



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
MAGÍSTER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

---

# USO DE RADARES HF WERA EN DETECCIÓN DE BUQUES EN LAS COSTAS DE CONCEPCIÓN

por

BRENDA ELÍZABETH ACEVEDO ÁVILA

Tesis para optar al grado académico de Magíster en  
Ciencias con mención en Física

Profesor Guía: Dante Róbinson Figueroa Martínez

Octubre, 2017  
Concepción - Chile

---

# Dedicatoria

*A Isabel*



# Agradecimientos

*En primer lugar agradecer a mis padres por su apoyo incondicional, a mi pequeña familia Branko e Isabel por motivarme a persistir en mis estudios junto a la tía Elfrides.*

*Quisiera mencionar al Geofísico James Morales, quien es el encargado de los Radares, por su contribución y asistencia en todo lo que respecta a mediciones y cualquier duda durante el proceso de adquisición de datos. Su ayuda fue sustancial.*

*Al Dr. Thomas Helzel y a la Dra. Anna Dzvonskaya por su colaboración y buena disposición frente a diferentes consultas.*

*Al Profesor César Arévalo por su ayuda en hardware. Al Sr. Freddy Echeverría, encargado de la logística del proyecto CHIOOS, por su gestión en Capitanía de Puerto. Además mis agradecimientos a la Srta. Soledad Daroch, secretaria de postgrado.*

*También dar las gracias a la Capitanía de Puerto de San Vicente por la información entregada.*

*Finalmente a mi profesor guía Dr. Dante Figueroa que fue un pilar fundamental en el desarrollo de esta memoria. Le agradezco mucho su absoluta dedicación a la formación profesional de sus estudiantes. Gracias por su paciencia, confianza y ayuda en todos los aspectos.*



# Resumen

Los sistemas de radar HF marinos situados en la costa son generalmente utilizados como herramienta para obtener información física de la superficie del mar, como el oleaje, las corrientes marinas, y la dirección del viento. Además es posible utilizar estos sistemas en aplicaciones adicionales, como por ejemplo la detección de tsunamis y para aportar a la vigilancia de áreas más allá de la cobertura de los radares de microondas convencionales, específicamente en la detección y seguimiento de buques.

En este trabajo se describe la puesta en marcha de una metodología de detección de buques en movimiento mediante análisis de los espectros de potencia medidos por radares HF marinos en la costa de la Región del Biobío. Con ello se ha logrado determinar la posición, la velocidad, y la potencia retrodispersada por los buques.

En cuanto a las velocidades radiales medidas con los radares, se encuentra que ellas son notablemente similares a las velocidades informadas por los buques.

Se calculó tanto la sección eficaz de scattering como la ganancia de las antenas, a partir de la potencia retrodispersada, obteniéndose valores muy coherentes con valores teóricos y los informados por el fabricante.

Finalmente, determinamos los criterios y los algoritmos que permiten realizar una detección confiable y automática de los buques, eliminando los falsos aciertos.



# Tabla de Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	v
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Formulación de la Hipótesis	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Propagación de ondas HF-Ground Wave	4
2.1.1. Consideraciones para sistemas que usan ondas de tierra	5
2.2. Radares	6
2.2.1. Microondas	6
2.2.2. Satelitales	7
2.2.3. Radares HF Marinos	7
2.3. Principio de radar	8
2.3.1. Scattering	9
<b>3. Datos y Métodos</b>	<b>16</b>
3.1. Configuración del sistema	16
3.1.1. CHIOOS (Chilean Integrated Ocean Observing System)	16
3.1.2. Configuración	16
3.2. Buques	20
<b>4. Resultados</b>	<b>22</b>
4.1. Tracks	22
4.2. Frecuencia Doppler y Velocidades	23
4.3. Detección	24
4.4. Potencias	25
4.5. Algoritmo de detección	28
4.6. Ganancia y ajuste de la atenuación	29

4.7. Cálculo de RCS y de la ganancia . . . . .	35
4.8. Análisis por buque . . . . .	38
<b>5. Conclusiones y Discusión</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>44</b>





# Índice de figuras

2.1. Ondas electromagnéticas emitidas y recibidas desde un radar HF. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009. . . . .	10
2.2. Espectro de potencia típico medido por un radar HF. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009. . . . .	11
2.3. Sección transversal de scattering en función de la longitud de onda. Fuente: Wallace et al. 2006. . . . .	13
2.4. Secciones transversales de algunos cuerpos. Fuente: Wehner 1995 . . . . .	15
2.5. Atenuación teórica de HF (arbitrariamente normalizada) sobre un océano plano en términos de frecuencia a una conductividad de 4 A/Vm. Fuente: Gurgel et al 1999. . . . .	15
3.1. Aplicaciones del Radar HF WERA . . . . .	17
3.2. Antenas emisoras (a la izquierda) del radar en Faro Hualpén (al fondo). Fuente: <a href="http://chios.cl/?project=radar-faro-hualpen">http://chios.cl/?project=radar-faro-hualpen</a> . . . . .	18
3.3. Área de cobertura del radar Faro Hualpén. Fuente: Google Earth. . . . .	18
3.4. Configuración del radar. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009. . . . .	20
3.5. Ejemplo: Espectro de potencia retrodispersada. Fuente: Elaboración propia. . . . .	20
4.1. Trayectoria de los buques analizados en este estudio. Fuente: Elaboración propia. . . . .	22
4.2. Trayectoria del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	23
4.3. Velocidad AIS informada por Arkadia y la medición de su velocidad radial usando el radar de Faro Hualpén. Fuente: Elaboración propia. . . . .	24
4.4. Espectros de Potencia Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	25
4.5. Espectros de Potencia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	26
4.6. Curva de la potencia retrodispersada, con respecto a la distancia al radar, para todos los buques analizados. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
4.7. Potencia retrodispersada por todos los buques analizados. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
4.8. Curva Potencia con respecto a la distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	28
4.9. Se excluye el scattering de Bragg para la detección. Fuente: Elaboración propia. . . . .	29
4.10. Ejemplo de detección automática. Fuente: Elaboración propia. . . . .	30
4.11. Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering, con respecto a la distancia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	31

4.12. Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering, con respecto a la distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	31
4.13. Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering con respecto a la distancia del buque Arkadia, considerando el factor de Atenuación. Fuente: Elaboración propia. . . . .	32
4.14. K versus distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . .	33
4.15. K versus distancia del buque Corcovado. Fuente: Elaboración propia. . .	33
4.16. K versus distancia del buque Arkadia, considerando la Atenuación. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
4.17. K versus distancia del buque Corcovado, considerando la Atenuación. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
4.18. Francobordo de un buque. Fuente: <a href="http://es.kbismarck.com/glosario.html">es.kbismarck.com/glosario.html</a> . .	35
4.19. Curva ganancia v/s distancia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	37
4.20. Curva ganancia v/s distancia para Arkadia. Fuente: Elaboración propia. . .	39
4.21. Variación de la potencia desde cada pixel central de detección de Arkadia hacia puntos más y menos alejados radialmente (lado izquierdo) y con menor y mayor frecuencia Doppler (lado derecho). Se muestra $\pm 3$ puntos hacia cada "lado". Fuente: Elaboración propia. . . . .	39
4.22. Variación de la potencia para el primer punto de Lama II. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40



# Índice de tablas

2.1. Valores típicos de RCS. Fuente: Skolnik 2001. . . . .	14
3.1. Información de los buques analizados en este estudio. Fuente: mari- netraffic.com . . . . .	21
4.1. Calculo de valores de RCS considerando un blanco simple. Fuente: Elaboración propia. . . . .	35
4.2. Valores de ganancia en el caso del buque Arkadia $\sigma = 737,2 m^2$ . Fuente: Elaboración propia. . . . .	36
4.3. Cálculo de valores de RCS considerando un blanco complejo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	37
4.4. Valores de ganancia en el caso del buque Arkadia con $\sigma = 13359 m^2$ . Fuente: Elaboración propia. . . . .	38



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Una de las herramientas de monitoreo del océano costero que ha tenido más desarrollo en las últimas décadas es el radar HF marino. Estos equipos operan desde la costa, y permiten obtener información oceanográfica relevante hasta varias decenas de kilómetros mar adentro[3], usando ondas electromagnéticas decamétricas (frecuencias de varios MHz, a diferencia de los radares convencionales, que usan microondas).

Originalmente concebidos para medir corrientes marinas superficiales, con el tiempo se ha encontrado la forma de usarlos para también medir el espectro del oleaje y la dirección del viento en el océano costero. Adicionalmente, durante la última década se ha visto avances en su uso para detección de tsunamis y detección de buques.

Este último aspecto –la detección de buques desde la costa, hasta decenas y eventualmente algunos centenares de kilómetros hacia mar adentro– es particularmente relevante para Chile, dada la extensa costa que tiene nuestro país y las intensas actividades pesqueras e industriales que son desarrolladas en ese sector del territorio.

Se puede predecir con confianza que –tal como ha ocurrido en las últimas décadas en los países desarrollados– en apenas algunos años más habrá en nuestro país un número apreciable de radares HF marinos monitoreando el océano costero para medir corrientes marinas y oleaje. Extender su uso para la detección de buques entregaría una nueva y poderosa herramienta para la seguridad costera y para el monitoreo de actividades económicas tales como pesquerías, comercio marítimo y optimización del uso de los puertos, entre otras.

Es por esto que nace la idea de monitorear las costas de Chile, utilizando más eficazmente estos dispositivos para la exploración del océano, y así proporcionar en tiempo real una vigilancia persistente y activa de nuestro territorio.

En definitiva este estudio busca poner en marcha una metodología de detección automática de buques e intentar relacionar la potencia retrodispersada de éstos con sus parámetros físicos y geométricos.



## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

- Desarrollar la capacidad de detectar buques desde la costa usando el radar HF marino WERA ubicado en la bahía de San Vicente, junto al Faro Hualpén, y utilizar esa información para determinar parámetros relevantes de los buques.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar campañas de mediciones en caso de presencia de buques circulando en el área de cobertura del radar HF.
- Poner en marcha una metodología de detección de buques usando radares HF.
- Realizar un análisis de la detección, en cuanto a potencias, distancias, velocidades, tamaños, etc.
- Relacionar la potencia retrodispersada por los buques con sus parámetros físicos y geométricos.

## 1.3. Formulación de la Hipótesis

Los ecos de los buques, medidos por el radar, permiten determinar no solo la posición y velocidad de éstos, sino también algunas de sus características físicas.



# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Propagación de ondas HF-Ground Wave

Existen tres formas de propagación de ondas electromagnéticas en la atmósfera terrestre [1]:

- onda terrestre
- onda espacial
- onda celeste o ionósfera.

Las transmisiones de corta distancia y todos los transmisores de alta frecuencia son enviados por ondas de tierra. Esta es la forma de transmisión que es relevante para este estudio.

La onda superficial viaja a lo largo de la superficie de la tierra y sigue su curvatura durante el proceso de difracción. Durante su trayectoria, cuando golpea un objeto, la onda tiende a curvarse alrededor del objeto.

Cuando una onda superficial pasa sobre el suelo induce un voltaje a la tierra. El voltaje inducido toma la energía alejada de la onda superficial, atenuando la onda mientras se aleja de la antena transmisora. El uso de ondas polarizadas verticalmente permite minimizar la atenuación, ya que reducen el contacto del campo eléctrico de la onda con la tierra. Para ondas polarizadas horizontalmente el campo de la onda es paralelo a la superficie de la tierra y está en contacto constante con ella.

La propagación de ondas de tierra se ve afectada por las características eléctricas de la tierra y por la cantidad de difracción de las ondas a lo largo de la curvatura de la Tierra. La potencia de la onda de tierra en el receptor depende de la frecuencia del transmisor y de la potencia de salida, la forma y conductividad de la tierra a lo largo del trayecto de transmisión y las condiciones climáticas locales.

La cantidad de atenuación experimentada por la onda depende también, como se mencionó anteriormente, de las propiedades eléctricas del terreno sobre el cual la onda viaja. El mejor tipo de superficie es el que tiene buena conductividad eléctrica, ya que la onda experimenta menos atenuación y por lo tanto se propaga mejor.

Cada terreno tiene un grado diferente de conductividad. El agua salada tiene una conductividad alta, las superficies de tierra húmeda proporcionan una conductividad razonable, mientras que el terreno seco proporciona una mala conductividad y por lo tanto propagación deficiente.

La frecuencia de la radiación emitida es un factor importante en la atenuación de ondas superficiales. Mientras mayor es la frecuencia menor será la longitud de onda. A altas frecuencias, con sus longitudes de onda más cortas, las ondas no son difractadas sino que son absorbidas por la tierra en puntos cercanos al sitio de transmisión.

Debido a la pérdida por absorción la onda superficial es impráctica para transmisiones de larga distancia con frecuencias por encima de unos 2 MHz.

### 2.1.1. Consideraciones para sistemas que usan ondas de tierra

Hay una serie de factores que afectan la propagación de onda terrestre. Algunos son:

- Frecuencia: El uso de frecuencias más bajas resulta en menos pérdidas de tierra, por lo que aumenta el rango.
- Características de la antena: Usar polarización vertical reduce el efecto de la tierra de “cortar” el campo eléctrico de la onda.
- Potencia: Aumentar la potencia de salida resulta en una mayor distancia de transmisión.
- Hora del día: Las fuentes de ruido (naturales o artificiales) afectan la propagación de ondas de radio en diferentes momentos del día.
- Terreno: la mejor propagación se logra sobre terreno conductivo. El terreno conductor absorbe menos energía.

Además debemos considerar las características de los blancos (*targets*) a detectar o analizar

#### Tipos de blancos

- Tamaño: los blancos que presentan una superficie de reflexión más grande producen ecos más intensos.
- Forma: blancos de igual forma pueden dar ecos de diferente intensidad dependiendo de su su forma. Blancos en forma cóncava tenderán a concentrar las ondas reflejadas de radar hacia la antena, mientras que lo de forma convexa laa dispersan.
- Aspecto: El ángulo que forman con el haz del radar influye significativamente en la potencia retrodispersada. Cuanto más cercano a  $90^\circ$  es el ángulo, mayor es el eco que produce.



- **Textura:** puede modificar los efectos de la forma y el aspecto. Una textura plana representa buenas cualidades para la reflexión.
- **Composición:** la habilidad de diferentes sustancias de reflejar las ondas de radar depende de sus cualidades eléctricas intrínsecas. El metal y el agua presentan buenos ecos. En el caso del hielo, en cambio, depende de su aspecto. Los blancos de madera y fibra de vidrio presentan malos ecos. En el caso de una costa depende del tipo de vegetación y de las cantidades de roca y minerales que ésta contenga.

## 2.2. Radares

Tradicionalmente se denomina “radares HF marinos” a los equipos que usan ondas electromagnéticas decamétricas para estudiar las propiedades del océano costero. En estricto rigor, debiera considerársele estaciones de radio. En esta sección se discutirán propiedades generales de los auténticos “radares”, que usan microondas, tanto en el caso de los usados en buques y desde satélites, y de los “radares” HF marinos. Todos ellos permiten detectar buques, en particular.

### 2.2.1. Microondas

Los radares microondas pueden ser [2]:

- Pulsado coherente
- Onda continua
- Frecuencia modulada

El radar emite ondas de radio frecuencia y se reflejará sobre la mayoría de los objetos metálicos, concreto, árboles, madera, etc.

El principio básico del radar de pulsado coherente es que el transmisor emite ondas electromagnéticas en una serie de pulsaciones cortas y potentes, para quedar inactivo durante el resto del ciclo. Durante el período de descanso el transmisor puede recibir señales de eco, cuyo tiempo de vuelo puede usarse para determinar la distancia hasta la superficie reflectora.

