Evaluación Preliminar del Estado Estructural del Rompeolas
Monitoreo 2015
Puerto de Arica

Preparado para

TERMINAL PUERTO ARICA S.A.
MÁXIMO LIRA 389, ARICA

Preparado por

Baird

Baird & Associates S.A.
Marchant Pereira 150, of. 402, Providencia, Santiago

Para mayor información, favor contactar a
Roberto Salinas (562) 22361222
rsalinas@baird.com

Número de proyecto: 0222.015

Versión	Fecha	Estado	Comentarios	Preparado por	Revisado por	Aprobado por
A	18 Ene. 2016	Borrador	Revisión Interna	FVD	RSN	
B	20 Ene. 2016	Borrador	Revisión Cliente	FVD	RSN	

Este informe fue preparado por Baird and Associates S.A., para Terminal Puerto Arica. El material contenido en él refleja la opinión de Baird & Associates de acuerdo a la información disponible en el momento de su elaboración. Cualquier uso o decisión tomada, basada en este informe, por parte de terceros, es de entera responsabilidad de ellos. Baird & Associates no se hace responsable por daños y/o perjuicios causados como resultado de las decisiones o acciones tomadas por terceros, en relación a la información entregada en este informe.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 4
1.1 Alcances 4
1.2 Objetivos 4
1.3 Antecedentes 5
2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE TRABAJOS REALIZADOS EN TERRENO 7
2.1 Datos generales 7
2.2 Monitoreo sobre nivel de marea 7
2.2.1 Introducción a los levantamientos fotogramétricos con drone 7
2.2.2 Metodología utilizada 8
2.2.3 Levantamiento 8
2.2.4 Análisis de fotografías aéreas 12
2.2.4.1 Evaluación de desplazamientos mediante fotografías 12
2.2.4.2 Evaluación de estabilidad mediante el Método de van der Meer (1988) 15
2.3 Calidad de hormigón de los tetrápodos 18
2.4 Topobatimetría 19
2.4.1 Topografía 19
2.4.2 Batimetría 20
2.4.3 Perfiles 21
2.4.3.1 Comparación 2005 v/s 2015 22
2.4.3.2 Comparación 2014 v/s 2015 24
3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 25

ANEXO A: FOTOGRAFÍAS AÉREAS
ANEXO B: INFORME DE LABORATORIO ENSAYOS HORMIGÓN
ANEXO C: PERFILES TOPOBATIMÉTRICOS

1 INTRODUCCIÓN

Terminal Puerto Arica (TPA) ha contratado a Baird & Associates S.A. (Baird) para desarrollar los trabajos de terreno necesarios para el monitoreo del estado del rompeolas del Puerto de Arica, correspondiente al año 2015.

Las actividades y los estudios realizados se desarrollaron según las especificaciones definidas en el Anexo C-VIII del contrato de concesión. Estos son:

- Monitoreo aéreo fotográfico del rompeolas.
- Extracción de testigos y análisis del hormigón.
- Levantamiento topobatimétrico del rompeolas con multihaz y drone.

1.1 Alcances

Este informe tiene los siguientes alcances:

- Adjunta las fotografías aéreas del rompeolas obtenidas y analiza su estado de acuerdo a las especificaciones contenidas en el contrato.
- Adjunta y analiza los resultados del monitoreo de resistencia del hormigón realizado en los tetrápodos.
- Adjunta los resultados del levantamiento topobatimétrico.
- Evalúa la estabilidad del rompeolas.

1.2 Objetivos

Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- Evaluar la evolución del estado del rompeolas.
- Realizar recomendaciones para mejorar la estabilidad del mismo, si es necesario.
- Realizar recomendaciones para mejorar los monitoreos a realizar en el futuro, si corresponde.

