamiento de la CPUE solo se evidencia cuando se combina el seguimiento temporal visual de esta, con la distribución espacial de las capturas.

Agotamiento local y señal de depleción

Los modelos de depleción basados en la disminución de los rendimientos de pesca en relación a la captura o esfuerzo acumulado (Leslie and Davis 1939; DeLury, 1951) han sido utilizados para la estimación de tamaños poblacionales (Young *et al.*, 2004), tasas de explotación (Barbeaux *et al.*, 2014) y evaluación de la eficiencia de artes de pesca (Wakefield *et al.*, 2013) o métodos de muestreo (Wilberg *et al.*, 2013). No obstante, en este trabajo esta aproximación fue utilizada con el propósito de detectar señales de depleción local (Hanzelman *et al.*, 2007) que permitan discutir el potencial efecto de la concentración de las capturas en sectores importantes del OPA.

Cuando la flota de krill opera de manera dispersa, sin una estructuración espacial definida, la información proveniente de la pesquería difícilmente refleja la situación de la abundancia poblacional. Sin embargo, cuando la flota exhibe un patrón direccionado hacia una fuerte consistencia espacial y persistencia temporal, con baja relocalización de las capturas, índices como la CPUE pueden reflejar la situación local de las abundancias de krill (Trathan *et al.*, 1998), permitiendo evaluar si capturas intensas en pequeñas áreas generan agotamientos locales significativos o procesos asociados a sobrepesca local (Mauri and Gascuel, 2001). Los HPs identificados por Santa Cruz *et al.* (en revisión) revelan que la pesquería de krill en el OPA desarrolla un patrón de distribución espacial de las capturas direccionado, por lo cual hemos considerado a los HPs como una nueva estructura espacio-temporal para analizar las tendencias de la CPUE y detectar señales de depleción como respuesta del stock ante la presión de pesca.

Solo los HPs F e I presentaron una disminución significativa de las tasas de captura en función de la captura acumulada, proporcionando señales de agotamiento de krill y depleción local (Figura 2). Ambos HPs se ubican en el centro del estrecho de Bransfield (CEB), y junto a los HPs D, F, I, M y N, que no evidenciaron tendencias negativas significativas, comparten la misma ubicación geográfica en el CEB, lo cual refleja que dentro del proceso de expansión

espacial de la flota, el CEB representa un sector clave para el funcionamiento y desempeño actual de la pesquería en el OPA. A pesar que el HP-M y N no reflejan tendencias significativas de agotamiento, son incluidos en la discusión ya que corresponden a los dos HPs más productivos con 63865 y 84734 toneladas respectivamente, identificados durante dos temporadas de pesca consecutivas (2012-13 y 2013-14).

El HP-M presentó una CPUE nominal diaria que aumentó gradualmente desde 10 ton/hora en el inicio de la temporada hasta 20 ton/hora al final de la temporada. La ausencia de una disminución significativa negativa de la CPUE durante este HP, podría vincularse a la presencia de grandes concentraciones de krill en este lugar, las cuales se han mantenido interanualmente y han permitido mantener una CPUE estable durante al menos las últimas cinco temporadas de pesca. Sin embargo creemos relevante considerar la tendencia exhibida por el HP-N, donde se evidenció que luego del 25 de marzo, las capturas se desarrollaron persistentemente sobre numerosos eventos de revisita, sosteniendo la señal negativa significativa de depleción de acuerdo al modelo de Leslie. Esta situación puede estar vinculada a un agotamiento significativo de las concentraciones de krill dado por la alta captura acumulada entre el 25 de marzo y 17 de mayo (66480 toneladas, 80% de la captura total del HP-N), o como una respuesta de las concentraciones de krill debido a la alta persistencia interanual de la flota en este lugar, donde en cinco temporadas consecutivas entre 2009/10 y 2013/14, cuatro HPs comparten la misma ubicación y acumulan más de 195000 toneladas. Este lugar representa una importante zona de reclutamiento de krill, el cual presenta una temporalidad dada por fuertes reclutamientos cada 5-6 años (Quetin and Ross, 2003), por lo que si este periodo de persistencia interanual, coincide con un periodo de ausencia de reclutamiento exitoso, las tasas de captura podrían estar generando impactos importantes sobre las concentraciones de krill.

