



UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
ESCUELA DE POSTGRADO
**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS, MENCIÓN
CONSERVACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

TESIS DOCTORAL



**SPATIAL AND TROPHIC INTERACTIONS BETWEEN KRILL, *EUPHAUSIA SUPERBA*,
AND MACKEREL ICEFISH, *CHAMPSOCEPHALUS GUNNARI*, IN ADÉLIE PENGUIN,
PYGOSCELIS ADELIAE, FEEDING AREAS IN THE SOUTH ORKNEY ISLANDS**

POR

José Antonio Canseco Rodríguez

Tesis presentada a la Universidad de Los Lagos como parte de los requisitos para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Conservación y Manejo de Recursos Naturales.

Profesor guía: Dr. Edwin Niklitschek

Puerto Montt, sur de Chile. Octubre de 2022



UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
ESCUELA DE POSTGRADO
**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS, MENCIÓN
CONSERVACIÓN Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

La defensa final de la tesis Doctoral titulada:

Spatial and trophic interactions between krill, *Euphausia superba*, and mackerel icefish, *Champsocephalus gunnari*, in Adélie penguin, *Pygoscelis adeliae* feeding areas in the South Orkney Islands

Presentada con fecha de hoy por el candidato a Doctor

JOSÉ ANTONIO CANSECO RODRÍGUEZ

Ha sido aprobada por la Comisión Evaluadora de Tesis de Grado, constituido por los profesores abajo firmantes.

Dr. José Luis Muñoz
Secretario Académico Programa de
Doctorado en Ciencias
Universidad de Los Lagos

Dr. Edwin Niklitschek
Profesor Guía
Centro I~mar, Universidad de Los Lagos

Dr. Cristian B. Canales Aguirre
Miembro Comisión de Tesis
Centro I~mar, Universidad de Los Lagos

Dra. Paulina Gebauer
Miembro Comisión de Tesis
Centro I~mar, Universidad de Los Lagos

Dr. Rodrigo Wiff
Evaluador Externo
Pontificia Universidad Católica de Chile

Puerto Montt, 21 octubre 2022

Table of Contents

AGRADECIMIENTOS.....	7
INDEX OF TABLES.....	16
INDEX OF FIGURES.....	18
ABBREVIATION INDEX.....	21
RESUMEN.....	23
ABSTRACT.....	25
GENERAL INTRODUCTION.....	27
References.....	33
HYPOTHESIS.....	39
OBJECTIVES.....	41
Chapter I: Can we really use design-free hydroacoustic data from fishing vessels as a cat's paw to assess Antarctic krill abundance and distribution off the South Orkney Islands?.....	43
Abstract.....	43
Resumen.....	44
Introduction.....	46
Material and methods.....	49
Study Area.....	49
Acoustic Sampling.....	50
Acoustic data post-processing.....	52
Modelling approach.....	52
Temporal and spatial correlation.....	52
Model selection procedures.....	54

Survey methods comparison.....	55
Sensitivity analysis.....	55
Results.....	55
Model selection for design-free data.....	56
Inter-annual variability in distribution and abundance.....	58
Surveying methods comparison.....	61
Sensitivity analysis.....	63
Discussion.....	66
Lessons learned and recommendations.....	70
Acknowledgments.....	71
References.....	72
Supplementary material.....	79
Chapter II: Variability and uncertainty associated to methods for estimating diet composition:the case of <i>Champocephalus gunnari</i> in the South Orkney Islands.*.....	81
Abstract.....	81
Resumen.....	82
Introduction.....	83
Materials and methods.....	87
Study Area and biological sampling.....	87
Stomach content analysis.....	88
Stable isotope analysis.....	90
Statistical analysis and method comparison.....	90
Results.....	93
Stomach content analysis.....	93

Stable isotope analysis.....	95
Base case mixing model.....	98
Sensitivity to methodological approach.....	98
.....	99
SIA sensitivity to lipid correction of prey $\delta^{13}\text{C}$ values.....	100
SIA sensitivity to trophic discrimination factor.....	102
SIA sensitivity to the number of putative prey taxa.....	104
SIA sensitivity to priors.....	104
Discussion.....	108
Sensitivity to methodological approaches.....	108
Sensitivity to lipid-correction of prey $\delta^{13}\text{C}$ values.....	109
Sensitivity to TDF assumptions.....	110
Sensitivity to putative prey assumptions.....	110
Sensitivity to priors.....	111
Conclusions and final remarks.....	112
Acknowledgments.....	113
References.....	114