1.3 Antecedentes

El año 2005, Baird realizó el monitoreo base del rompeolas del Puerto de Arica y determinó el estado estructural del mismo. En dicho informe se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El análisis de las fotografías reveló que el rompeolas se encuentra en mal estado. Ello fue evaluado cuantitativamente por dos métodos ampliamente aceptados: el del SPM 1977 y el de van der Meer 1999.
2. Se realizó un monitoreo post-sismo 2005, mostrándose que hubo movimiento de unidades de armadura, cuyas magnitudes no pueden ser permitidas en este tipo de estructuras, lo que sugiere que existen problemas de trabazón entre unidades.
3. El análisis de la roca de filtro mostró que el material utilizado no es de la calidad que se exige a la roca en este tipo de estructuras. Ello aceleró el deterioro del estado del rompeolas al meteorizarse y permitir el desplazamiento de los tetrápodos.
4. El estudio del hormigón de los tetrápodos muestra que la resistencia del material es inferior al generalmente utilizado en este tipo de obras en un 69%, aumentando la probabilidad de rotura de elementos al haber desplazamiento de unidades.
5. La inspección submarina mostró que existen unidades de armadura directamente contra el fondo marino, ello significa que no hay pie, disminuyéndose la estabilidad estructural de la escollera.
6. El análisis de todos los estudios realizados mostró que el estado general del rompeolas es deficiente, sin llegar a un estado de falla.
7. No existe información del estado del núcleo.

Entre los años 2007 y 2014 se realizaron 8 monitoreos, cuyas conclusiones han sido las siguientes:

1. Se mostró mediante comparaciones de fotografías aéreas tomadas al rompeolas entre los años 2005 y 2014 que el deterioro que presenta la estructura no ha avanzado, dado a que el movimiento relativo entre ellas es menor.
2. Con las fotografías se revisó la estimación de la estabilidad mediante el método de van der Meer (1988), confirmándose que este valor se encuentra entre dos límites; por encima de la condición de diseño máxima y por debajo de la condición de falla.
3. El análisis de laboratorio de la resistencia del hormigón muestra que ésta no ha variado significativamente durante los últimos años. El comportamiento de las mediciones en el tiempo puede ser atribuible a las grandes variaciones estadísticas de las muestras recopiladas y no necesariamente a un deterioro acelerado de la resistencia del hormigón.
4. El deterioro del rompeolas no ha progresado de una manera significativa desde el año 2005. El desplazamiento acumulado no ha alcanzado niveles que hagan necesaria una reparación de la estructura en alguna de sus secciones.
5. La zona reparada el año 2005 se encuentra estable.

Sobre la base de las conclusiones anteriores se han hecho las siguientes recomendaciones:

1. Deben realizarse mantenciones anuales a las marcas en tetrápodos y sobre el muro parapeto, con el objeto de no perder las referencias del monitoreo. Se recomienda rehacer la colocación de clavos, debido a la alta corrosión identifcada en terreno desde el año 2013.
2. Se recomienda mejorar el monitoreo fotográfico aéreo, de la siguiente manera:
    I. Un monitoreo anual de inspección visual y fotográfico apoyado con un drone radio controlado que sustituya a la avioneta/helicoptero. Esto permitirá mejor cobertura y mayor flexibilidad, concentrándose en zonas que lo requieren, coordinando de mejor manera condiciones ambientales (mareas y luminosidad) que optimicen la actividad. Además, este dispositivo implica un costo menor al uso de una jornada en avioneta y permite un mayor control. Las fotografías se podrían volver cada vez más estándar debido al uso de navegación georeferenciada del dispositivo, algo que no se puede lograr con la avioneta.
    II. Un monitoreo topográfico que permita cuantificar el movimiento de los elementos y analizar la estabilidad de la estructura con metodologías técnicas robustas, precisas, seguras y económicas.
3. Se recomienda en adelante NO realizar los trabajos de extracción de muestras de hormigón, debido a los peligros y riesgos inherentes que existe en los trabajos de terreno asociados y a su escaso aporte adicional de información técnica útil. La estructura ya ha sido monitoreada en 9 ocasiones y cabe destacar que el deterioro del hormigón es un proceso lento que no presentará avances notables de un año a otro.
4. Se recomienda cambiar la inspección submarina de video por una inspección mediante un sonar tipo multihaz, el cual es mucho más preciso y entrega mayor información.

Se destaca que se mantuvo el uso del multihaz para la obtención de los perfiles topobatimétricos y el uso del drone en reemplazo de la avioneta, tal como se realizó en los trabajos del año 2014.