Tendencia de la CPUE intra-HPs

El seguimiento visual de los rendimientos de pesca permitió identificar el comportamiento de tipo domo de la CPUE nominal diaria. La dimensión espacio-temporal de estos domos sugiere que el desarrollo de cada uno de ellos ocurre como resultado de una estrategia de explotación basada en la detección y explotación de concentraciones de krill (Taki *et al.*, 2005). Cada domo se estructura de acuerdo a una fase ascendente, la cual es representativa de los primeros lances donde se evalúa la calidad del krill, luego de la detección de la

concentración (Kawaguchi and Nicol, 2007). Luego una fase máxima, representativa del proceso de plena explotación de la concentración y la obtención de los máximos rendimientos de acuerdo al tamaño y la densidad de la concentración, y una fase descendente, la cual refleja el proceso de disminución de los rendimientos de pesca producto del agotamiento de la concentración.

La fase descendente representa el término del domo y se establece como un periodo clave donde la disminución de los rendimientos motiva el desplazamiento de la flota hacia sectores contiguos. Su desarrollo varía de acuerdo a la instancia en el cual se estructura el domo dentro de la temporada de pesca. Las FD de domos en un periodo inicial de la temporada de pesca pueden vincularse al proceso de dispersión que sufren las concentraciones de krill ante el paso del arte de pesca o al menor tamaño que las concentraciones, haciéndolas menos atractivas para los pescadores (SC-CAMLR, 1987); sin embargo, el desarrollo de las FDs en base a numerosos eventos de revisita en zonas ya explotadas, reflejarían agotamientos significativos producto de las capturas persistentes, proporcionando una señal de depleción local de las concentraciones de krill. Uno de los patrones reconocidos en la flota pesquera de krill es el desplazamiento entre zonas contiguas cuando se evidencia una disminución considerable de los rendimientos de pesca. Ante esta situación los buques se desplazan hacia zonas contiguas intentando evitar operar sobre la misma ruta de arrastre (re-tows o revisita) (SC-CAMLR 1987); si las búsquedas en áreas contiguas son infructuosas y existe una ausencia de zonas vecinas más atractivas, los buques regresan a zonas ya explotadas (Dolzhnev *et al.*, 1990; Sushin, 1998). Este patrón coincide con el proceso de desarrollo de domos con eventos de revisita expuesto en el presente trabajo. Nuestros resultados indican que la flota concentra sus capturas sobre concentraciones de krill, las cuales se estructuran sobre una resolución espacial menor a la evaluada a nivel de HPs. La formación sucesiva de domos basados en desplazamientos secuenciales permite a la flota mantener una CPUE con nuevas fases máximas, determinando que el modelo de Leslie no proporcione señales de depleción local. En pesquerías de arrastre orientadas a recursos altamente gregarios la relación lineal entre la CPUE y la abundancia local se ve afectada por el comportamiento secuencial que desarrolla la flota, donde los pescadores se mueven hacia nuevas agregaciones, manteniendo altos rendimientos de pesca aunque la abundancia del stock pueda estar disminuyendo (Deng *et al.*, 2005).

Los resultados basados en la información de captura y esfuerzo analizada a escala fina y la visualización exhaustiva de sus tendencias diarias, permiten evidenciar que la ubicación de los HPs encontrados en el centro del estrecho de Bransfield mantienen una consistencia espacial entre las temporadas de pesca, donde las concentraciones alcanzan una magnitud tal, que permiten sostener intensas capturas con altos rendimientos de pesca. Así como fue sugerido por Atkinson *et al.*, (2012), la evaluación de la CPUE bajo un análisis exhaustivo en escala fina permitió generar información valiosa sobre la ubicación, dimensión y persistencia interanual de las concentraciones explotables de krill. Por otra parte, a esta escala fue posible evidenciar que las fases descendentes de la CPUE corresponden a disminuciones importantes en los rendimientos que determinan el desplazamiento hacia zonas contiguas. Futuros análisis de la información provenientes de la pesquería para evaluar depleción local, deben tomar en consideración tanto el comportamiento de tipo domo de la CPUE nominal identificado en este trabajo, como la menor resolución espacial de las concentraciones en relación a la escala de HPs, por lo que se sugiere implementar el modelo de depleción de Leslie sobre las fases descendentes de los domos, sobre todo aquellos vinculados a numerosos eventos de revisita, como es el HP-N, donde la CPUE en el domo 11 disminuyó hasta en un 79.3% con respecto a su valor en la fase máxima.