Chapter III: Consumption of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> by mackerel icefish, <i>Champsocephalus gunnari</i> in feeding grounds of Adélie penguin <i>Pygoscelis adeliae</i> , around the South Orkney Islands: filling an information gap in the current ecosystem based management approach.....	123
---	-----

Abstract.....	123
Resumen.....	124
Introduction.....	125
Material and methods.....	128

Study Area.....	128
Acoustic data collection and processing.....	130
Acoustic density and distribution estimates.....	130
Spatial relationship.....	132
Consumption estimates.....	133
<i>Champocephalus gunnari</i> abundance scenarios.....	135
Results.....	135
Distribution.....	135
Relationship between <i>Champocephalus gunnari</i> and <i>Euphausia superba</i>	137
Consumption.....	140
Discussion.....	142
Distribution and density.....	142
Spatial relationships.....	143
Potential trophic interactions between <i>Champocephalus gunnari</i> , <i>Pygoscelis adeliae</i> and the krill fishery.....	144
Final remarks.....	146
Acknowledgments.....	147
References.....	147
GENERAL DISCUSSION.....	155
Can we use design-free hydroacoustic data from commercial vessels to improve accuracy and precision of krill abundance estimates?.....	156
Is mackerel icefish truly a hyper-specialist krill-dependent predator?.....	158
What is the trophic demand of krill required to sustain mackerel icefish recovery in the SOI? Is this demand large enough to affect trophic demands of other competitor sharing mackerel icefish foraging areas, such as the Adélie penguin?.....	160

Final remarks and conclusions.....	161
References.....	163
SUPPLEMENTARY MATERIAL.....	168

RESUMEN

Las aguas del continente Antártico han sido ampliamente explotadas siguiendo diferentes aproximaciones al manejo de sus recursos, siguiendo las medidas de la CCRVMA, que ha transitado desde un manejo mono-específico a un manejo ecosistémico. Este enfoque ecosistémico requiere incrementar nuestro conocimiento acerca de la abundancia, la distribución, las interacciones tróficas y las relaciones espaciales entre distintas especies de depredadores y presas. Draco rayado, *Champscephalus gunnari* es una de las especies más abundantes de peces en aguas antárticas y, particularmente, en las Islas Orcadas del Sur. Krill *Euphausia superba*, por su parte, es considerado una de las principales presas de draco rayado, con quien presenta niveles importantes de solapamiento espacial, tanto en estas islas, como en otras áreas del Océano Austral. La presente tesis doctoral buscó incrementar nuestro conocimiento sobre las interacciones tróficas y espaciales entre ambas especies incluyendo i) determinar la abundancia y distribución reciente de krill y draco rayado, ii) cuantificar la contribución de krill en la dieta de draco rayado y precisar cómo afecta la distribución espacial de draco rayado y iii) estimar el impacto del consumo de krill por draco rayado en áreas de alimentación del pingüino de Adelia *Pygoscelis adeliae* durante su época reproductiva. Para estimar la abundancia y distribución de estas especies, se pos-procesó la información hidroacústica multi-frecuencia diseño-basada proveniente de campañas científicas realizadas en 2017 y 2019, en las Islas Orcadas del Sur, e información hidroacústica sin diseño colectada durante operaciones comerciales de pesca para los mismos años y la misma área. Se probaron y evaluaron modelos geoestadísticos Bayesianos teniendo en cuenta la autocorrelación espacial y temporal de los datos. Para determinar la dieta de draco rayado, se realizó un análisis de contenido estomacal a 284 individuos de draco rayado y se analizaron, mediante isótopos estables, 576 muestras de tejido muscular de draco rayado y de sus principales presas, cuantificando la contribución proporcional de cada presa a la formación del tejido muscular del depredador aplicando modelos Bayesianos de mezcla. Para analizar la estrategia de forrajeo utilizada por draco rayado considerando modelos