2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE TRABAJOS REALIZADOS EN TERRENO

2.1 Datos generales

Se realizaron las siguientes actividades de terreno, según especificaciones del Anexo C-VIII del contrato de concesión:

- Monitoreo fotográfico sobre nivel de marea.
- Toma de testigos y ensayo de hormigón.
- Levantamiento topobatimétrico.

Cada una de las actividades desarrolladas se explica a continuación. Destacamos que se realizaron innovaciones tecnológicas en el levantamiento de este año.

2.2 Monitoreo sobre nivel de marea

Este trabajo está apoyado por la toma y análisis de fotografías aéreas, según contrato de concesión y las que se compararon con las realizadas durante los monitoreos del 2005 al 2014.

La toma de fotografías aéreas permite cuantificar la densidad de tetrápodos rotos y/o en malas condiciones sobre el nivel del mar.

La toma de imágenes áreas fue realizada desde un vehículo aéreo no tripulado (drone). Con esto, se buscó simplificar la logística de combinar vuelos en avioneta/helicóptero con condiciones favorables de luminosidad y mareas.

2.2.1 Introducción a los levantamientos fotogramétricos con drone

El levantamiento de fotografías aéreas con drones facilita el uso de técnicas fotogramétricas, capaces de generar información espacial mediante la identificación de formas y objetos comunes por sus colores y texturas entre distintas imágenes de un mismo sitio, tal como el ojo humano es capaz de concebir profundidad al tener dos puntos de vista de un mismo objeto. La calidad y las características de la información espacial generada con esta técnica dependerán de diversos factores. Entre ellos podemos encontrar los siguientes:

- La riqueza de la textura del área levantada,
- La presencia de edificaciones en altura,
- La calidad general de las imágenes,
- La estaticidad del área levantada versus el tiempo entre la toma de las imágenes,
- La cantidad de imágenes que cubren un mismo punto.

Sin embargo, para situar dicha información en el espacio y asignarle medidas espaciales reales es necesario entregarle al modelo información adicional respecto a la cámara utilizada y a la ubicación

en el geoide de los objetos levantados. Sólo con esto, es posible entregar una georreferenciación adecuada en las 3 dimensiones a la superficie generada.

El rango de error en la georreferenciación dependerá de la calidad del sistema utilizado para georreferenciar los puntos de control. Si se utilizó una estación total o un GPS diferencial, la precisión es del orden de centímetros. Por otro lado, si se utilizó simplemente un sistema GPS común, la precisión será del orden de metros.

Bajo condiciones aceptables del área a levantar y la calidad de las imágenes, es posible lograr productos derivados de la fotogrametría. De dichos productos, interesa la generación de ortomosaicos y nube de puntos 3D, para el monitoreo visual del molo de abrigo.

2.2.2 Metodología utilizada

Dadas las necesidades para este trabajo, se voló una altitud de 30 metros respecto al nivel de la losa, lo que entrega una resolución aproximada de 2 cm/pixel.

Para ajustar la georreferenciación de las imágenes, se levantó puntos de control en tierra (GCP) a lo largo del área de interés. Una vez obtenidas sus coordenadas, los puntos a utilizar se marcan de manera de que se identifiquen en las imágenes aéreas.

Las imágenes se post-procesaron usando el software Pix4Dmapper, mediante el cual se filtran y combinan, para la generación de diversos productos.

Pix4Dmapper es capaz de trabajar con más de 1500 imágenes, para realizar levantamientos aéreos y terrestres (oblicuos). En un proceso casi autónomo, Pix4Dmapper es capaz de generar modelos 3D, ortomosaicos y modelos de elevación digital con una precisión del orden de los centímetros. Dicha precisión es variable y dependerá de la calidad de las imágenes, la precisión de los GCP, la textura del terreno, la altitud de las imágenes, del traslape entre imágenes y misiones, entre otras variables.

2.2.3 Levantamiento

Se seleccionó más de 2400 fotografías desde el drone. Se realizó distintas misiones, obteniéndose una vista continua del rompeolas. El ortomosaico generado se encuentra en el Anexo A-5.