Agradecimientos

El autor principal agradece a la Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción (UdeC) por brindar apoyo financiero para su trabajo de postgrado. También a la Secretaría de la CCRVMA por proporcionar los datos de la pesquería de krill, al Sr. Marcelo González (UdeC) por su asesoramiento sobre el uso de herramientas de información geográfica y al Dr. Luis Cubillos (UdeC) por sus comentarios que mejoraron este manuscrito.

Referencias

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. and P. Rothery. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432: 100-103

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., Jessopp, M. and V. Loeb. 2009. A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill. *Deep-Sea Research I* 56: 727-740

Atkinson, A., Nicol, S., Kawaguchi, S., Pakhomov, E., Quetin, L., Ross, R., Hill, S., Reiss, C. and V. Siegel. 2012. Fitting *Euphausia superba* into southern ocean foodweb models: a review of data sources and their limitations. *CCAMLR Science* 19: 219-245

Barbeaux, S., Horne, J. and J. Ianelli. 2014. A novel approach for estimating location and scale specific fishing exploitation rates of eastern Bering Sea walleye pollock. *Fisheries Research* 153: 69-82

Bez, N., Oliveira, E. and G. Duhamel. 2006. Repetitive fishing, local depletion, and fishing efficiencies in the Kerguelen Islands fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 63: 532-542

Buttwerworth, D. 1989. Some aspects of the relation between Antarctic krill abundance and CPUE measures in the Japanese krill fishery. *WS-KCPUE-89/3*. 29 pp

Constable, A., de la Mare, K., Agnew, D., Everson, I. & D. Miller. 2000. Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCRVMA). *ICES Journal of Marine Science*, 57: 778-791

DeLury, D. 1951. On the planning of experiments for the estimation of fish populations. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1951, 8b(4): 281-307

Deng, R., Dichmont, C., Milton, D., Haywood, M., Vance, D., Hall, N. and D. Die. 2005. Can vessel monitoring system data also be used to study trawling intensity and population

depletion? The example of Australia's northern prawn fishery. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 62: 611-622

Dolzhenkov, V., Kovalev, E., Spiridonov, V., Timonin, V. and I. Zhigalov. 1990. The distribution pattern and fishery for the Antarctic krill (*Euphausia superba*) off the Wilkes land and Balleny Islands (with notes on the application of CPUE data as indices of krill abundance). WG-Krill-90/16. 35 pp

Flores, H., Atkinson, A., Kawaguchi, S., Krafft, B., Milinevsky, G., Nicol, S., Reiss, C., Tarling, G., Werner, R., Bravo Rebolledo, E., Cirelli, V., Cuzin-Roudy, J., Fielding, S., Groeneveld, J., Haraldsson, M., Lombana, A., Marschoff, E., Meyer, B., Pakhomov, E., Rombolá, E., Schmidt, K., Siegel, V., Teschke, M., Tonkes, H., Toullec, J., Trathan, P., Tremblay, N., Van de Putte, A., van Franeker, J. and T. Werner. 2012. Impact of climate change on Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series* 458: 1-19

Godo, O., Reiss, C., Siegel, V. and J. Watkins. 2014. Commercial fishing vessel as research vessels in the Antarctic – requirements and solutions exemplified with a new vessel. *CCAMLR Science* 21: 11-17

Grant, S., Hill, S. and P. Fretwell. 2013. Spatial distribution of management measures, Antarctic krill catch and southern ocean bioregions: implications for conservation planning. *CCAMLR Science* 20: 1-19

Hanselman, D., Spencer, P., Shotwell, K. and R. Reuter. 2007. Localized depletion of three Alaska rockfish species. Pages 493–511 in J. Heifetz, J. DiCosimo, A. J. Gharrett, M. S. Love, V. M. O'Connell, and R. D. Stanley, editors. *Biology, assessment, and management of North Pacific rockfishes*. University of Alaska Fairbanks, Alaska Sea Grant Report AK-5G-07-01, Fairbanks.