En el radar de onda continua (CW) en cambio, el transmisor emite una señal más o menos continua, montada en una señal de frecuencia mucho más alta. Si encuentra una superficie inmóvil, la frecuencia de la señal reflejada será igual a la de la señal transmitida. Si detecta una diferencia de frecuencias, esa diferencia puede utilizarse como indicación de movimiento del blanco.

Las ondas de radar viajan a una velocidad casi constante, por lo tanto el tiempo requerido de una señal transmitida para viajar al objetivo y retornar como un eco a la fuente (antena) es la medida de la distancia al objetivo.

Si la señal demora un tiempo  $t$  en ir y volver, la distancia  $D$  a la que se encuentra el eco detectado es igual a la mitad del espacio recorrido por la señal

$$D = \frac{vt}{2} \quad (2.1)$$

Los (verdaderos) radares marinos trabajan en la banda SHF: 3GHz (banda S) y 9.4 GHz (banda X), que corresponden a  $\lambda = 10$  cm y  $\lambda = 3$  cm, respectivamente. La potencia de transmisión de los radares marinos oscila entre 3 y 60 watts.

### 2.2.2. Satelitales

En general los radares transportados en los satélites son radares de apertura sintética (SAR), ya que son radares activos que emiten la energía en el intervalo de frecuencias de microondas en un período pequeño de tiempo y reciben los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos, dando lugar a una apertura sintética, Esto quiere decir que debido, a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial (del orden de varios kilómetros cada segundo), la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño. El blanco permanece en el haz de la antena durante unos instantes y es observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena.

Los radares de apertura sintética tienen también independencia de las condiciones meteorológicas, una amplia cobertura y una resolución espacial de metros.

Como consecuencia del desplazamiento del satélite, el efecto Doppler que se produce permite tener una mejor resolución azimutal.

Estos factores hacen posible la detección de un blanco. Sin embargo el procesamiento de datos obtenidos por SAR es complicado (semi automático) debido a un gran volumen de información correspondiente a cada imagen, junto a esto el período de revisita de los satélites hace impráctico el seguimiento del objetivo en tiempo real.

Las características del SAR permiten detectar distintos fenómenos atmosféricos y oceánicos, entre los cuales se cuenta:

- Detección de clorofila
- Corrientes, nivel del mar
- Frentes oceánicos
- Oleaje
- Viento superficial
- Derrames de contaminantes en el océano

### 2.2.3. Radares HF Marinos

Un radar marino de alta frecuencia funciona igual que el radar convencional de microondas, en el sentido de que se basa en la emisión de ondas electromagnéticas y el estudio de su eco tras impactar en el blanco a analizar, en este caso la superficie del mar. La diferencia fundamental está en la frecuencia de dichas ondas. En cada caso, se emplea la adecuada para que la señal sea capaz de rebotar eficazmente en el

blanco y poder obtener un retorno claro. En el océano, dicho retorno óptimo se sitúa en el rango denominado Alta Frecuencia (HF), que varía desde unos 3 a unos 30 MHz. Al trabajar en esta banda, las ondas electromagnéticas rebotan eficazmente en las olas, generando la necesaria señal.

Al trabajar en este rango de frecuencias podemos obtener un alcance de hasta los 300 km [3].

**Aplicaciones:** Algunos de los usos de los radares HF marinos son [4]:

- Medición de corrientes superficiales
- Medición del espectro de energía del oleaje
- Determinación de la dirección del viento sobre el océano
- Detección de tsunamis
- Detección de buques.

**Radares WERA:** El sistema WERA es un nuevo desarrollo llevado a cabo en 1995 en la Universidad de Hamburgo, Alemania por Klaus-Werner Gurgel et al [5]. Este radar permite una amplia gama de frecuencias de trabajo, resolución espacial, y configuraciones de antena, con el fin de operar como un radar oceanográfico de baja potencia (transmite a una potencia de unos 30W), y proporciona una amplia y simultánea área de mediciones de corrientes superficiales, las olas del mar y parámetros del viento.

Una de sus ventajas principales es la posibilidad de conectar diferentes configuraciones de antenas de recepción. Cuando se opera con un conjunto lineal, la información sobre el estado del mar se puede obtener a través de bandas espectrales de segundo orden.

Otra ventaja es la flexibilidad en la resolución de alcance entre 0,3 km y 1,2 km. Esto se logra mediante la transmisión de chirps de frecuencia modulada en onda continua (FMCW) en lugar de pulsos de onda continua (CW).

### 2.3. Principio de radar

La capacidad de un sistema de radar para detectar un blanco es fundamentada a través de la ecuación del radar. La ecuación del radar representa las dependencias físicas de la potencia transmitida, es decir, la propagación de la onda hasta la recepción de las señales del eco. La potencia que regresa a la antena receptora viene dada por la ecuación del radar, dependiendo de la potencia transmitida, de la distancia al blanco y de las características reflectantes del objetivo (descrita como la sección transversal del radar  $\sigma$ ).

En el caso de un sistema biestático de antenas, la potencia retrodispersada se puede representar por [6]:

$$\Pi_b = \Pi_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4 \quad (2.2)$$

donde  $\sigma$  es la sección transversal del objeto dispersante,  $G$  es la ganancia de las antenas (suponiendo que emisoras y receptoras tienen la misma ganancia),  $\lambda$  es la longitud de onda de las ondas electromagnéticas usadas,  $d$  es la distancia radial entre el objeto dispersante y el radar,  $\Pi_e$  y  $\Pi_b$  son, respectivamente, las potencias emitida y retrodispersada, y  $A$  es el factor de atenuación del sistema.

Si analizamos esta ecuación, podemos descomponerla

$$\frac{\Pi_b}{\Pi_e} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4$$

$$10 \log \left( \frac{\Pi_b}{\Pi_e} \right) = 10 \log \left( \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4 \right)$$

donde  $10 \log(\Pi_b/\Pi_e)$  es la potencia relativa  $\Pi_B$  medida en dB (decibeles). Entonces

$$\Pi_B = 10 \log \left( \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4 \right) \quad (2.3)$$

Al aplicar la función anti-logaritmo se obtiene

$$10^{\frac{\Pi_B}{10}} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4$$

lo que nos permite obtener información de la ganancia de las antenas ( $G$ ) y la sección eficaz de scattering ( $\sigma$ ):

$$\frac{4\pi^3 d^4 10^{\frac{\Pi_B}{10}}}{\lambda^2 A^4} = G^2 \sigma \quad (2.4)$$

Si podemos asumir como constantes la longitud de onda, la ganancia de las antenas y la sección eficaz de scattering, se puede aislar todas las constantes en un solo término (lado derecho de la siguiente ecuación), para escribir

$$\frac{d^4 10^{(\Pi_B/10)}}{A^4} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3} \quad (2.5)$$

$$\frac{d^4 10^{(\Pi_B/10)}}{A^4} = K \quad (2.6)$$

### 2.3.1. Scattering

En el caso de este estudio, hay dos tipos de scattering que son relevantes. Uno es el scattering de Bragg, que describe la interacción entre las ondas electromagnéticas con el oleaje, y que permite conocer las características físicas del océano, y el otro es el scattering de Mie, que describe la interacción entre las ondas electromagnéticas y un objeto sólido, tal como un buque.

**Scattering de Bragg** En 1912 se encontró que, al iluminar sólidos cristalinos con rayos X, la potencia retrodispersada es particularmente intensa si la distancia entre dispersores es la mitad de la longitud de onda de la radiación. Este proceso se denomina *difracción de Bragg*, y esa relación entre la longitud de onda y la separación entre dispersores es llamada *condición de Bragg*. Luego, en 1955, Crombie explicó la retrodispersión de las ondas electromagnéticas de la superficie del mar basándose en esta condición de Bragg [7].

La figura (2.1) describe cómo esta condición se aplica al océano. En este caso, la radiación electromagnética de 10 m de longitud de onda se irradia sobre el océano por una antena de radar HF instalada en la playa; esta radiación interactúa con ondas de gravedad (olas) de superficie de 5 m de longitud de onda, vuelve al radar, y puede ser recogida por las antenas receptoras.

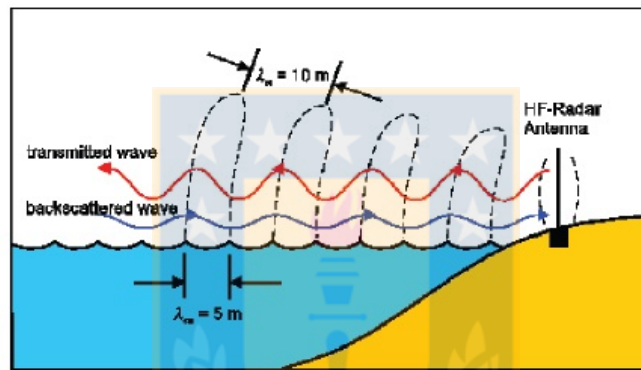


Figura 2.1: Ondas electromagnéticas emitidas y recibidas desde un radar HF. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009.

Como las longitudes de onda típicas de las ondas de gravedad marinas (olas) están en la escala de metros a decenas de metros, las ondas electromagnéticas útiles corresponden a las ondas de radio con longitudes de onda entre unos 3 y 30 MHz, como mencionamos anteriormente, que corresponden a ondas de radio en la banda “HF”, o “alta frecuencia”.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10 \text{ Hz/m}} = 30 \text{ MHz}$$

En 1972 Barrick derivó las expresiones teóricas para describir las contribuciones de los máximos de primer y segundo orden en el espectro Doppler de una señal de retrodispersión de radar HF de la superficie del océano [8]. El análisis de Barrick se refiere al espectro Doppler de la sección transversal de retrodispersión del radar para todo el espectro direccional de olas en el océano (Figura 2.2).

La base para la interpretación de los máximos de retrodispersión es el concepto de *sección transversal de dispersión*,  $\sigma$ , que –en términos generales– cuantifica cuán grande es la zona de destino, vista por la radiación entrante. Como cualquier área,  $\sigma$  se mide en  $\text{m}^2$ .

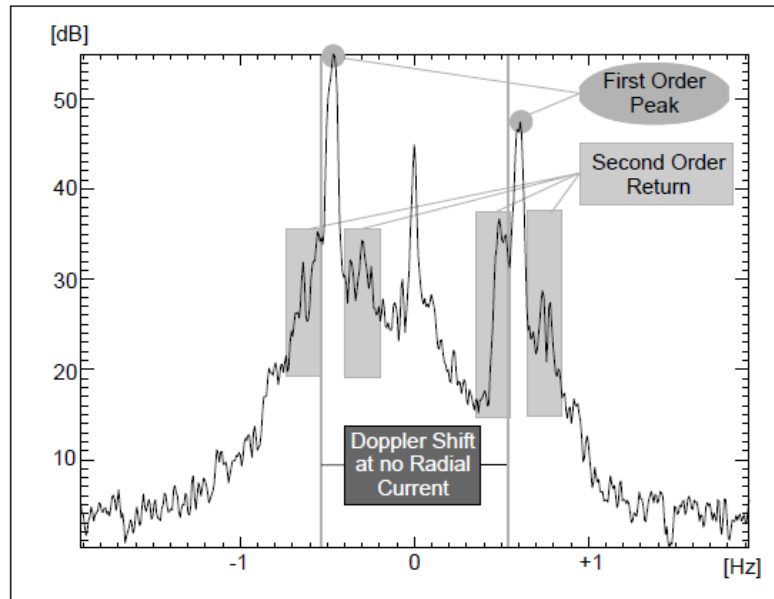


Figura 2.2: Espectro de potencia típico medido por un radar HF. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009.

El resultado de Barrick[8] es

$$\sigma^{(1)}(\omega) = |C_1|^2 4(2\pi)^3 k_0^4 (S_{-2k_0} \delta[\Delta\omega + 2k_0 \cdot V - \sqrt{2gk_0}] + S_{2k_0} \delta[\Delta\omega + 2k_0 \cdot V + \sqrt{2gk_0}]) \quad (2.7)$$

donde  $|C_1|^2 = 2/\pi^2$ ,  $k_0$  es el vector de onda ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ) de la radiación transmitida,  $V$  es la velocidad de la superficie del agua, y  $\delta$  representa la delta de Dirac.

Como  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ , con  $\omega_0 = 2\pi f_0$  la frecuencia angular de la radiación emitida, la delta de Dirac asume valores distintos de cero cuando

$$\omega = \omega_0 - 2k_0 \cdot V \pm \sqrt{2gk_0} \quad (2.8)$$

Si no hay corrientes superficiales la ecuación (2.7) representaría sólo dos líneas verticales, situadas simétricamente a ambos lados de la ordenada y una distancia  $(\Delta f)_B$  de ella, en que

$$(\Delta f)_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2gk_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi}{\lambda_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi g f_0}{c}} \quad (2.9)$$

Éste es entonces el espectro esperado en el caso de no tener corrientes superficiales: un máximo que tiene la intensidad  $S_{2k_0}$ , y otro  $S_{-2k_0}$ , situados en  $\pm(\Delta f)_B$  del espectro retrodisperso.

En el caso de los radares WERA usados en este estudio, la frecuencia de Bragg corresponde a 0,4098 Hz, o sea unos 0,41 Hz.

**Scattering de Mie** Cuando la longitud de onda de la radiación es del mismo orden o mayor que el tamaño del objeto con el que ésta interactúa, se tiene scattering de Mie [9].

Definiendo el “parámetro de tamaño” como

$$x = \frac{2\pi n_{med} a}{\lambda} \quad (2.10)$$

en que  $a$  es el radio del objeto dispersante, supuesto esférico, una partícula esférica de radio  $a$  tiene una sección transversal de scattering (de Mie) dada por

$$\sigma_{Mie} = \left( \frac{2\pi}{k_{med}^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2.11)$$

en que  $k_{med} = 2\pi n_{med}/\lambda_0$ .

Los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  están dados por

$$a_n = \frac{\mu m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'}$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'}$$

en que los  $j_n(x)$  son las funciones esféricas de Bessel del primer tipo, los  $h_n(x)$  son las funciones esféricas de Hankel,  $\mu_1$  y  $\mu$  son las permeabilidades magnéticas de la esfera y del medio, respectivamente, y  $m$  es la razón entre los índices de refracción de la partícula y del medio,  $n_{esfera}/n_{med}$ .

La Figura (2.3) [10], muestra cómo depende la sección eficaz de Mie con respecto a la longitud de onda para el caso de una esfera dieléctrica de radio  $a$ .

**Efecto Doppler** El efecto Doppler se utiliza en algunos tipos de radar para medir la velocidad de los objetos detectados. Un haz de radar se dispara a un blanco móvil (por ejemplo, un buque como es en nuestro caso) a medida que se acerca o se aleja de la fuente de radar. Cada onda sucesiva de radar tiene que viajar más lejos para alcanzar el objetivo, antes de ser reflejada y detectada de nuevo cerca de la fuente. Como cada onda tiene que moverse más lejos, la distancia entre cada onda aumenta, produciendo un aumento de la longitud de onda. En algunas situaciones, el haz del radar se utiliza con el objetivo en movimiento, y si se acerca al blanco observado, entonces cada onda sucesiva recorre una distancia menor, produciendo una disminución de la longitud de onda. En cualquiera de estas situaciones, los cálculos del efecto Doppler permiten determinar con precisión la velocidad del objetivo observado por el radar.

Estos radares HF que trabajan con ondas superficiales son dispositivos coherentes que discriminan entre los ecos objetivo (un buque por ejemplo) y el eco del mar en base a sus diferentes corrimientos Doppler de frecuencia [11].