Se cuantificaron las unidades de armadura dañadas visibles el día del vuelo, sábado 28 de noviembre de 2015, entre las 08:00 y las 14:00 horas, en marea llenante. Se separó el rompeolas en 4 misiones: arranque, codo, tronco y cabezo.

El análisis de las fotografías muestra que hay secciones en las cuales el número de unidades dañadas varía por sobre o por bajo el número de unidades dañadas en años anteriores. Ello se

explica por las diferentes perspectivas de las fotografías en los distintos monitoreos y además las condiciones de marea al momento de la fotografía, permitiendo ver tetrápodos dañados donde antes no se veían y viceversa. Con este antecedente se estimó nuevamente el número de unidades rotas y/o dañadas en las secciones antes nombradas, comparándose el dato con lo obtenido en los años anteriores.

Para el cálculo del porcentaje de tetrápodos dañados desde NRS hasta la cota del muro parapeto en cada sección del rompeolas (arranque, codo, tronco y cabezo), se utilizó el número teórico total de unidades de tetrápodos existentes en una sección de rompeolas de 20 metros de largo. Los resultados se resumen en la Figura 2.1, comparándose con los estudios realizados en años anteriores. Además, se incluye en Anexo A-4 Tabla 1, un detalle de los porcentajes de elementos rotos y dañados para cada sector analizado.

Para toda la defensa se calculó un total histórico (máximo) de 31,1% de tetrápodos dañados en la zona sobre el nivel de marea a momento de la toma de las fotografías. Al excluir la zona del codo, puesto que esta fue reparada, los tetrápodos dañados llegan a un 34,8%.

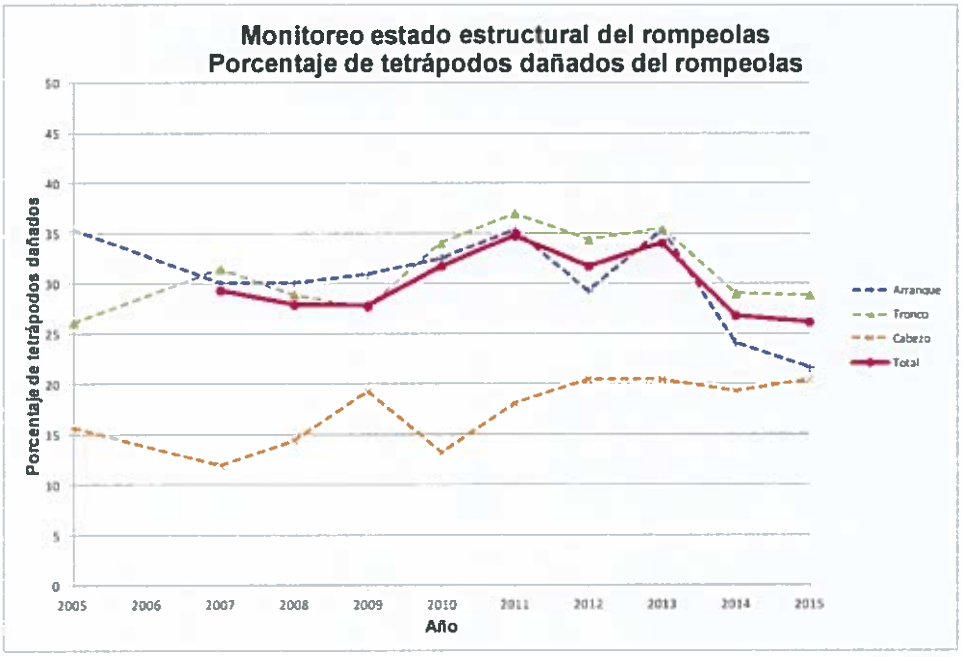

Figura 2.1: Porcentaje de tetrápodos dañados del rompeolas sobre el nivel de marea

La disminución en daño en el tiempo que se muestra en la Figura 2.1 en algunos años puede explicarse al nivel de marea al momento de capturar las fotografías, puesto que no permite contar algunos de los elementos de la zona intermareal cercana al NRS donde se concentra el daño.

En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de las fotografías utilizadas desde el año 2005 a la fecha. Las unidades rotas tienen marca roja y aquellas en mal estado tienen marca verde. El detalle de las fotografías analizadas se encuentra en el Anexo A-2.