geoestadísticos bayesianos alternativos y considerando el modelo de distribución libre ideal (IFD) y su posterior generalización para ajustar los datos de presencia-ausencia y densidad de cada especie. Por último, se estimó el consumo de krill por draco rayado utilizando las ecuaciones propuestas por Temming and Hermann (2009) bajo 3 escenarios de biomasa: 7 000 (B_t), 70 000 ($B_{50\%}$) y 140 000 (B_0) t. En 2017, se estimó una abundancia de krill de 60 232 m² (42% CV) utilizando datos diseño-basados. Las estimaciones utilizando datos sin diseño, fueron 50% mayores (RAI: 94 421 m²; 14% CV). En 2019, las estimaciones diseño-basadas fueron 113 654 m² (33% CV) siendo las obtenidas utilizando datos sin diseño un 25% mayores (RAI: 509 413 m²; 6% CV). La contribución estimada de krill a la dieta de draco rayado fue mayor a 94% tanto por análisis de contenido estomacal, como por isótopos estables concluyendo que draco rayado es un hiper-especialista ya que prácticamente solo consume krill. El consumo estacional medio de krill por parte de draco rayado en el área de alimentación del pingüino de Adelia fue de 154 g ind⁻¹ (IC_{95%}: 30-317 g ind⁻¹) que bajo los escenarios de B_0 , $B_{50\%}$ y B_t , correspondería a 65 000, 32 500 y 3 000 t de biomasa de krill. Los resultados de la presente tesis permiten concluir que draco rayado es un hiper-especialista dada su gran dependencia de krill lo que conlleva a manejar ambas especies desde un enfoque conjunto ecosistémico junto con el resto de especies dependiente de krill.

Palabras claves: Abundancia, distribución, dieta, isótopos estables, consumo, enfoque ecosistémico, krill, draco rayado

ABSTRACT

Antarctic waters have been widely exploited proceeding to different management approaches of marine resources always following the CCAMLR guidelines, going from a mono-specific management to an ecosystem based management. To advance towards an ecosystem management of Antarctic resources, it is essential to increase our knowledge about abundance, distribution, trophic interactions and spatial relations between different predator and prey species. Mackerel icefish *Champsocephalus gunnari* is one of the most abundant fish species in Antarctic waters, particularly in the South Orkney Islands. Krill, *Euphausia superba*, on the other hand, is considered one of mackerel icefish main prey, with whom it presents important levels of spatial overlap in these islands as in other areas of the Austral Ocean. The present thesis aimed to increase our knowledge regarding the spatial and trophic interactions between both species by i) estimating recent abundance and distribution of krill and mackerel icefish, ii) quantifying the contribution of krill to the diet of mackerel icefish and assess the effect on its spatial distribution, and iii) estimating the impact of krill consumption by mackerel icefish in the feeding areas of Adélie penguin, *Pygoscelis adeliae* during their reproductive season. To estimate abundance and distribution of these species, I post-processed multi-frequency hydroacoustic data from the study area collected during i) design-based, scientific surveys performed in 2017 and 2019 and ii) data collected during design-free, regular fishing operations for the same time period. I tested and evaluated Bayesian geostatistical models taking into account the spatial and temporal autocorrelation of the data. To assess the diet of mackerel icefish, the stomach content of 284 individuals was analyzed, and I performed stable isotopic analysis to 576 samples of muscle tissue or whole individuals. In order to quantify the proportional contribution of each prey to the formation of muscle tissue of the predator, Bayesian mixing models were applied. I analyzed if mackerel icefish followed the ideal free distribution (IFD) or its further modifications by considering alternative Bayesian geostatistical models on presence/absence and density data of mackerel icefish and krill. Finally, consumption of krill by mackerel icefish was estimated using Temming and Hermann (2009) proposed

equations under 3 mackerel icefish biomass scenarios: i) 7 000 (B_t), ii) 70 000 (B_{RMS}) and iii) 140 000 (B_0) t. In 2017, using design-based data I estimated an abundance of krill of 60 232 m² (42% CV) while design-free estimates were 1.5 times higher (RAI: 94 421 m²; 14% CV) for the same area. Regarding 2019, design-based estimates yielded a total abundance of 113 654 m² (33% CV) which greatly contrasts design-free estimates which were 5 times higher (RAI: 509 413 m²; 6% CV). Krill estimated contribution to the diet of mackerel icefish was more than 904% regardless of the method used, highlighting that mackerel icefish is a hyper-specialist and krill is practically its unique prey. Mean seasonal krill consumption by mackerel icefish in Adélie penguin feeding grounds was estimated to be 154 g ind⁻¹ (CI_{95%}: 30-317 g ind⁻¹) which under B_0 , $B_{50\%}$ and B_t , corresponded to 65 000, 32 500, and 3 000 t of krill biomass. The results obtained during the present thesis allows me to conclude that mackerel icefish is a hyper-specialist, largely depending on krill, hence, management actions undertaken should consider both species as an ensemble in addition to the other krill dependent species.

Keywords: Abundance, distribution, diet, stable isotopes, consumption, ecosystem based approach, krill, mackerel icefish