Hewitt, R., Watters, G., Tratham, P., Croxall, J., Goebel, M., Ramm, D., Reid, K., Trivelpiece, W. and J. Watkins. 2004. Options for allocating the precautionary catch limit of krill among small-scale management units in the Scotia Sea. *CCRVMA Science* 11: 81-97

Hilborn, R. and C. Walters. 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty*. Chapman and Hall, New York (1992) 570 pp

Hinke, J., Goebel, M., Santos, M., Trathan, P., Trivelpiece, W. and G. Watters. 2014. Spatial overlap of krill-dependent predators and krill fishery catches and a proposal for subdivision of catch limits in Subarea 48.1. *EMM-14-36. SCCRVMA* 22 pp

Kawaguchi, S. and S. Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. *Antarctic Science* 19(2): 219-230

Kawaguchi, S. and S. Candy. 2009. Quantifying movement behaviour of vessels in the Antarctic krill fishery. *CCRVMA Science* 16: 131-148

Leslie, P. and D. Davis. 1939. An attempt to determine the absolute number of rats on a given area. *Journal of Animal Ecology* 8(1): 94–113

Maunder, M., Sibert, J., Fonteneau, A., Hampton, J., Kleiber, P., and S. Harley. 2006. Interpreting catch per unit effort data to assess the status of individual stocks and communities. *ICES Journal of Marine Science* 63: 1373-1385

Mauri, O. and D. Gascuel. 2001. Local overfishing and fishing tactics: theoretical considerations and applied consequences in stock assessment studied with a numerical simulator of fisheries. *Aquat. Living Resour.* 14: 203-210

Nicol, S., Foster, J. and S. Kawaguchi. 2012. The fishery for Antarctic krill – recent developments. *Fish and Fisheries* 13: 30-40

Nicol, S. and J. Foster. 2016. The fishery for Antarctic krill: Its current status and management regime. In *Biology and Ecology of Antarctic Krill*, Advances in Polar Ecology, edited by V. Siegel, Springer, Switzerland (pp. 387-421)

Ogle, D. 2016. Fisheries stock assessment (FSA) methods package for R. R package version 0.8.11. <https://github.com/droglenc/FSA>. [2016-12-13]

Parkes, G., Moreno, C., Piling, G., and Z. Young. 1996. Use of the Leslie stock depletion model for the assessment of local abundance of Patagonian toothfish *Dissostichus eleginoides*. *CCAMLR Science* 3: 55-77

Piñones, A. and A. Fedorov. 2016. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century. *Geophysical Research Letters* 43, doi:10.1002/2016GL069656.

Plagányi, E. and D. Buttherworth. 2012. The Scotia Sea krill fishery and its possible impacts on dependent predators: modeling localized depletion of prey. *Ecological Applications* 22(3): 748-761

Quetin, L. and R. Ross. 2003. Episodic recruitment in Antarctic krill *Euphausia superba* in the Palmer LTER study region. *Marine Ecology Progress Series* 259: 185-200

Reiss, C., Cossio, A., Loeb, V. and Demer, D. 2008. Variations in the biomass of Antarctic krill (*Euphausia superba*) around the South Shetland Islands, 1996–2006. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 497–508

Santora, J., Reiss, C., Loeb, V. and R. Viet. 2010. Spatial association between *hotspots* of baleen whales and demographic patterns of Antarctic krill *Euphausia superba* suggests size-dependent predation. *Marine Ecology Progress Series* 405: 255-269

Santora, J. and R. Veit. 2013. Spatio-temporal persistence of top predator *hotspots* near the Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series* 487: 287-304

Siegel, V., Damm, U. and V. Sushin. 1998. Catch per unit effort (CPUE) data from the early years of commercial krill fishing operations in the Atlantic sector of the Antarctic. *CCAMLR Science* 5: 31-50

SC-CAMLR, 1987. Krill CPUE simulation study. Reports of Activities. SC-CAMLR-VI/BG/4. 55 pp

Sushin, V. 1998. Distribution of the soviet krill fishing fleet in the South Orkneys area (subarea 48.2) during 1989/1990. *CCAMLR Science* 5: 51-62

Taki, K., Hayashi, T., and M. Naganobu. 2005. Characteristics of seasonal variation in diurnal vertical migration and aggregation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Scotia sea, using Japanese fishery data. *CCAMLR Science* 12: 163-172