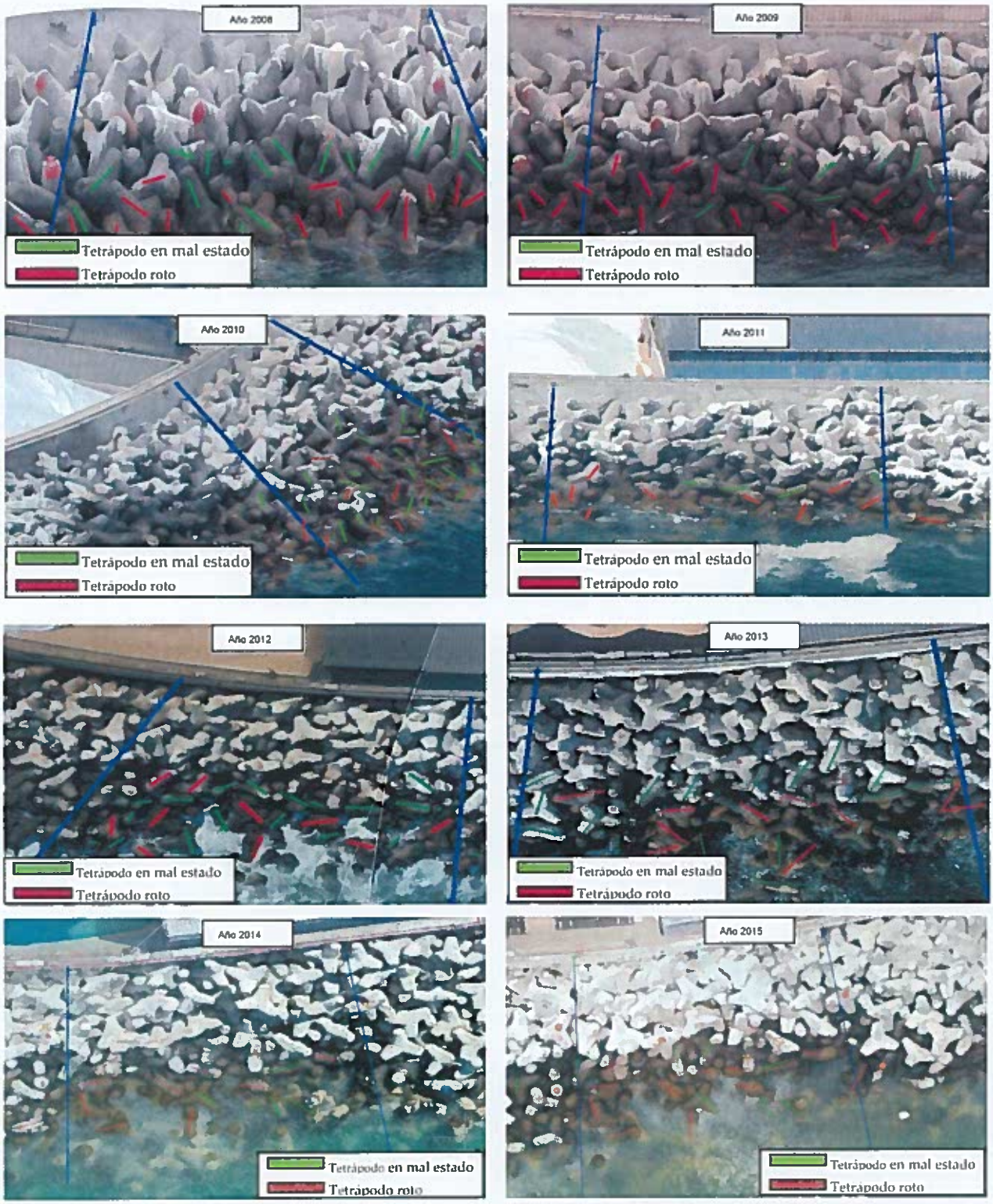

Figura 2.2: Tetrápodos Rotos y Dañados, para una misma sección (2008 a 2015)

2.2.4 Análisis de fotografías aéreas

Con las fotografías aéreas se evaluó el estado estructural actual de la escollera de dos maneras. Una permitió evaluar el desplazamiento relativo entre unidades y la otra evaluar el daño del rompeolas de acuerdo a la metodología de van der Meer (1988), tal como se hizo durante el monitoreo de línea base en el año 2005 y los monitoreos de los años 2007 al 2014.