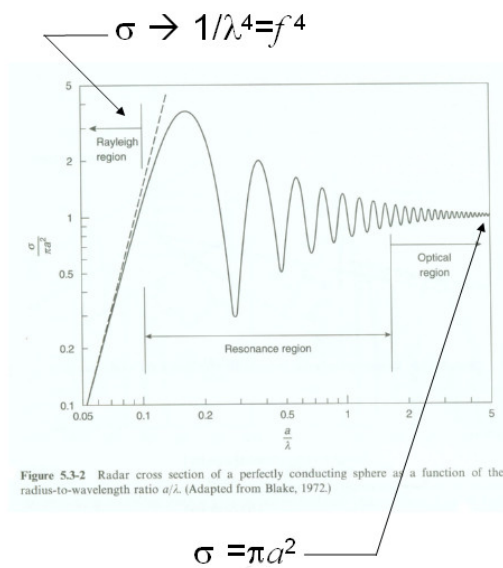


Figura 2.3: Sección transversal de scattering en función de la longitud de onda. Fuente: Wallace et al. 2006.

Un eco objetivo es principalmente el resultado de la dispersión de estructuras verticales, y estos ecos experimentan un desplazamiento Doppler que es proporcional a la velocidad radial  $V$  del objetivo, la que a su vez es linealmente dependiente de la frecuencia portadora del radar, según la ecuación (2.12).

$$f_{dt} = \frac{2V f_c}{c} \quad (2.12)$$

Para la rapidez típica de los buques grandes (unos 16 nudos), y dada la frecuencia de operación del radar en Faro Hualpén (16,15 MHz), este corrimiento en frecuencia es el orden de unos 0,9 Hz.

**Sección transversal para el radar** La sección transversal para el radar o *Radar Cross Section* (RCS) es una medida de cuán detectable es un objeto mediante radar. Una sección transversal mayor indica que un objeto es más fácil de detectar.

Cuando las ondas de radar se transmiten sobre un blanco, solo una cierta cantidad de energía es reflejada de vuelta. Un número de diferentes factores determinan qué cantidad de energía electromagnética regresa a la fuente, entre ellos:

- El material de que está hecho
- La rugosidad del material y sus condiciones dieléctricas
- El tamaño absoluto del blanco
- El tamaño relativo del blanco (en relación con la longitud de onda del radar)
- El ángulo de incidencia
- El ángulo reflejado
- La potencia de la señal del radar emisor
- La distancia entre el radar y el blanco



Las ondas electromagnéticas se dispersan cuando hay cambios significativos en las constantes dieléctricas y diamagnéticas. Esto significa que un objeto sólido en el aire o en el vacío (es decir, un cambio en la densidad atómica entre el objeto y su entorno) producirá dispersión en las ondas de radio. Esto ocurre particularmente en el caso de los materiales conductores como el metal, lo que hace que el radar sea especialmente indicado para la detección de aeronaves y buques.

La tabla (2.1) muestra valores aproximados de RCS [12]

Objeto	RCS ( $m^2$ )
Avioneta	1
Misil	0.1
Avión de combate pequeño	2
Avión de combate grande	6
Jumbo jet	100
Bombardero grande	40
Barco (5 kilotonnes de desplazamiento, banda L)	10000
Automóvil / Camión pequeño	100-200
Persona	1
Pájaro	0.01
Insecto	0.0001

Tabla 2.1: Valores típicos de RCS. Fuente: Skolnik 2001.

Existen formas de disminuir la RCS utilizando materiales que absorben las ondas, utilizando materiales no metálicos en la fabricación de aeronaves, carbono o fibra de vidrio. También evitando utilizar ángulos rectos con el uso de formas suaves y armoniosos, utilizando también diferentes tipos de revestimientos que disminuyan la potencia retrodispersada al radar.

La Figura (2.4) enumera las secciones transversales teóricas de algunas formas geométricas ideales o blancos simples, que podrían en cualquier ángulo de visión del objetivo aproximarse a ciertas porciones de las características físicas del blanco [6]. Para la dimensión física “a” una esfera produce la menor RCS que cualquiera de las formas, y su RCS es independiente de la longitud de onda para  $a \gg \lambda$ , que es llamada la región óptica.

La última columna de la tabla de la figura (2.4) enlista valores teóricos de RCS normalizados por una sección transversal física  $A$  de una forma ideal para  $a = 4\lambda$ , que nos da una idea de RCS para diferentes representaciones de forma ideal de porciones de objetivos reales.

Hay poca información en la literatura sobre el cálculo de la RCS para blancos más complejos, como buques de diversos tamaños y en diferentes aspectos. Una estimación razonable de la sección transversal del radar de un buque puede ser aproximada usando la fórmula empírica [12]:

$$\sigma = 52 f^{1/2} D^{3/2} \quad (2.13)$$

**Table 2.1**  
Radar Cross Section of Some Ideal Geometric Shapes

Geometric Shape	Dimension	Cross-Sectional Area* ( $sA$ )	Maximum Radar Cross Section† ( $\sigma$ )	$\sigma/sA$	
					$a = 4\lambda$
Sphere	Radius $a$	$\pi a^2$	$\pi a^2$	1	1
Cylinder	$l \times$ radius $a$	$2la$	$\frac{2\pi a^2 l}{\lambda}$	$\frac{\pi a}{\lambda}$	$4\pi$
Flat plate	(thin wall, open ended) $a \times a$	$a^2$	$\frac{4\pi a^4}{\lambda^2}$	(for $l = a$ ) $\frac{4\pi a^2}{\lambda^2}$	(for $l = a$ ) $64\pi$
Dihedral corner	$a, a, a$	$a^2\sqrt{2}$	$\frac{8\pi a^4}{\lambda^2}$	$\frac{8\pi a^2}{\lambda^2}$	$\frac{128\pi}{\sqrt{2}}$
Square trihedral	$a, a, a$	$\frac{3a^2}{2}$	$\frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	$\frac{8\pi a^2}{\lambda^2}$	$128\pi$

\*Seen at orientation for maximum RCS.

†Highly accurate only for  $a \gg \lambda$ .

Figura 2.4: Secciones transversales de algunos cuerpos. Fuente: Wehner 1995

donde  $D$  es el desplazamiento a plena carga del buque en kilotonnes y  $f$  es la frecuencia portadora del radar en MHz. Esta ecuación es una descripción estática del RCS, que es constante para un objetivo determinado cuando  $f$  es estable. Y se derivó de mediciones realizadas en Bandas X, S y L [13], y se extendió como una buena aproximación para la banda HF [14]. La fórmula, sin embargo, no considera la importancia del efecto de la altura del buque en el RCS del buque.

**Atenuación** La atenuación de la onda electromagnética que viaja a lo largo de la superficie del mar depende de la frecuencia del radar y de la conductividad (o sea de la salinidad) del agua.

La figura (2.5), [3], muestra como varía la atenuación con la distancia para distintas frecuencias del radar y para diferentes valores de la conductividad eléctrica del océano.

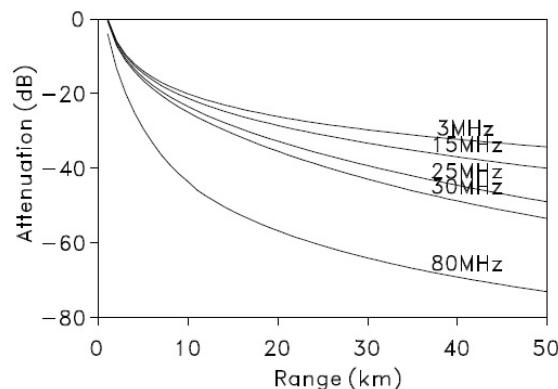


Figura 2.5: Atenuación teórica de HF (arbitrariamente normalizada) sobre un océano plano en términos de frecuencia a una conductividad de 4 A/Vm. Fuente: Gurgel et al 1999.

# Capítulo 3

## Datos y Métodos

### 3.1. Configuración del sistema

#### 3.1.1. CHIOOS (Chilean Integrated Ocean Observing System)

CHIOOS es un proyecto desarrollado en el departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción, que tiene como objetivo poner en marcha un Sistema Integrado de Observación Oceánica en la región del Biobío, donde la principal herramienta tecnológica utilizada para la recolección de datos son los Radares HF (High Frequency) marinos WERA.

Entre las principales actividades que se desarrollan dentro del proyecto se tiene:

- Monitoreo de corrientes superficiales. Figura (3.1a)
- Oleaje. Figura (3.1b)
- Dirección de viento. Figura (3.1c)
- Detección de Tsunami. Figura (3.1d)

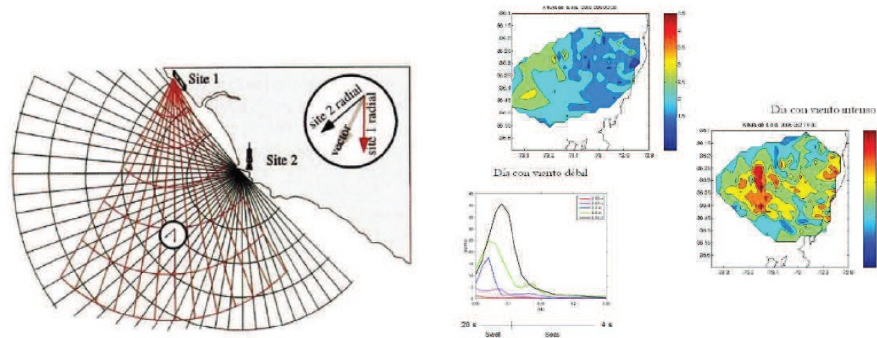
Todo esto se obtiene mediante el estudio de las medidas de scattering de Bragg de primer y segundo orden.

Es en el marco de este proyecto donde se busca implementar una técnica de detección de buques.

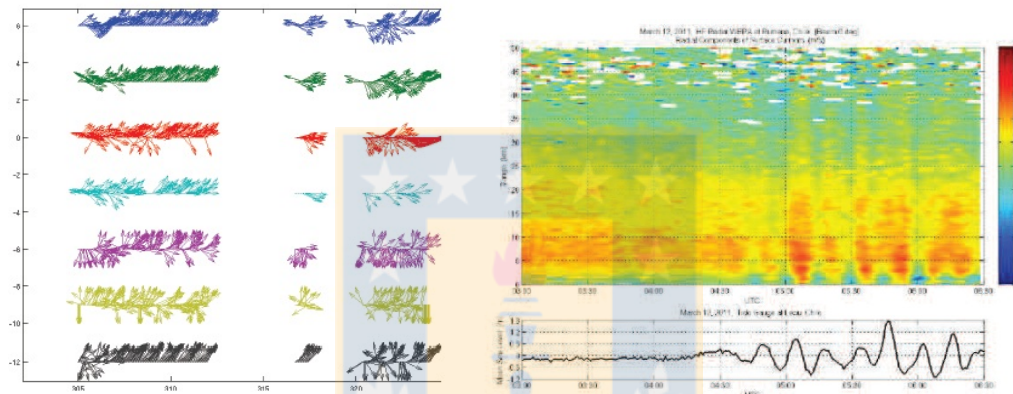
#### 3.1.2. Configuración

Como su nombre lo indica, los Radares HF marinos WERA son radares marinos que trabajan en la “banda de alta frecuencia”, esto es entre 3MHz y 30 MHz, con longitudes de onda entre unos 100 y 10 metros. En particular, el Radar WERA ubicado en Faro Hualpén trabaja en una frecuencia específica de 16.15 MHz, lo que implica una longitud de onda de 18.6 metros.

En general estos radares funcionan con un arreglo de varias antenas transmisoras y receptoras.



(a) Corriente horizontal completa obtenida a partir de dos componentes radiales de olas significativas y algunos espectros no perpendiculares. Fuente: J. Paduan et al. 2010  
 (b) Distribuciones espaciales de altura de olas significativas y algunos espectros obtenidos cerca de Concepción. Fuente: N. Almonacid 2013.



(c) Dirección de Viento. Fuente: Y. Olmos, 2014.  
 (d) Corrientes dentro y fuera de la costa durante la llegada a Rumena (Chile) del tsunami de Japón 2011. Fuente: D. Figueroa et al. 2014.

Figura 3.1: Aplicaciones del Radar HF WERA

En nuestro caso el arreglo de antenas comprende 4 antenas transmisoras (para concentrar el patrón de radiación en la región de interés, ver Figura 3.2) y 8 antenas receptoras.

Estas antenas se encuentran separadas por una distancia que debe estar entre los 30 y los 200 metros, en nuestro caso son 200 metros. Y transmite una potencia de 28 watts al océano (7 watts por cada antena transmisora), con un ancho de banda de 150 kHz.

El fabricante ha realizado algunas simulaciones para el arreglo de antenas de Faro Hualpén, incluyendo el patrón de radiación y la ganancia de las antenas. Con condiciones de tierra ideales (tierra conductora perfecta) la ganancia sería de aproximadamente 4 dBi. Sin embargo, para las condiciones presentes en el Radar HF WERA ubicado en el Faro de Hualpén, la onda de tierra tendría alrededor de -2 dBi. Entonces, desde el fabricante, se sugiere estimar una ganancia muy baja, sensiblemente menor a -2 dBi.



Figura 3.2: Antenas emisoras (a la izquierda) del radar en Faro Hualpén (al fondo). Fuente: <http://chioos.cl/?project=radar-faro-hualpen>.

El lugar específico donde está ubicado el Radar HF WERA es a un costado de la bahía de San Vicente, justo al lado del Faro Hualpén. La figura (3.3) muestra el área de cobertura con un abanico de  $100^\circ$  de apertura, 80 km de alcance típico y una resolución espacial radial de 1 km.



Figura 3.3: Área de cobertura del radar Faro Hualpén. Fuente: Google Earth.

En la figura (3.4) podemos observar como se realiza la configuración del radar antes de iniciar la medición. Específicamente en la figura (3.4a) es donde realizamos la configuración[19]. Algunos parámetros que debemos tener en consideración son los siguientes:

- Acquisition Modes: Aquí es donde ponemos la forma de adquisición de los datos, o de que forma medirá el radar. En nuestro caso el radar está configurado en modo permanente, pero es posible hacer mediciones individuales (single acquisition, también hacer test de mediciones y calibraciones al radar)
- Process after Measurement: El radar ofrece tres opciones de procesamiento posterior de datos WERA. Sea echos se ejecuta al final del ciclo de medición

y puede procesar velocidades de corriente radial a partir de los datos medidos y transferir los resultados a un servidor central. `Calibr. data` se ejecuta al final del ciclo de medición y puede procesar los datos de calibración y copiar este resultado para la recalibración. `FM raw data` se ejecuta al final del ciclo de medición y verifica los datos brutos de FM.

- **Location:** Donde está ubicado el radar, en nuestro caso es Hualpén
- **Latitude + Longitude:** Las coordenadas de la ubicación del radar, en nuestro caso es, Latitud 36.74778 S, Longitud 73.19139 W.
- **Freq. Management + Prescan + Adapt Frequency:** El rango de frecuencias permitido está entre 16.050 a 16.250 MHz. `Prescan` inicia una exploración de frecuencia de 1 minuto 100 segundos antes de cada ciclo de medición automático. Los datos de escaneado se almacenarán en la misma ubicación que las mediciones. `Adapt Frequency` procesa los datos de escaneado y adapta automáticamente la frecuencia de trabajo.
- **Working Frequency:** es donde ingresamos la frecuencia de trabajo, en nuestro caso es 16.150 MHz.
- **Range Cell Depth:** Es la resolución radial. En nuestro caso es 1000 m para la frecuencia de trabajo que estamos utilizando.
- **Samples per Data Run:** Indica cuantos barridos por medición hará. En nuestro caso son 512 muestras
- **Range Offset:** Este parámetro se utiliza para corregir el rango absoluto medido por el WERA por la compensación introducida por los retardos de cable. Tanto las longitudes de cable Rx como Tx deben tenerse en cuenta

La página de estado (Figura 3.4b) refleja el estado real del sistema WERA y se actualiza automáticamente cada 5 segundos.

La última línea muestra el estado del ciclo de medición en el lado izquierdo y el estado de los ciclos automáticos en el lado derecho.