Trathan, P., Everson, I. and E. Murphy. 1998. Analysis of haul data from the South Georgia krill fishery. *CCAMLR Science* 5: 9-30

Wakefield, C., Moran, M., Tapp, N. and G. Jackson. 2007. Catchability and selectivity of juvenile snapper (*Pagrus auratus*, Sparidae) and western butterfish (*Pentapodus vitta*, Nemipteridae) from prawn trawling in a large marine embayment in Western Australia. *Fisheries Research* 85: 37-48

Watters, G., Hill, S., Hinke, J., Mathews, J. and K. Reid. 2013. Decision-making for ecosystem-based management: evaluating options for a krill fishery with an ecosystem dynamic model. *Ecological Applications* 23(4): 710-725

Wilberg, M., Robinson, J., Rains, S., Humphrey, J. and R. Lipcius. 2013. Effects of location error on estimates of dredge catchability from depletion based methods. *Fisheries Research* 148: 1-8

Young, I., Pierce, G., Daly, H., Santos, M., Key, L., Bailey, N., Robin, J., Bishop, A., Stowasser, G., Nyegaard, M., Cho, S., Rasero, M. and J. Pereira. 2004. Application of depletion methods to estimate stock size in the squid *Loligo forbesi* in Scottish waters (UK). Fisheries Research 69: 211-227



VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS PLANTEADAS

El presente manuscrito fue desarrollado considerando dos hipótesis de trabajo:

- 1) Las operaciones de pesca de la flota ocurren de manera agregativa, concentrando la captura acumulada sobre *hotspots* pesqueros que mantienen una fuerte consistencia espacial y temporal durante la temporada de pesca.

Los catorce *hotspots* pesqueros (HPs) identificados permiten validar esta hipótesis, y demuestran una fuerte tendencia gregaria que desarrolla la flota para obtener sus capturas. Entre las temporadas de pesca 2006/07 y 2013/14, los HPs concentran individualmente entre el 8 y 68% de la captura total. Al observar su ubicación espacial, se evidencia un proceso de desplazamiento de la flota, desde los caladeros habituales al norte de las islas Shetland del Sur e isla Elefante, hacia el interior del estrecho de Bransfield y el sector norte del estrecho de Gerlache. Este desplazamiento ilustra el proceso de expansión espacial de la pesquería, el cual ha estado acompañado por una expansión temporal, donde gran parte de las capturas son obtenidas durante los meses de invierno. La caracterización operacional de los HPs indica que la profundidad media de captura fluctúa entre los 50 y 100 metros, siendo similar entre los artes de pesca tradicional y continuo, mientras que la ubicación de los HPs determina mayor variabilidad a la profundidad de captura.

En las temporadas de pesca 2011/12 y 2012/13 los HPs J y L presentan capturas de 11028 y 15105 toneladas, las cuales en términos comparativos son menores a otros HPs, pero representan las primeras e intensas capturas al interior del estrecho de Gerlache. En las temporadas 2012/13 y 2013/2014, los HPs M y N concentran el 41 y 57% de la captura acumulada, con una persistencia temporal de 6 y 5 meses respectivamente. Estos cuatro HPs se ubican en el centro del estrecho de Bransfield y permiten verificar la importancia de este lugar para el funcionamiento de la pesquería y la consistencia espacial de las agregaciones explotables de krill.

Las unidades de ordenación de pequeña escala (SSMU) han sido diseñadas para evaluar a una escala pequeña, la interacción de la flota con las abundancias locales de krill y las actividades de forrajeo de los depredadores naturales. Los HPs M y N se ubican justo en la mitad de dos SSMUs, por lo que análisis basados en la escala de SSMU no consideran el

comportamiento agregativo y pueden enmascarar el potencial impacto de las capturas localizadas. Las SSMUs u otras alternativas de manejo espacial, deben ser diseñadas considerando las zonas de concentración de pesca identificadas, sobre todo en lugares como el estrecho de Bransfield, reconocido por su importancia para el reclutamiento de krill y para la alimentación de diferentes especies de depredadores naturales.

- 2) La actividad de pesca desarrollada en *hospots* pesqueros, genera disminuciones de los rendimientos de pesca debido a depleción significativa de la abundancia local de krill.