2.2.4.1 Evaluación de desplazamientos mediante fotografías

Las series de fotografías de los monitoreos en años anteriores son las siguientes:

1. Años 2007 y 2008 fueron tomadas desde un helicóptero.
2. Desde el año 2009 al 2013 las fotografías son tomadas desde una avioneta. Por ello no es posible realizar una medición cuantitativa del desplazamiento de los tetrápodos basándose en las fotografías. Sin embargo, se tomaron puntos y líneas de referencia que permiten realizar comparaciones entre dos fotografías con diferentes ángulos y distancias focales. El procedimiento se explica a continuación.
    1) Se insertan las series de imágenes de en un archivo CAD.
    2) Se marcan los tetrápodos pintados con dos circunferencias concéntricas, de radios que representan aproximadamente 1 y 3 metros.
    3) A continuación se seleccionan parejas de tetrápodos marcados y se unen con una línea recta los centros de las circunferencias donde se encuentran los clavos Hilti.
    4) Luego se traza una línea recta entre dos marcas en el muro parapeto (las marcas en el parapeto que indican el metraje del rompeolas fueron utilizadas como referencia).
    5) Se extiende la primera línea (entre tetrápodos) hasta aquella que une las marcas en el muro parapeto, dividiéndola en dos segmentos.
    6) Se midió la línea completa entre marcas y uno de sus segmentos, obteniéndose la razón entre ambos.

    Esta medida elimina en parte el efecto de la profundidad, la distancia focal y el ángulo del objetivo, ya que se mide sobre una línea horizontal de dimensiones conocidas en la realidad y de profundidad constante respecto de los tetrápodos. Esta medida es sólo una aproximación y no se puede considerar como una medida cuantitativa exacta, sin embargo, es de una calidad cualitativa aceptable, puesto que permite detectar desplazamientos mayores a 50 cm, según lo indican las especificaciones del Anexo C-VIII del contrato de concesión.
3. La toma de fotografías desde el año 2014 se realizaron mediante un vehiculo aéreo no tripulado, el cual vuela a baja altura (30 metros sobre la losa aproximadamente) y mediante posicionamiento geográfico satelital. Esto permite controlar la toma de las fotografías, las que después de ser post-procesadas forman una única foto sin perspectiva y georreferenciada. Con el uso de esta tecnología si es posible realizar una medición

cuantitativa del desplazamiento de los tetrápodos. La comparación actual corresponde a la primera entre ortofotos, por lo que el procedimiento descrito en el punto 2 si bien sirve para comparar movimiento relativo entre tetrápodos, no se justifica para eliminar profundidad y perspectiva, ya que dicho trabajo ya fue realizado al generar la ortofoto.

La Figura 2.3 muestra el procedimiento antes descrito. El detalle de las series de fotos analizadas se encuentra en el Anexo A-3.

Con esta metodología se compararon los siguientes aspectos:

- La ubicación de los tetrápodos vecinos al interior de la circunferencia, para estimar desplazamientos relativos entre ellos, ver puntos magenta en la Figura 2.3.
- La ubicación de los tetrápodos que están más cercanos al muro parapeto respecto a la corona, para estimar asentamiento global del rompeolas.
- La ubicación de los tetrápodos a lo largo de la línea que une dos circunferencias, para estimar desplazamientos relativos entre ellos.
- La comparación entre las razones calculadas, como una medida de posición relativa respecto al muro parapeto.

La conclusión de este análisis es que no se aprecian desplazamientos significativos de los tetrápodos respecto a su posición de años anteriores (2005 a 2014) en los tramos evaluados.

Las diferencias que se puedan presentar se explican por variación en la localización de las marcas en el muro, así como también pueden explicarse por efectos de la solución de ortofoto encontrada en el postproceso de cada año. Cabe destacar que el análisis de fotografías no permite detectar desplazamientos pequeños, del orden de milímetros o centímetros, si no que más bien busca cambios bruscos, del orden de los decímetros o metros.