El radar WERA ubicado en Hualpén está trabajando en modo permanente o de adquisición continua, generando archivos de datos llamados `USORT`. Estos archivos contienen información de una medición de 33 segundos, por lo que es necesario formar un bloque de archivos `USORT` y así tener mediciones en un tiempo mas extenso. Para esto utilizamos el programa `usort_to_sort` y así formamos archivos `SORT` de 3 minutos aproximadamente, los cuales podemos procesar con el programa llamado `Plott_WERA_Sort_RCs_Beam_ASCII`. Este último programa nos entrega datos en formato `.asc`, lo que nos permite ver los espectros Rango-Doppler (ver Figura 3.5) y así obtener los datos de potencia retrodispersada a diferentes distancias y en el ángulo que se desee.

WeraDesk at Venice	
Acquisition Mode:	STOP
Process after Measurement:	<input type="checkbox"/> sea echos <input type="checkbox"/> calibr. data <input type="checkbox"/> FM raw data
Time Slot:	Master
FMICW Mode:	off
Calibration Power:	000 [dB] <input type="checkbox"/> TX off
Location:	Venice
True North:	288 ° [1 to 360]
Latitude:	27 ° 37.00 ' N
Longitude:	82 ° 44.20 ' W
Time Code:	UTC
Cont. Acqui. Start Time:	25 [min]
Freq. Management:	12.000 to 13.000 MHz <input checked="" type="checkbox"/> Prescan <input checked="" type="checkbox"/> Adapt Frequency
Bandwidth Reduction:	1200 m [125.0 kHz] max. allowed Range Cell Depth
Working Frequency:	12.700 MHz
Range Cell Depth:	1200 m [125.0 kHz]
Samples per Data Run:	64
Chirp Length:	0.260000 [sec]
Range Offset:	500 [m]
Cycle Repetition Time:	10 [min]
Number of Range Cells:	100
Maximum Range:	120 [km]
Data Acquisition Time:	0 : 17 [min:sec]
RX Offset:	80.0Hz
Data Path:	/home/wera/data/rec_tst/ <a href="#">Open Status Window</a>
File Location ID:	tst [3 characters] <a href="#">Close This Window</a>
Comment:	wames System #4REC13.4
Submit Reset Vers. 2.5.3	

WeraDesk Status at Venice	
Acquisition Mode:	STOP
Process after Measurement:	<input type="checkbox"/> Sea Echocs <input type="checkbox"/> Calibr. Data <input type="checkbox"/> FM Raw Data
Time Slot:	Master
FMICW Mode:	off
Calibration Power:	00 [dB] <input type="checkbox"/> TX off
Location:	Venice
True North:	288 ° [1 to 360]
Latitude:	27 ° 37.00 ' N
Longitude:	82 ° 44.20 ' W
Time Code:	UTC
Cont. Acqui. Start Time:	25 [min]
Freq. Management:	12.000 to 13.000 [MHz] <input checked="" type="checkbox"/> Prescan <input checked="" type="checkbox"/> Adapt Frequency
Bandwidth Reduction:	1200 to 1200 [m]
Working Frequency:	12.700 [MHz]
Range Cell Depth:	1200 [m]
Samples per Data Run:	64
Chirp Length:	0.260000 [sec]
Range Offset:	500 [m]
Cycle Repetition Time:	10 [min]
Number of Range Cells:	100
Maximum Range:	120 [km]
Data Acquisition Time:	0 : 17 [min:sec]
RX Offset:	80 [Hz]
Data Path:	/home/wera/data/rec_tst/ <a href="#">Close This Window</a>
File Location ID:	tst [3 characters] <a href="#">Close This Window</a>
Comment:	wames System #4REC13.4
Status:	Stoppad
Automatic Cycles:	Disabled
Available Diskspace on /:	3.6G (72%used)
Vers. 2.5.3	

(a) Centro de control de escritorio WERA.

(b) Ventana de estado de escritorio WERA.

Figura 3.4: Configuración del radar. Fuente: Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, 2009.

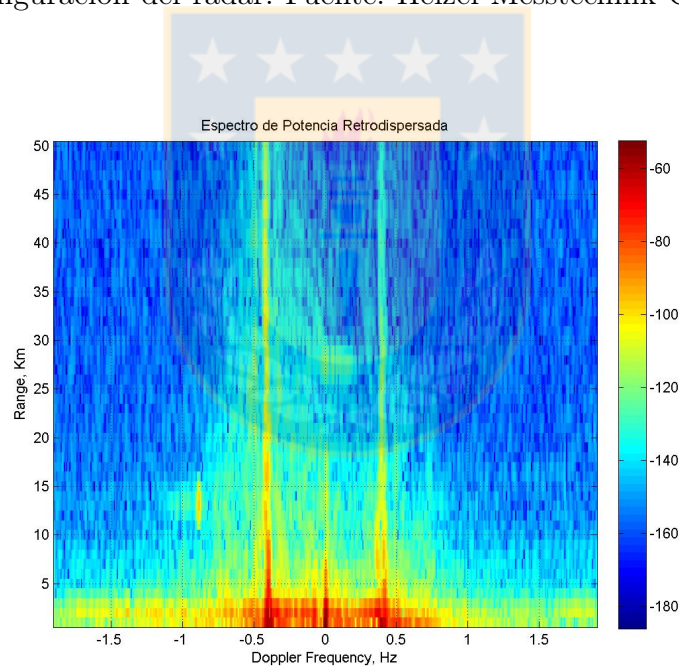


Figura 3.5: Ejemplo: Espectro de potencia retrodispersada. Fuente: Elaboración propia.

## 3.2. Buques

Los buques usados en este estudio corresponden a buques comerciales que hacen recaladas en el puerto San Vicente (Región del Biobío), muy cercanamente al área de cobertura del radar ubicado en Faro Hualpén (ver figura 3.3). De hecho, todo buque que entra o sale del puerto San Vicente necesariamente pasa por la mencionada área de cobertura. Los tamaños típicos de los buques considerados son de al menos 100 metros (eslora), y son construidos de acero.

Para este estudio se realizaron mediciones de 8 buques entre los días 26 de Abril y 04 de Mayo del año 2017. Gracias a la información obtenida a través del portal <http://www.marinetraffic.com> y la colaboración de la Capitanía de Puerto de San Vicente, se pudo analizar buques saliendo y entrando al puerto, lo que permitió seguir su trayectoria y estudiar como decae la potencia con respecto a la distancia.

En la tabla (3.1) se muestran las características de los buques considerados para este estudio.

Buque	Dirección	Fecha	Hora UTC	Eslora (m)	Manga (m)	Descripción
Arkadia	Saliendo	26/04/17	02:20	170	25	Container Ship 2001
Skagen Maersk	Saliendo	26/04/17	08:27	347	43	Container Ship 1999
Cabo Froward	Saliendo	28/04/17	11:28	228	32	Oil Products Tanker 2006
Cabo FrowardII	Entrando	29/04/17	11:39	228	32	
Corcovado	Saliendo	29/04/17	17:06	138	21	General cargo 2004
Lama	Entrando	28/04/17	18:01	120	21	Oil/Chemical Tanker 1999
LamaII	Saliendo	29/04/17	18:01	120	21	
Limarí	Entrando	29/04/17	17:06	268	32	Container Ship 2005
Overseas	Entrando	29/04/17	19:20	183	32	Oil/Chemical Tanker 2004
Secreto	Entrando	04/05/17	12:51	225	36	LPG Tanker 2016

Tabla 3.1: Información de los buques analizados en este estudio. Fuente: marinetraffic.com



# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Tracks

Los buques analizados en este trabajo fueron: Arkadia, Skagen Maersk, Cabo Froward (dos veces), Corcovado, Lama (dos veces), Limarí, Overseas y Secreto.

En la figura (4.1) podemos observar las trayectorias de todos los buques en estudio. Estos datos se obtuvieron gracias a la información disponible en el portal [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com), donde cada buque indica su posición y velocidad en un intervalo de tiempo de 2 ó 3 minutos, en coordenadas de latitud y longitud.

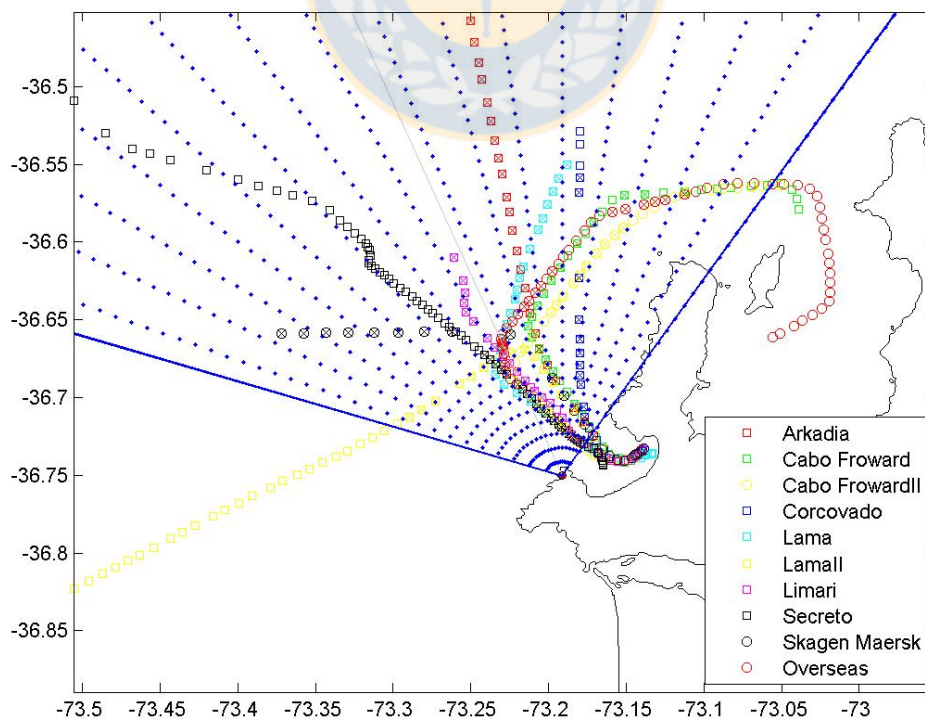


Figura 4.1: Trayectoria de los buques analizados en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

En la figura (4.2) se muestra particularmente el caso del buque Arkadia. Este buque dejó el puerto de San Vicente el día 26 de abril y, como se observa, siguió una trayectoria prácticamente radial, muy conveniente para nuestro estudio.

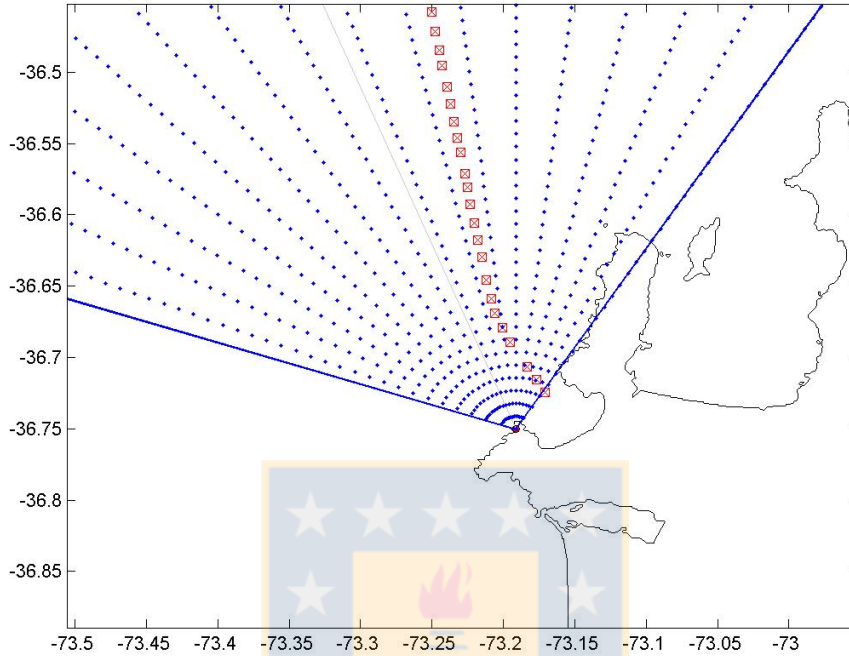


Figura 4.2: Trayectoria del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Frecuencia Doppler y Velocidades

De acuerdo a la ecuación (2.12) podemos calcular la velocidad radial de un buque teniendo a partir de su frecuencia Doppler observada en el espectro.

$$f_D = \frac{2Vf_c}{c}$$

con  $f_D$  la frecuencia Doppler,  $f_c$  la frecuencia del radar y  $c$  la velocidad de la luz.

La frecuencia Doppler se obtuvo restando la frecuencia desde el centro del espectro hasta la frecuencia del buque en cuestión (su posición en el espectro Doppler).

El caso de Arkadia es particular, porque gran parte de su trayectoria es prácticamente radial al radar, por lo que sus corrimientos Doppler debieran representar adecuadamente su velocidad real. Por lo tanto, para cada una de sus posiciones se calculó la velocidad radial, y se comparó con los entregados por el buque en esos mismos instantes.

La Figura (4.3) muestra con cuadrados color rojo las velocidades entregadas por el buque al Sistema de Identificación Automático (AIS) y con círculos en color azul las velocidades que medimos con el Radar HF ubicado en Faro Hualpén, ambas

velocidades en nudos.

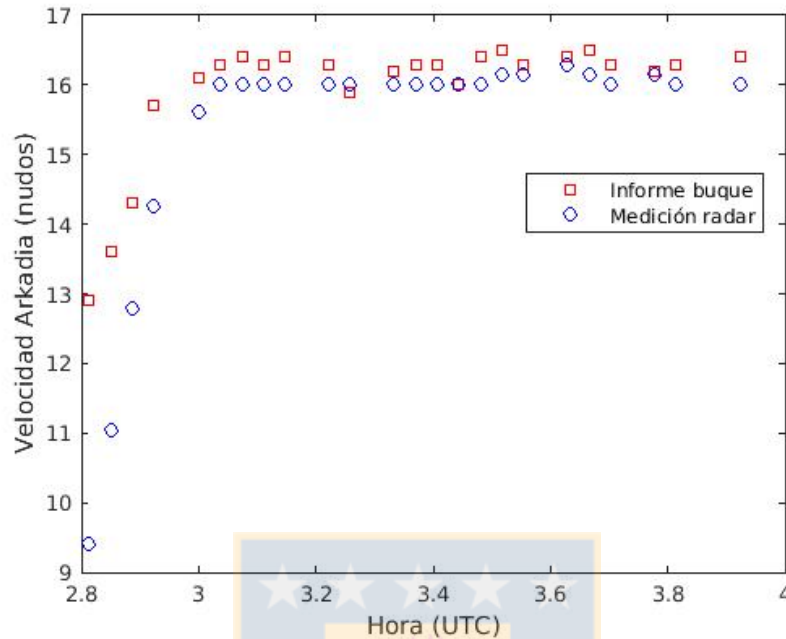


Figura 4.3: Velocidad AIS informada por Arkadia y la medición de su velocidad radial usando el radar de Faro Hualpén. Fuente: Elaboración propia.

Salvo en los tres primeros puntos del track, se observa una extraordinaria correspondencia entre las velocidades informadas por el buque y las calculadas mediante el radar HF marino ubicado en Faro Hualpén.

En el caso de los primeros tres puntos del track, el radar subvaloró la velocidad del buque dado que –como se observa en la figura (4.2)– en esas posiciones la dirección de Arkadia incluía una fuerte componente azimutal, la que no puede ser detectada por el radar.

### 4.3. Detección

Con la información expuesta en la sección **Tracks** procedimos a hacer la detección en forma visual, es decir, conociendo la trayectoria del buque y su horario de entrada o salida del puerto, identificamos los peaks y cambios de potencias en el espectro de potencia retrodispersada. Haciendo un seguimiento de su trayectoria en los espectros.