Los HPs fueron identificados de acuerdo a la escala de funcionamiento de la flota. Su estructuración se vincula a una fuerte consistencia espacial y temporal de las capturas, altas densidades de captura, acotados periodos de tiempo y reducidas dimensiones espaciales. Estos atributos fueron considerados como factores determinantes para la generación de procesos de depleción local de las agregaciones de krill.

Los HPs fueron considerados como una nueva alternativa para el análisis de la CPUE, y en este caso, para la detección de señales de agotamiento local. Solo dos casos presentaron señales de depleción local a escala de HPs, mientras que la mayoría de los HPs identificados no exhiben este patrón. Estos antecedentes determinarían rechazar esta hipótesis de trabajo, sin embargo, los análisis a escala fina, menor que la considerada en los HPs, permitió verificar que la ausencia de señales de depleción ocurre por los desplazamientos diarios que desarrolla la flota, en respuesta a disminuciones en los rendimientos de pesca. Estos desplazamientos ocurren bajo una escala espacial menor a la identificada para los HPs y permiten a los pescadores acceder a nuevas concentraciones, rompiendo con el supuesto de población cerrada del modelo de Leslie.

Los desplazamientos diarios entre zonas contiguas se vinculan a una CPUE diaria en forma de domo, dado por una fase ascendente, una fase máxima y una fase descendente. Cuando los rendimientos de pesca presentan una caída entre un 20% hasta 76% de la fase descendente, la flota realiza desplazamientos hacia zonas de pesca contiguas, accediendo a nuevas agregaciones, lo cual permite mantener una CPUE alta.

Cada domo se estructura sobre la explotación de una concentración de krill y reflejan tanto el avance secuencial sin revisita de las capturas, como el caso del HP-D donde existió un

desplazamiento secuencial desde el extremo norte del estrecho de Bransfield hasta culminar en su zona central, como el avance secuencial con revisita, donde los domos se estructuran sobre concentraciones previamente explotadas.

Las fases descendentes de domos con revisita en el inicio de la explotación del HPs pueden responder a procesos de dispersión de krill producto del paso del arte de pesca, sin embargo, aquellas fases descendentes en domos que ocurren luego de numerosas revisitas (HP-M y N presentan 9 domos con revisita), pueden vincularse a agotamientos locales de krill.

Futuros análisis de depleción deben considerar la CPUE en forma de domo y los desplazamientos secuenciales a escala diaria que exhibe la flota. La aplicación del modelo de depleción puede ser implementada sobre las fases descendentes de los domos desarrollados sobre numerosos eventos de revisita.



BIBLIOGRAFÍA

Agnew, D. & V. Marín. 1994. Preliminary model of krill fishery behavior in subarea 48.1. *CCAMLR Science* 1: 71-79

Agnew, D. & G. Phegan. 1995. A fine-scale model of the overlap between penguin foraging demands and the krill fishery in the south Shetland islands and Antarctic peninsula. *CCRVMA Science* 2: 99-110

Alonzo, S., Switzer, P. and M. Mangel. 2003. An ecosystem-based approach to management: using individual behaviour to predict the indirect effects of Antarctic krill fisheries on penguin foraging. *Journal of Applied Ecology* 40: 692-702

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. and P. Rothery. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432: 100-103

Atkinson, A., Nicol, S., Kawaguchi, S., Pakhomov, E., Quetin, L., Ross, R., Hill, S., Reiss, C. and V. Siegel. 2012. Fitting *Euphausia superba* into southern ocean foodweb models: a review of data sources and their limitations. *CCAMLR Science* 19: 219-245

Croxall, J., Everson, I. and D. Miller. 1992. Management of the Antarctic krill fishery. *Polar Record* 28(164): 64-66

Constable, A., de la Mare, K., Agnew, D., Everson, I. and D. Miller. 2000. Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCRVMA). *ICES Journal of Marine Science*, 57: 778-791

Constable, A. and S. Nicol. 2002. Defining smaller-scale management units to further develop the ecosystem approach in managing large-scale pelagic krill fisheries in Antarctica. *CCRVMA Science* 9: 117-131

Constable, A. 2011. Lessons from CCRVMA on the implementation of the ecosystem approach to managing fisheries. *Fish and Fisheries* 12(2): 138-151

Everson, I. & W. de la Mare. 1996. Some thoughts on precautionary measures for the krill fishery. *CCRVMA Science* 3: 1-11