En la Figura (4.4) vemos tres espectros de potencia retrodispersada medidos el día 26 de abril durante el paso del buque Arkadia por el área de cobertura del radar.

En primer lugar se puede observar los dos máximos asociados al scattering de Bragg. Los de primer orden ubicados en forma simétrica con respecto al cero a una distancia  $\Delta f_B = 0,40979214$  (valor obtenido de la ecuación 2.9), y, en segundo lugar, varios máximos más pequeños en ambos lados de cada máximo de primer orden, que

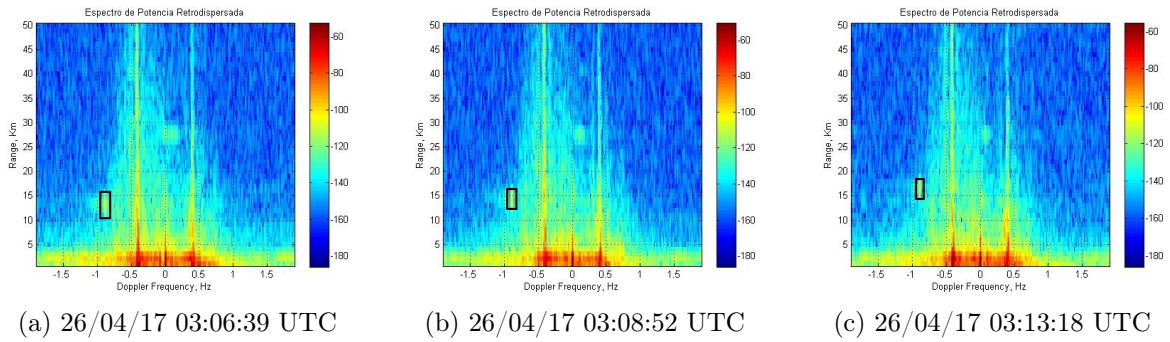


Figura 4.4: Espectros de Potencia Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

son los máximos de segundo orden.

Luego, en forma individual, se puede observar en la figura 4.4a un máximo de potencia aislado, al lado izquierdo del espectro, el que se encuentra a 14 kilómetros aproximadamente del radar. Seguidamente, en la figura 4.4b, se observa esta misma anomalía en el kilómetro 15, y sucesivamente en la figura 4.4c aparece en el kilómetro 16.

Continuando con el análisis en los demás espectros medidos entre las 03:00:00 y las 03:55:27 hrs UTC del día 26 de abril, y comparando con la información entregada con el buque, identificamos que cada punto corresponde al buque Arkadia.

Se realizó el mismo procedimiento con los 7 buques restantes. En la figura (4.5) se muestran un espectro de potencia por buque detectado.

Después de identificar cada buque en los espectros y hacer un seguimiento a su trayectoria determinamos estudiar las potencias en estos puntos “anómalos”. Esta información se convertirá posteriormente en criterios para el desarrollo del algoritmo de detección automático.

## 4.4. Potencias

Con la información de la posición del buque y sus horarios de salida o llegada al puerto, pudimos revisar los datos medidos por el radar y una vez que logramos posicionar el buque en el espectro procedimos a estudiar la potencia retrodispersada y así analizar cómo ésta cambia en función de la distancia.

La figura (4.6) muestra las potencias retrodispersadas por todos los buques analizados con respecto a la distancia al radar.

Es claro que la potencia retrodispersada por los buques decae con la distancia al radar, pero también es claro que esa potencia depende de varios parámetros, no solo de esa distancia. Con el fin de tener una idea general de la tasa de caída de la potencia retrodispersada con respecto a la distancia al radar, se usó el método de cuadrados mínimos para obtener el mejor ajuste para una expresión del tipo

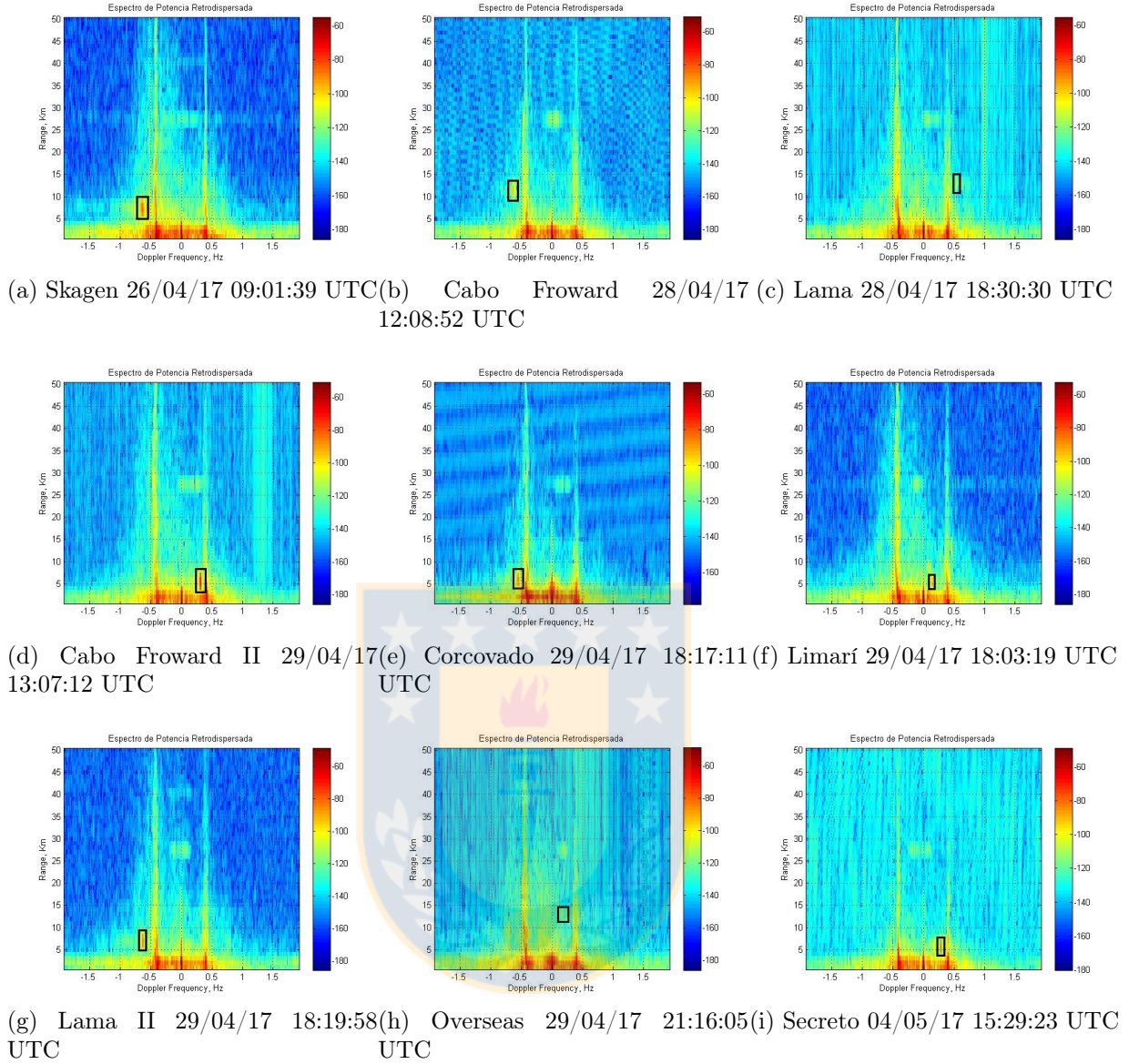


Figura 4.5: Espectros de Potencia. Fuente: Elaboración propia.

$\Pi_B = 10 \log K/d^c$ , usando todos los datos. El resultado, que se muestra con una línea roja en la figura (4.7), tiene la forma

$$\Pi_B = 10 \log \frac{2,79 \times 10^6}{d^{4,2}} \quad (4.1)$$

en que la distancia debe ingresarse en kilómetros para que la potencia retrodispersada resulte en dB.

Un caso particularmente interesante es el del buque Arkadia, debido a que –como muestra la figura (4.2)– el track de este buque es prácticamente radial, por lo que la potencia retrodispersada debe depender básicamente de la distancia al radar, pero no de su ángulo con respecto al radar, por ejemplo. La figura (4.8) muestra la potencia retrodispersada para este caso. Entonces realizando un ajuste de cuadrados mínimos –semejante al realizado anteriormente para todos los buques– lleva al si-

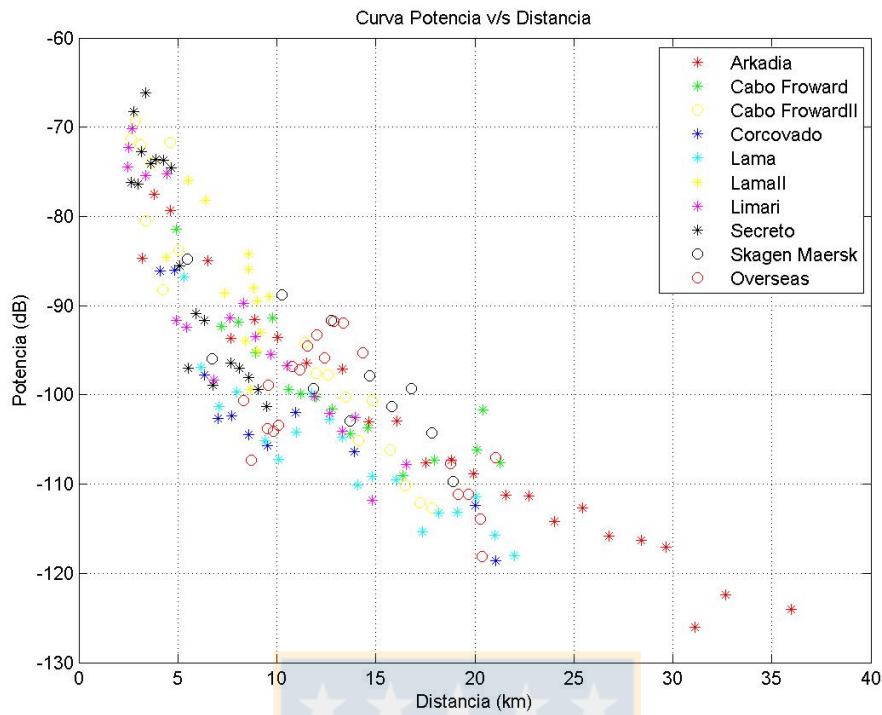


Figura 4.6: Curva de la potencia retrodispersada, con respecto a la distancia al radar, para todos los buques analizados. Fuente: Elaboración propia.

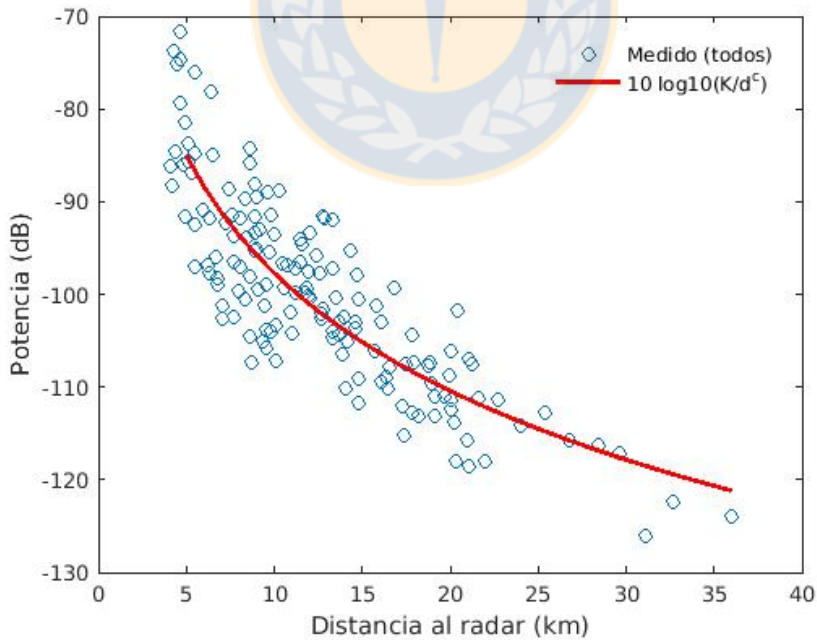


Figura 4.7: Potencia retrodispersada por todos los buques analizados. Fuente: Elaboración propia.

guiente resultado, que se muestra en la curva roja en el gráfico recién mencionado.

$$\Pi_B = 10 \log \frac{3,71 \times 10^5}{d^{5,0}} \tag{4.2}$$

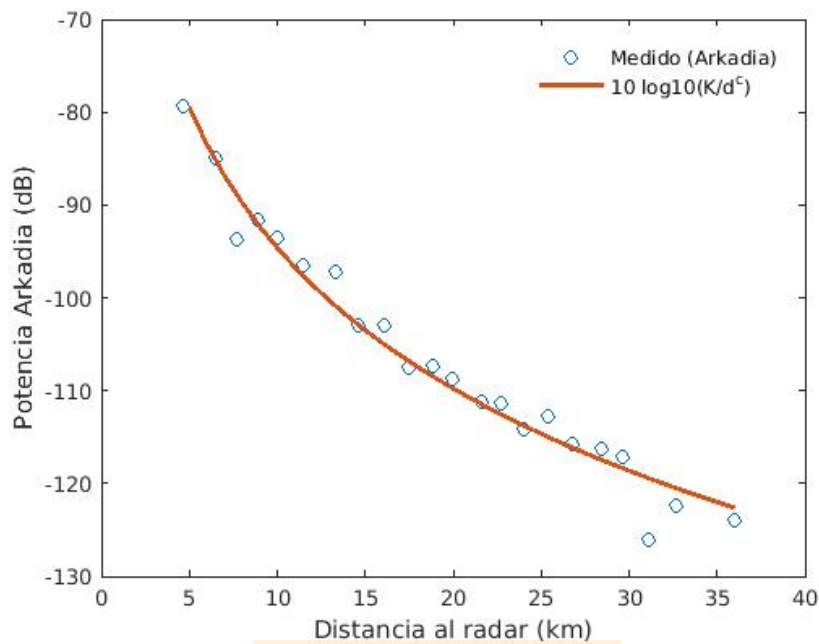


Figura 4.8: Curva Potencia con respecto a la distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

## 4.5. Algoritmo de detección

Para realizar la detección hemos tomado en cuenta varios criterios.

- En primer lugar del set de datos que nos entrega el radar hemos eliminado todas las potencias asociadas al scattering de Bragg. O sea que de las 512 columnas de datos hemos eliminado los 2 máximos de Bragg (desde 10 columnas más a la derecha hasta 10 columnas hacia la izquierda), y también hemos eliminado el punto central (con 5 columnas a su derecha y a su izquierda).
- También se comenzó la detección a partir del kilómetro 5 desde el radar, ya que antes de esto tenemos scattering de Bragg muy intenso, y además tenemos que el valor de potencia es muy alto, por lo que es muy difícil determinar qué es buque y qué es ruido.

Estos dos criterios se muestran en la Figura (4.9)

- Tomamos un umbral de potencia para la detección, que es considerar solo potencias mayores a -130 dB, ya que, de acuerdo a la estadística vista en este estudio, las potencias retrodispersadas por los buques nunca superan ese umbral (ver figura 4.6).
- Se hizo una comparación entre el pixel que contiene al buque (“acierto”) y el tercer pixel vecino para ambos lados del espectro, es decir tanto en  $x$  (frecuencias Doppler) como en  $y$  (radiales), y con esta comparación se asignó un valor de diferencia de potencia como umbral de detección (por defecto estimamos este delta de potencia como 20 dB).

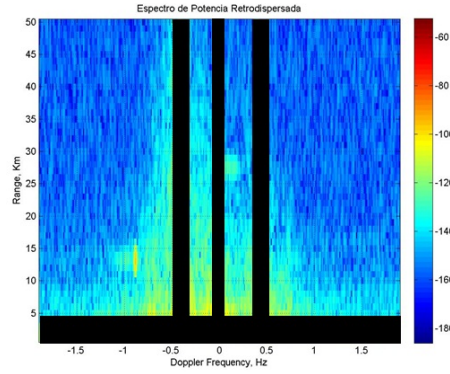


Figura 4.9: Se excluye el scattering de Bragg para la detección. Fuente: Elaboración propia.

- Otro criterio que adoptamos fue el de considerar solo aciertos que fuesen contiguos a otros, es decir que deben haber 2 o más puntos juntos que tengan una potencia relativamente similar.
- Luego realizamos la detección.

Siguiendo este método entonces logramos automatizar la detección, comprobando su funcionamiento con los datos de los buque analizados.

La figura (4.10) muestra ejemplos que evidencian la detección.

## 4.6. Ganancia y ajuste de la atenuación

Si escribimos la ecuación del radar despreciando la atenuación en el sistema, tenemos:

$$\Pi_b = \Pi_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} \quad (4.3)$$

Como se muestra en la Sección 2.3, podemos llegar a una expresión que nos entrega información sobre la ganancia de las antenas y la sección eficaz de scattering:

$$\frac{4\pi^3 d^4 10^{(\Pi_B/10)}}{\lambda^2} = G^2 \sigma \quad (4.4)$$

Como todos estos datos son conocidos, podemos determinar  $G^2 \sigma$  y ver cómo esta combinación varía con respecto a la distancia al radar. A continuación se muestran los gráficos de  $G^2 \sigma$  v/s  $d$  para todos los buques (Figura 4.11).

La figura 4.12 muestra el caso particular del buque Arkadia.

En los gráficos podemos observar que la curva tiende a disminuir a medida que aumenta la distancia. Esto resulta interesante, ya que teóricamente pensamos que la ganancia de la antena y la sección eficaz de scattering son valores que debieran permanecer constantes durante la medición. Esto quizás se debe a que hemos excluido el término de la atenuación del sistema.



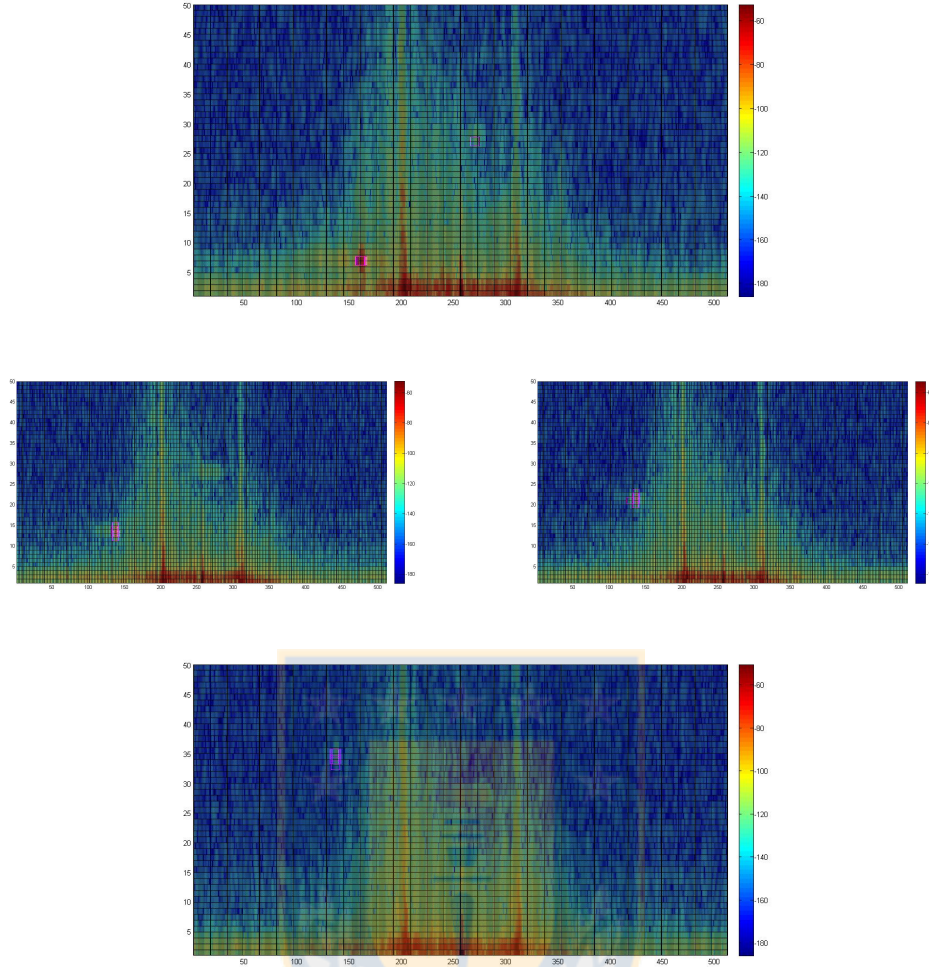


Figura 4.10: Ejemplo de detección automática. Fuente: Elaboración propia.

Ahora hacemos el mismo procedimiento, pero considerando la atenuación. Primero se debe obtener una expresión para la dependencia de la atenuación con la distancia para el caso de la frecuencia de nuestro radar. Para una frecuencia de unos 15 MHz, y usando la teoría expuesta por Gurgel [3], llegamos al resultado, aproximando una curva en forma numérica

$$A = -6,17665 - 3,09612x + 0,14692x^2 - 0,00342x^3 + 0,00003x^4 \quad (4.5)$$

en que  $x$  es la distancia al radar, en km. La atenuación resulta en dB.

Ahora, entonces, usamos

$$\Pi_b = \Pi_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 d^4} A^4 \quad (4.6)$$

De aquí obtenemos la misma expresión anterior para la ganancia y la sección eficaz de scattering, pero ahora se le agregó el término de atenuación.

$$\frac{4\pi^3 d^4 10^{(\Pi_B/10)}}{\lambda^2 A^4} = G^2 \sigma \quad (4.7)$$

Luego podemos ver el gráfico  $G^2 \sigma$  v/s  $d$  del buque Arkadia incluyendo el término de atenuación (Figura 4.13).

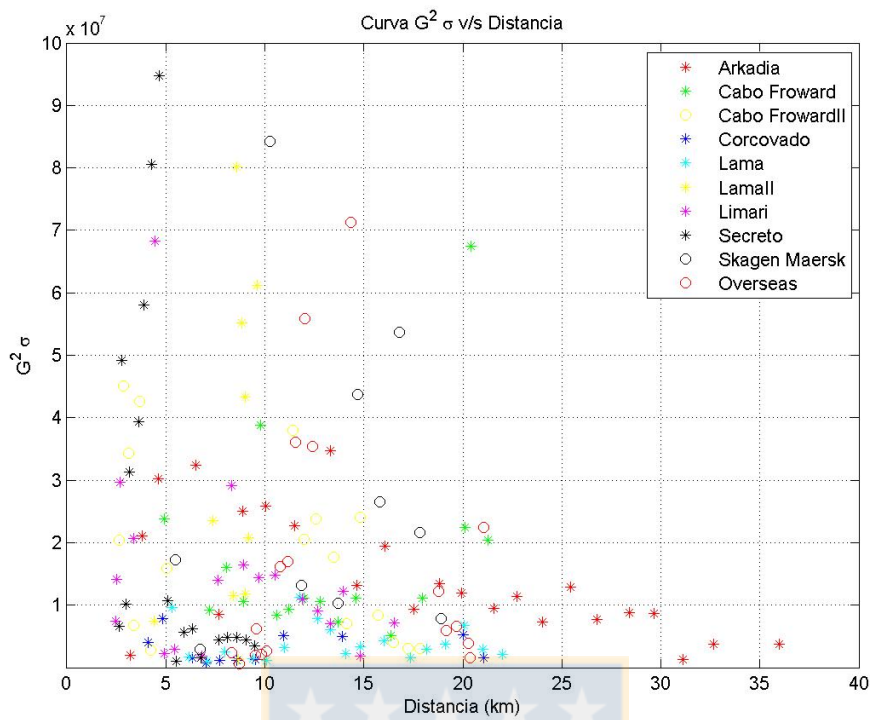


Figura 4.11: Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering, con respecto a la distancia. Fuente: Elaboración propia.

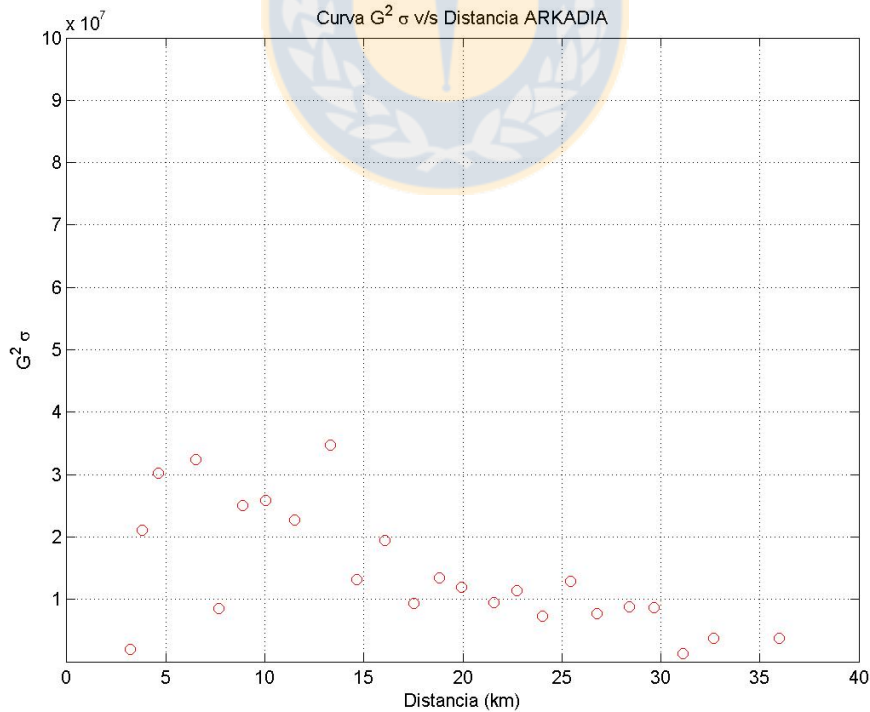


Figura 4.12: Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering, con respecto a la distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

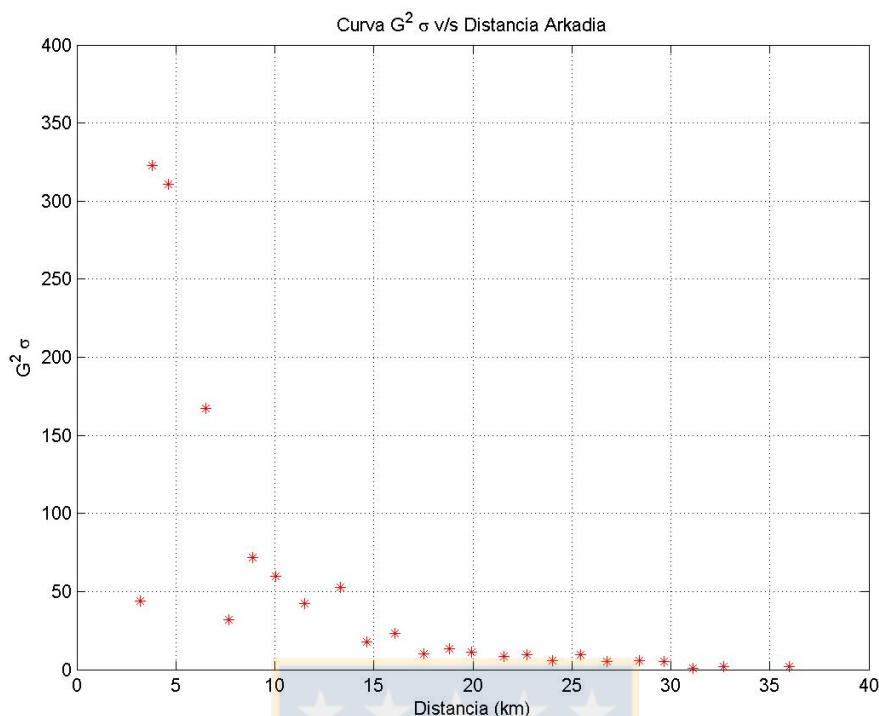


Figura 4.13: Ganancia al cuadrado por la sección eficaz de scattering con respecto a la distancia del buque Arkadia, considerando el factor de Atenuación. Fuente: Elaboración propia.

Podemos notar, en este caso particular del buque Arkadia, que al agregar el término de atenuación obtenemos un resultado razonable, dado que los valores del producto  $G^2\sigma$  son claramente menos variables. Solamente los primeros puntos presentan un comportamiento menos constante, lo que se puede explicar por su trayectoria, que en los primeros 5 puntos no fue radial al radar.

Siguiendo con este análisis, podemos considerar como constantes la ganancia, la longitud de onda, la sección eficaz de scattering, el factor  $4\pi^3$ , y despreocupar la atenuación, obteniendo la ecuación presentada a continuación

$$d^4 10^{\frac{\pi_B}{10}} = K$$

Los resultados de  $K$  v/s  $d$  para los buques Arkadia y Corcovado se muestra en las figuras (Figura 4.14) y (4.15), respectivamente. Ambos buques fueron elegidos porque presentan una trayectoria mas radial con respecto al radar, lo que permite estimar una sección eficaz de scattering constante.

Luego podemos hacer el mismo análisis, pero ahora considerando el ajuste de la atenuación para una frecuencia de 15 MHz mostrada arriba. Entonces tenemos la ecuación (2.6), y de ésta obtenemos los siguientes gráficos (Figura 4.16 y figura 4.17) para los buques Arkadia y Corcovado respectivamente.

En definitiva, al igual que en el caso anterior donde graficamos  $G^2\sigma$  v/s  $d$ , notamos que el factor de atenuación influye de forma notoria, ya que en los casos que tomamos en cuenta este factor, obtuvimos valores mucho más constantes (casi lineales) que corresponde a lo que esperamos por la teoría.