Flores, H., Atkinson, A., Kawaguchi, S., Krafft, B., Milinevsky, G., Nicol, S., Reiss, C., Tarling, G., Werner, R., Bravo Rebolledo, E., Cirelli, V., Cuzin-Roudy, J., Fielding, S., Groeneveld, J., Haraldsson, M., Lombana, A., Marschoff, E., Meyer, B., Pakhomov, E., Rombolá, E., Schmidt, K., Siegel, V., Teschke, M., Tonkes, H., Toullec, J., Tratham, P., Tremblay, N., Van de Putte, A., Franeker, K. and T. Werner. 2012. Impact of climate change on Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series* 458: 1-19

Gascon, V. and R. Werner. 2006. CCRVMA and Antarctic krill: Ecosystem Around the Great White Continent. *Ocean & Fisheries Law* 7(1): 14-16

Gasyukov, P. & S. Kasatkina. 2010. Inter-annual variability of standardized index of krill abundance in subarea 48 according to CCRVMA fishery statistics database. WG-EMM-10/17. 26 pp

Grant, S., Hill, S. & P. Fretwell. 2013(a). Spatial distribution of management measures, antarctic krill catch and southern ocean bioregions: implications for conservation planning. *CCRVMA Science* 20: 1-19

Grant, S., Hill, S., Tratham, P. & E. Murphy. 2013(b). Ecosystem services of the Southern Ocean: trade-offs in decision-making. *Antarctic Science* 25(5): 603-617

Hewitt, R., Watters, G., Tratham, P., Croxall, J., Goebel, M., Ramm, D., Reid, K., Trivelpiece, W. & J. Watkins. 2004. Options for allocating the precautionary catch limit of krill among small-scale management units in the Scotia Sea. *CCRVMA Science* 11: 81-97

Hill, S., Trathan, P. & D. Agnew. 2009. The risk to fishery performance associated with spatially resolved management of Antarctic krill (*Euphausia superba*) harvesting. *ICES Journal of Marine Science* 66: 2148-2154

Hinke, J., Goebel, M., Santos, M., Trathan, P., Trivelpiece, W. & G. Watters. 2014. Spatial overlap of krill-dependent predators and krill fishery catches and a proposal for subdivision of catch limits in Subarea 48.1. EMM-14-36. SC-CCRVMA 22 pp

Kasatkina, S. & P. Gasyukov. 2014. Analysis of krill fishery operations in Subarea 48.1: spatial-time distribution of CPUE and fishing effort. WG-EMM-14/21. 22 pp

Kawaguchi, S., Nicol, S., Taki, K., & M. Naganobu. 2006. Fishing ground selection in the Antarctic krill fishery: trends in patterns across years, seasons and nations. *CCRVMA Science* 13: 117-141
Kawaguchi, S. & S. Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. *Antarctic Science* 19(2): 219- 230

Kawaguchi, S. and S. Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. *Antarctic Science* 19(2): 219-230

Kawaguchi, S. & S. Candy. 2009. Quantifying movement behaviour of vessels in the Antarctic krill fishery. *CCRVMA Science* 16: 131-148

Nicol, S. & J. Foster. 2003. Recent trends in the fishery for Antarctic krill. *Aquatic Living Resources* 16(1): 42-45

Nicol, S., Foster, J. & S. Kawaguchi. 2012. The fishery for Antarctic krill – recent developments. *Fish and Fisheries* 13: 30-40

Plagányi, E. & D. Buttherworth. 2012. The Scotia Sea krill fishery and its possible impacts on dependent predators: modeling localized depletion of prey. *Ecological Applications* 22(3): 748-761

Watters, G., Hill, S., Hinke, J., Mathews, J. & K. Reid. 2013. Decision-making for ecosystem-based management: evaluating options for a krill fishery with an ecosystem dynamic model. *Ecological applications* 23(4): 710-725

WG-SAM 12/05. Informe del grupo de trabajo de estadísticas, evaluación y modelado. SC-CAMLR. Tenerife, España. 25-29 Junio. 179 pp

WG-EMM 13/05. Informe del grupo de trabajo de Seguimiento y Ordenación del Ecosistema. SC-CAMLR. Bremerhaven, Alemenania. 1-10 Julio. 230 pp