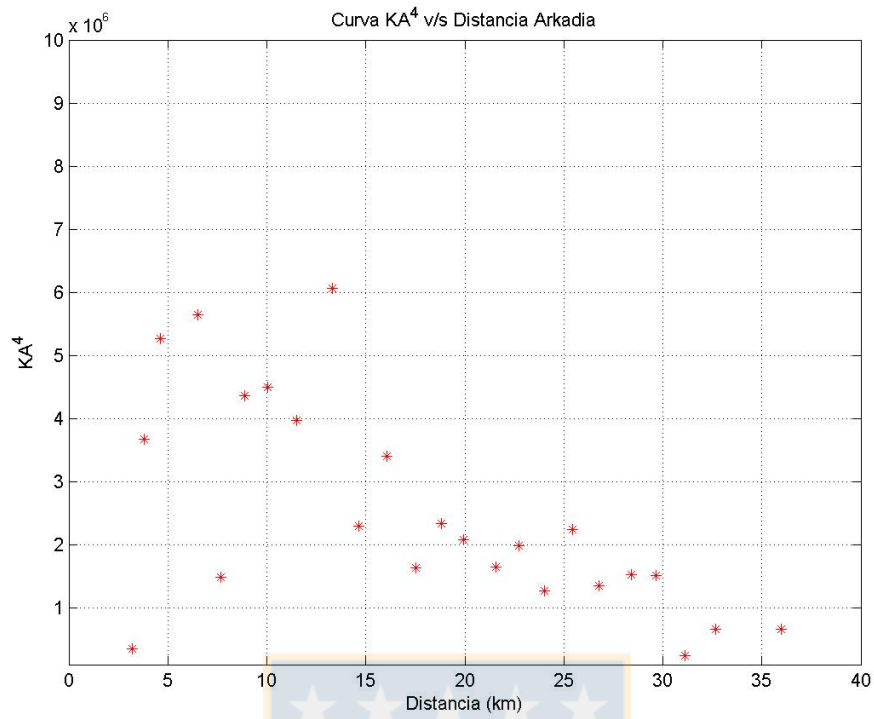


Figura 4.14: K versus distancia del buque Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

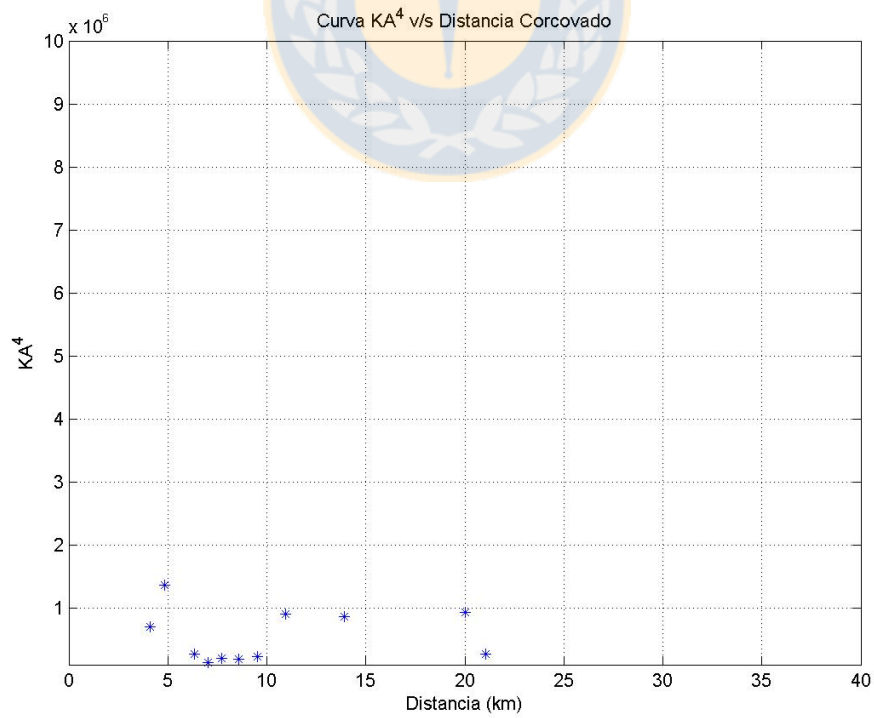


Figura 4.15: K versus distancia del buque Corcovado. Fuente: Elaboración propia.

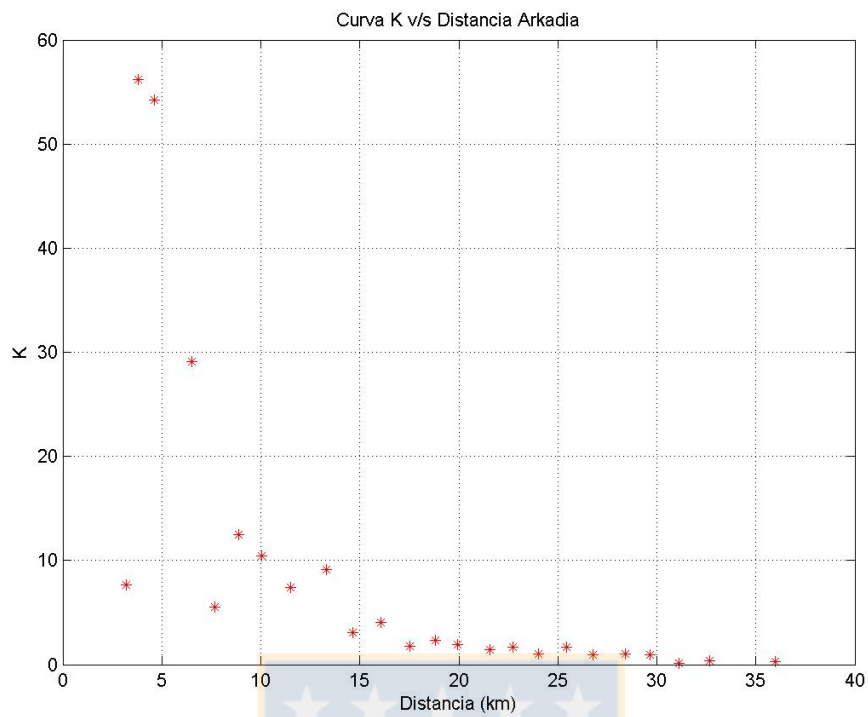


Figura 4.16: K versus distancia del buque Arkadia, considerando la Atenuación.  
Fuente: Elaboración propia.

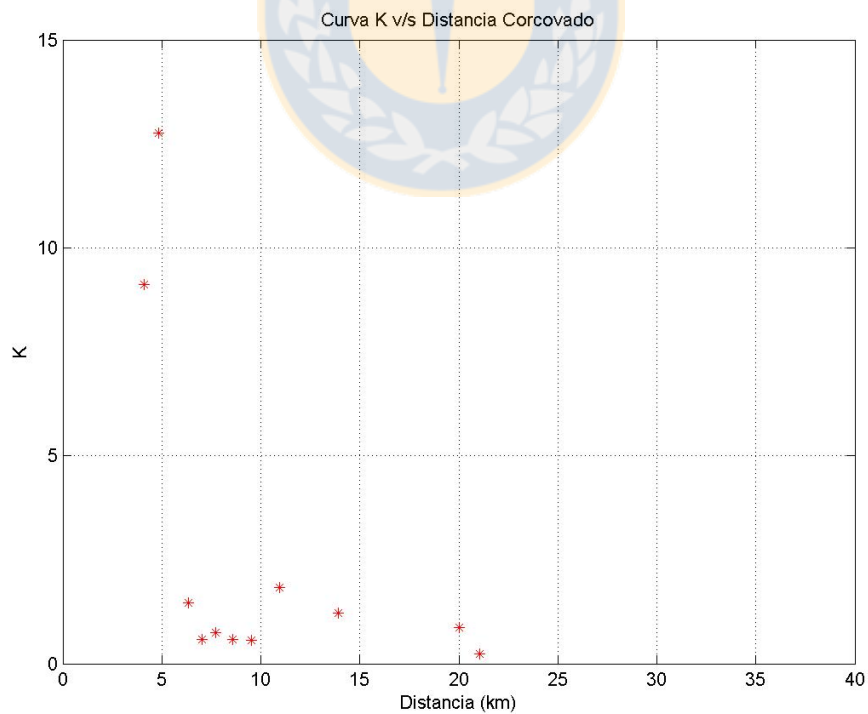


Figura 4.17: K versus distancia del buque Corcovado, considerando la Atenuación.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.7. Cálculo de RCS y de la ganancia

Se realizaron cálculos de RCS utilizando el criterio expuesto por Wehner en la Figura (2.4).

Se asume que la sección eficaz de scattering de un cuerpo rectangular de ancho  $b$  y altura  $a$  es

$$\sigma^2 = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \quad (4.8)$$

De forma visual obtuvimos lo que es llamado el francobordo de las respectivas embarcaciones. El francobordo corresponde a la parte expuesta del buque sobre el nivel del agua, como se muestra en la figura (4.18)

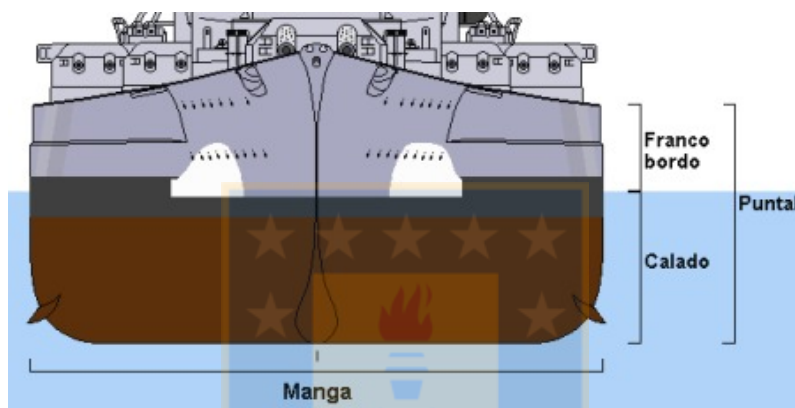


Figura 4.18: Francobordo de un buque. Fuente: [es.kbismarck.com/glosario.html](http://es.kbismarck.com/glosario.html)

Entonces con los datos de francobordo, eslora y manga de los buques, pudimos realizar un cálculo aproximado de la sección eficaz del radar, esto con el objetivo de obtener información de la ganancia de las antenas.

Se calculó un RCS máximo considerando la eslora del buque y un RCS mínimo con la manga. La tabla (4.1) muestra los datos calculados.

\*Valores tomados de forma visual.

Buque	Eslora (m)	Manga (m)	Francobordo* (m)	$\sigma_{\text{máx}} (m^2)$	$\sigma_{\text{mín}} (m^2)$
Arkadia	170	25	5,7	34089	737
Skagen	347	43	11,0	528942	8122
Cabo	228	32	11,0	228359	4498
Corcovado	138	21	6,4	28319	656
Lama	120	21	7,5	29407	901
Limarí	268	32	8,1	171082	2439
Overseas	183	32	9,7	114396	3498
Secreto	225	36	16,0	470510	12045

Tabla 4.1: Cálculo de valores de RCS considerando un blanco simple. Fuente: Elaboración propia.

Luego, entonces, podemos encontrar valores de ganancia, trabajando con la ecuación del radar, sustituyendo los datos conocidos y calculados anteriormente.

$$\sqrt{\frac{4\pi^3 d^4 10^{\frac{P_B}{10}}}{\lambda^2 A^4 \sigma}} = G \quad (4.9)$$

La tabla 4.2 muestra los valores encontrados para la ganancia en el caso del buque Arkadia, tomando  $\sigma = 737,2 \text{ m}^2$ , esto debido a que como su trayectoria fue siempre radial, tomamos como dato la sección eficaz mínima.

Buque	Distancia (m)	Potencia (dB)	$\sigma \text{ (m}^2\text{)}$	Ganancia (dB)
Arkadia	3183	-84.65	737.2	0.2438
Arkadia	3793.6	-77.51	737.2	0.6614
Arkadia	4610.7	-79.34	737.2	0.6494
Arkadia	6501.5	-85	737.2	0.4761
Arkadia	7671.7	-93.69	737.2	0.2078
Arkadia	8876.4	-91.53	737.2	0.3121
Arkadia	10029	-93.52	737.2	0.2852
Arkadia	11500	-96.44	737.2	0.2401
Arkadia	13300	-97.13	737.2	0.2669
Arkadia	14633	-103	737.2	0.1544
Arkadia	16045	-102.9	737.2	0.1776
Arkadia	17508	-107.6	737.2	0.1172
Arkadia	18814	-107.3	737.2	0.1348
Arkadia	19922	-108.8	737.2	0.1235
Arkadia	21587	-111.2	737.2	0.1056
Arkadia	22751	-111.3	737.2	0.1130
Arkadia	24004	-114.2	737.2	0.0876
Arkadia	25425	-112.7	737.2	0.1132
Arkadia	26759	-115.8	737.2	0.0853
Arkadia	28429	-116.3	737.2	0.0876
Arkadia	29657	-117.1	737.2	0.0845
Arkadia	31121	-126	737.2	0.0323
Arkadia	32686	-122.4	737.2	0.0519
Arkadia	35963	-124	737.2	0.0484

Tabla 4.2: Valores de ganancia en el caso del buque Arkadia  $\sigma = 737,2 \text{ m}^2$ . Fuente: Elaboración propia.

Graficando estos valores de Ganancia con respecto a la distancia obtenemos la Figura 4.19

Luego, si utilizamos la Ecuación (2.13) que nos permite calcular la sección eficaz de scattering para blancos más complejos (como un buque). Tomamos como desplazamiento el tonelaje bruto del buque y obtenemos los siguientes valores de  $\sigma$  expuestos en la Tabla 4.3.

Enseguida procedemos a calcular la ganancia tomando  $\sigma = 13359 \text{ m}^2$ . La tabla 4.4 muestra los valores encontrados para la ganancia en el caso del buque Arkadia.

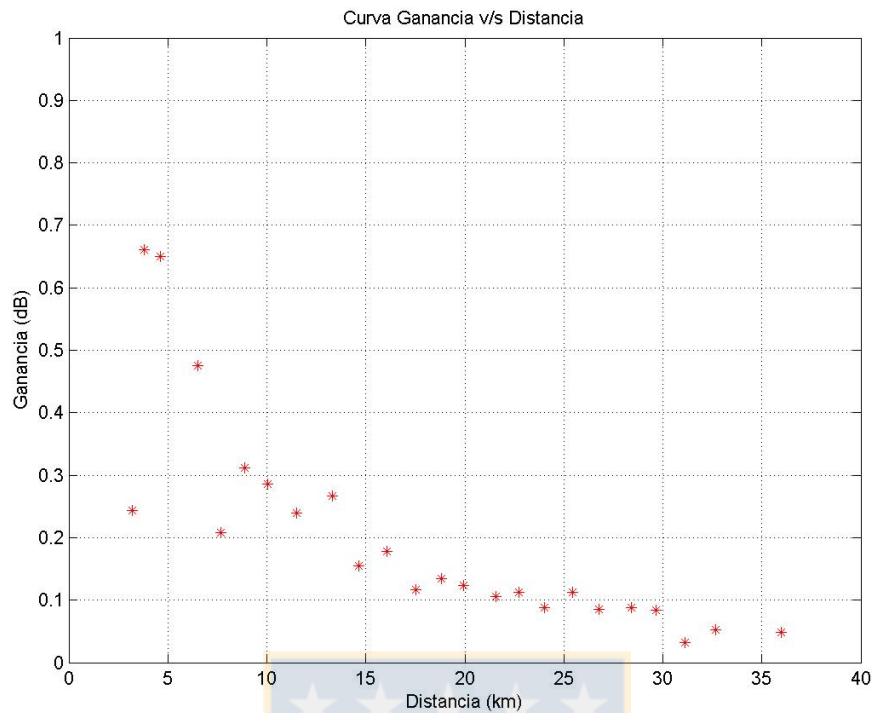


Figura 4.19: Curva ganancia v/s distancia. Fuente: Elaboración propia.

Buque	Desplazamiento (kilotons)	$\sigma (m^2)$
Arkadia	15988	13359
Skagen	92198	185000
Cabo	42096	57076
Corcovado	9611	6226.5
Lama	8848	5499.9
Limarí	42382	57658
Overseas	30018	34369
Secreto	47347	68081

Tabla 4.3: Cálculo de valores de RCS considerando un blanco complejo. Fuente: Elaboración propia.

Graficando estos valores de ganancia con respecto a la distancia obtenemos la figura 4.20.

Estos resultados de ganancia, tanto para el caso que tomamos  $\sigma = 737,2 m^2$ , como para el caso con  $\sigma = 13359 m^2$ , resultan ser bastante coherentes con las simulaciones realizadas para medir el patrón de radiación y la ganancia informada por el fabricante del radar.



Buque	Distancia (m)	Potencia (dB)	$\sigma$ ( $m^2$ )	Ganancia (dB)
Arkadia	3183	-84.65	13359	0.0573
Arkadia	3793.6	-77.51	13359	0.1554
Arkadia	4610.7	-79.34	13359	0.1525
Arkadia	6501.5	-85	13359	0.1118
Arkadia	7671.7	-93.69	13359	0.0488
Arkadia	8876.4	-91.53	13359	0.0733
Arkadia	10029	-93.52	13359	0.0670
Arkadia	11500	-96.44	13359	0.0564
Arkadia	13300	-97.13	13359	0.0627
Arkadia	14633	-103	13359	0.0363
Arkadia	16045	-102.9	13359	0.0417
Arkadia	17508	-107.6	13359	0.0275
Arkadia	18814	-107.3	13359	0.0317
Arkadia	19922	-108.8	13359	0.0290
Arkadia	21587	-111.2	13359	0.0248
Arkadia	22751	-111.3	13359	0.0265
Arkadia	24004	-114.2	13359	0.0206
Arkadia	25425	-112.7	13359	0.0266
Arkadia	26759	-115.8	13359	0.0200
Arkadia	28429	-116.3	13359	0.0206
Arkadia	29657	-117.1	13359	0.0199
Arkadia	31121	-126	13359	0.0076
Arkadia	32686	-122.4	13359	0.0122
Arkadia	35963	-124	13359	0.0114

Tabla 4.4: Valores de ganancia en el caso del buque Arkadia con  $\sigma = 13359 m^2$ .  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.8. Análisis por buque

En el caso de Arkadia: Vemos particularmente que este buque cuenta con una trayectoria bastante radial al radar, como se puede observar en la figura 4.2 lo que nos permite estimar una sección eficaz de scattering más constante.

A fin de tomar decisiones acerca de la sensibilidad de los criterios de detección, en el caso de Arkadia se hizo un estudio sobre cómo decae la potencia desde el pixel “central” en el espectro hacia sus vecinos, tanto radialmente como en frecuencias de Doppler. Esto está mostrado en la figura (4.21). En el diagrama de la izquierda se muestra la potencia tres puntos vecinos alejándose del buque y tres puntos vecinos acercándose a él, en función de la distancia al radar. En el diagrama de la derecha se muestra lo mismo, salvo que para puntos vecinos en frecuencias Doppler.

Una primera conclusión es que -130 dB parece ser un buen umbral de detección de buques.

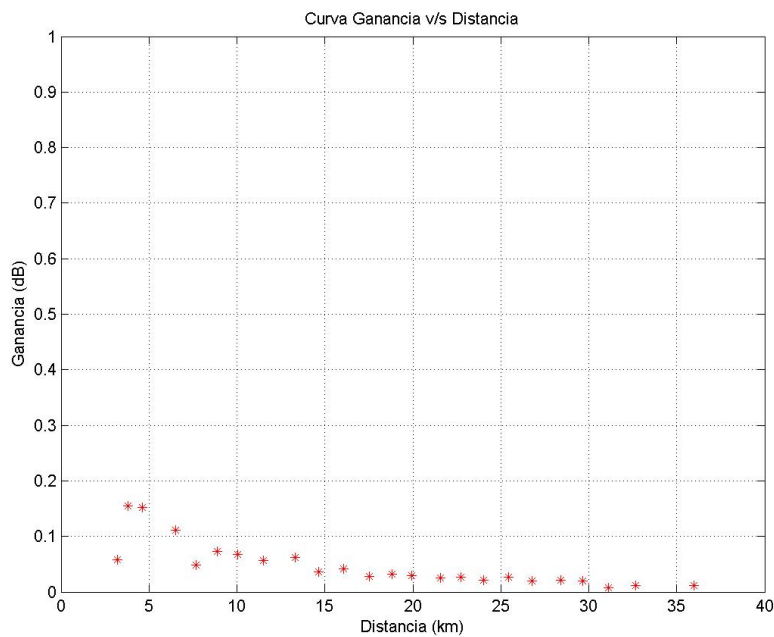


Figura 4.20: Curva ganancia v/s distancia para Arkadia. Fuente: Elaboración propia.

Otro punto es que la potencia decae –tanto radialmente como en frecuencia Doppler– con una ley de tipo cuadrático, al menos hasta  $\pm 3$  puntos hacia cada “lado” (radial y frecuencia Doppler) del punto central detectado.

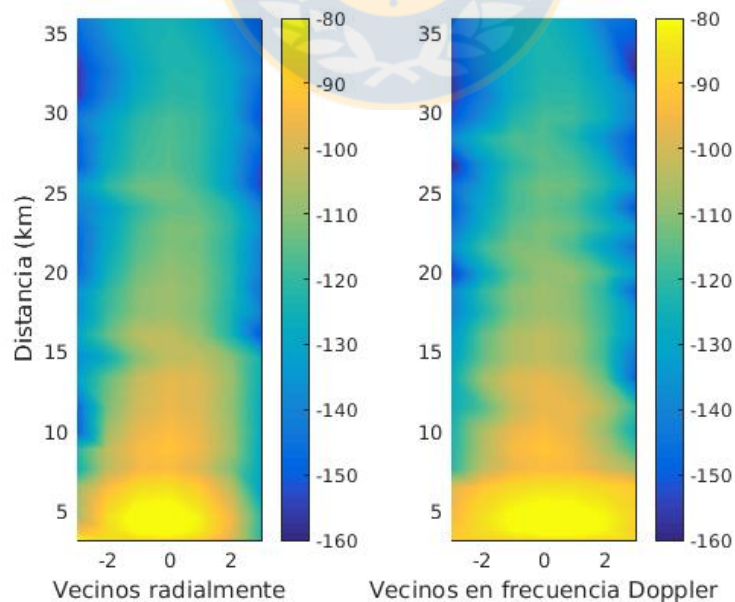
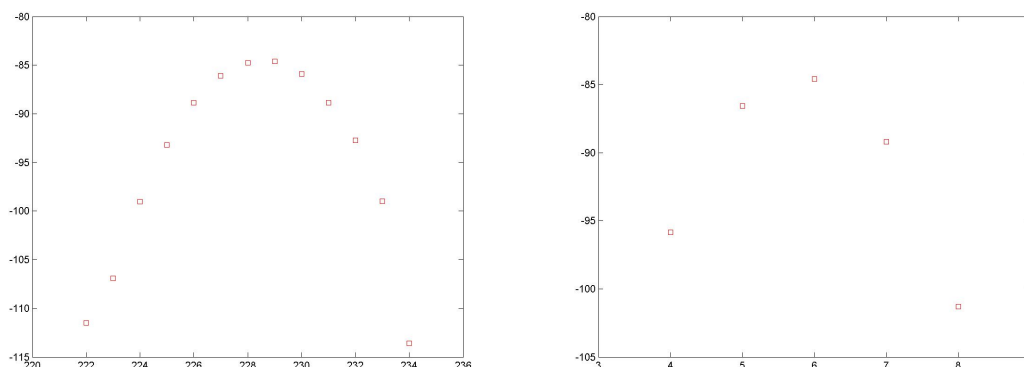


Figura 4.21: Variación de la potencia desde cada pixel central de detección de Arkadia hacia puntos más y menos alejados radialmente (lado izquierdo) y con menor y mayor frecuencia Doppler (lado derecho). Se muestra  $\pm 3$  puntos hacia cada “lado”. Fuente: Elaboración propia.



(a) Variación de la potencia de LamaII en función de la frecuencia Doppler  
(b) Lo mismo, pero en función de la distancia radial

Figura 4.22: Variación de la potencia para el primer punto de Lama II. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Arkadia, su velocidad (16,3 nudos) implica que, en el espectro de potencia, debiera encontrarse en frecuencias Doppler cercanas a  $f_{dt} = 2Vf_c/c \sim 2 \times (16,3 \times 0,5144) \times 16,15 \times 10^6 / 3 \times 10^8$  Hz, que son unos 0,91 Hz, claramente a la izquierda del  $f_B$  de nuestros radares (0.41 Hz).

En el caso del buque LamaII: En la figura (4.1) el track de LamaII se distingue por primero sale del puerto en dirección al noroeste, para súbitamente girar al sureste. En esta segunda fase su trayectoria es tal que varios puntos están prácticamente a la misma distancia del radar, por lo que este buque puede entregar excelente información acerca de la dependencia de la potencia con respecto al ángulo de las antenas.

Si tomamos la información que nos entrega el primer punto del buque LamaII tenemos la Figura 4.22

En ambos se observa una variación suave de la dependencia de la potencia, ya sea con la frecuencia Doppler o con la distancia radial. La forma prácticamente parabólica de ambas curvas implica que la selección de los pixeles de potencia máxima es confiable.

En el caso del buque Skagen: El track (figura 4.1) de Skagen –también saliendo de San Vicente– muestra que los últimos ocho puntos tienen una variación muy regular del ángulo *del buque*, el que va disminuyendo regularmente a medida que el buque avanza. Esto se confirma con el hecho de que la tasa de caída de la potencia con la distancia para Skagen es el orden de 6 dB/km en esa parte de su track. En el caso de Arkadia, que mantiene su RCS por su trayectoria prácticamente radial, la potencia decae sólo a una tasa de 1,8 dB/km. La diferencia entre ambas tasas de caída de la potencia es seguro una consecuencia del ángulo que el buque hace con respecto al haz.

En resumen, tenemos que la potencia que es medida depende de:

- la distancia al radar
- la forma del buque
- el ángulo del buque
- el ángulo de las antenas
- quizás condiciones meteorológicas



# Capítulo 5

## Conclusiones y Discusión

Podemos resumir los resultados de este trabajo en lo siguiente:

- Podemos detectar los buques. Hemos mostrado que –al menos hasta unos 40 km del radar– los buques producen una retrodispersión mayor a -130 dB, y que un buen umbral entre buque (acierto) y no buque son 20 dB. El radar HF de Faro Hualpén permite alcanzar fácilmente tales valores.
- Podemos determinar la distancia radial a la que se encuentra el buque, con la precisión que entrega el radar, o sea prácticamente un kilómetro, en nuestro caso. Mostramos que la variación de los pixeles acierto es suave, de modo que se puede identificar bien el pixel de máxima potencia retrodispersada.
- Podemos determinar si los buques se acercan o alejan. El signo del corrimiento Doppler nos permite discriminar el sentido de la velocidad del buque.
- Podemos calcular su velocidad radial. Utilizando el corrimiento Doppler encontramos una excelente correspondencia entre la componente radial de la velocidad informada por el buque y la velocidad medida por el radar.
- Podemos determinar la potencia retrodispersada por cada buque, y como esta potencia se distribuye en varios pixeles en el espectro.
- Podemos calcular la tasa de decaimiento de la potencia  $d\Pi_B/dr$  y asociarla a posibles cambios en  $\sigma$  debido a distintos ángulos que el buque pueda formar con el haz del radar. Por lo tanto, mostramos que el ángulo del buque afecta a su sección eficaz de scattering.
- La RCS calculada con la fórmula empírica da resultados comparables a valores teóricos para superficies de tamaños comparables.
- A partir de la variación de la potencia retrodispersada y la distancia, encontramos valores de la ganancia que son coherentes con los valores informados por el fabricante de los radares.

Algunas limitaciones de este trabajo, y la forma en que podrían ser superadas, son las siguientes:

- Para determinar completamente la posición de un buque se requiere tanto la distancia radial al radar como el ángulo azimutal del buque visto desde el radar. Para ello se requiere, una vez encontrado un buque en un espectro, automatizar la comparación de esa potencia a distintos ángulos de las antenas. En este trabajo este procedimiento fue realizado por inspección, pero no fue automatizado.

- Solo podemos determinar la parte radial del movimiento del buque. Si un buque navega en forma perpendicular al radar, será detectado por éste (de hecho, en ese caso mostrará un  $\sigma$  grande), pero no será posible determinar su velocidad. La solución para este problema es trabajar con dos radares en forma simultánea, de modo que si el movimiento del buque es perpendicular a un radar, no lo será para el segundo radar.

- Debido al ruido de las frecuencias de Bragg y de la frecuencia de operación del radar, no podemos encontrar buques que naveguen con rapidez radiales que produzcan corrimientos Doppler cercanos a la frecuencia de Bragg del radar o que se encuentren detenidos. La solución para esto es o usar dos radares, o usar un radar con multifrecuencia. También en nuestro análisis se excluyó buques que estuvieran a menos de 5 km del radar, debido a que en ese caso la retrodispersión genera ruido considerable. Sin embargo, esto no es una limitación apreciable en este trabajo, tanto porque a esa distancia los buques pueden ser vistos fácilmente por un observador, como pueden ser detectados con radares convencionales (microondas).

Un aspecto interesante de discutir es cuál es el tamaño mínimo que permite detectar un buque. Si bien es cierto que todos los buques usados en este estudio tienen esloras de al menos 100 metros, algunos de ellos –particularmente Arkadia– fueron detectados cuando mostraban al radar una superficie dispersadora particularmente pequeña (en el caso de Arkadia, prácticamente su manga por su francobordo). Por lo tanto, aparentemente el tamaño mínimo de detección puede ser sensiblemente menor a unos 100 metros de eslora. Este tema no fue revisado en detalle.

# Bibliografía

- [1] The army institute for professional development, Principles of radio wave propagation. Edition B, US Army signal center and fort gordon. 2005.
- [2] Peyton Z., Peebles Jr., Radar Principles, New York: John Wiley and Sons, Inc, 1998.
- [3] Gurgel, K-W., H. H. Essen, and S. P. Kingsley, S.P. (1999) HF radars: Physical limitations and recent developments, Coastal Engineering, 37, 201–218.
- [4] D. Figueroa, Radares HF Marinos: Teoría y Aplicaciones. DGEO/UdeC, v.27, February 1, 2014.
- [5] K.-W. Gurgel, G. Antonishki, H.-H. Essen, and T. Schlick, "Wellen Radar (WERA), a new ground-wave based HF radar for sea remote sensing", Coastal Engineering, vol. 37, August 1999.
- [6] D. R. Wehner, High-Resolution Radar, Second Edition, 1995. ISBN 0-89006-727-9.
- [7] D. D. Crombie, "Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc./s.," Nature, vol. 175, pp. 681–682, 1955.
- [8] Barrick, D. E., First-order theory and analysis of MF/HF/VHF surface from the sea, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 20, 2-10, 1972.
- [9] I. Weiner, M. Rust, and T. D. Donnelly, Particle size determination: An undergraduate lab in Mie scattering. Am. J. Phys. 69, 129-136, 2001.
- [10] J. M. Wallace, P.V. Hobbs, Atmospheric Science, Second Edition. 2006. ISBN: 0-12-732951-X
- [11] A.M. Ponsford and J.Wang, "A review of high frequency surface wave radar for detection and tracking of ships," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 18, no. 3, pp. 409–428, 2010.
- [12] M. I. Skolnik, Introduction to Radar System, Third Edition, 2001. ISBN 0-07-044533-8.
- [13] M. I. Skolnik, "An Empirical Formula for the Radar Cross Section of Ships at Grazing Incidence", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems", Vol. 10, p. 292, Mar 1974.

- [14] A.M. Ponsford, "Surveillance of the 200 Nautical Mile Exclusive Economic Zone (EEZ) Using High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR)", *Can. Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, p. 4, Aug 2001.
- [15] Jeffrey D. Paduan and Hans C. Graber, Introduction to high-frequency radar: reality and myth *Oceanography* 10, 36-39, 2010.
- [16] N. Almonacid, Potencial undimotriz de alta y baja frecuencia en el Golfo de Arauco a partir de datos de radar HF. 2013
- [17] Y. Olmos, Dirección de los vientos sobre el océano costero observados mediante radares HF marinos. 2014.
- [18] D. Figueroa, A. Dzvonkovskaya, K.-W. Gurgel, M. Ortega, J. Morales and C. Moore. Early detection of tsunami using coastal HF radars. The case of the Japan 2010 tsunami arriving to the coast of central Chile. Colloquium 'Geophysical Signatures of Earthquakes and Volcanoes', Concepción (Chile), March 13-14, 2014.
- [19] Helzel Messtechnik GmbH, Operation Manual, Vesion 4.1, June 2009.