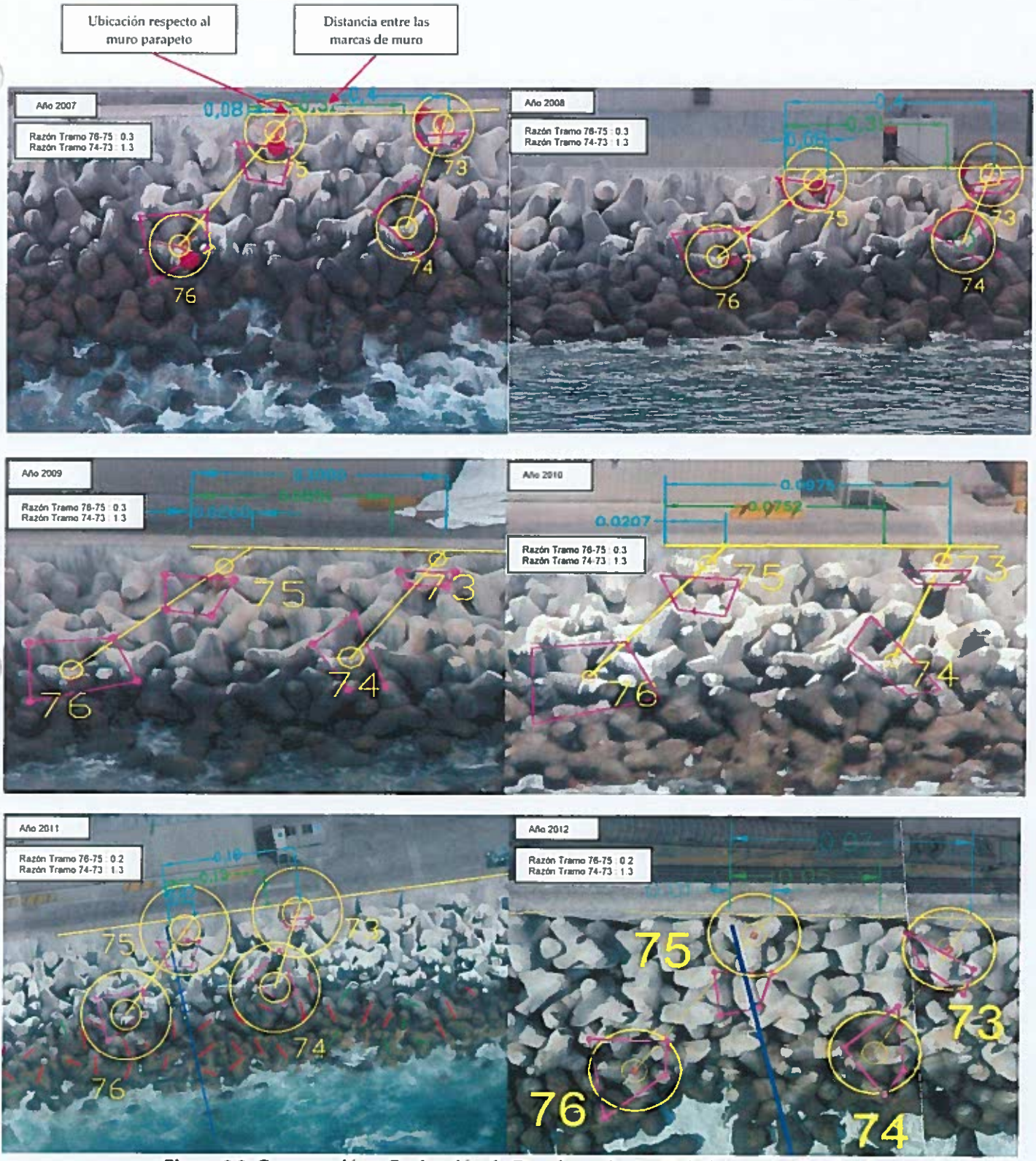

Figura 2.3: Comparación y Evaluación de Desplazamientos Relativos entre Tetrápodos

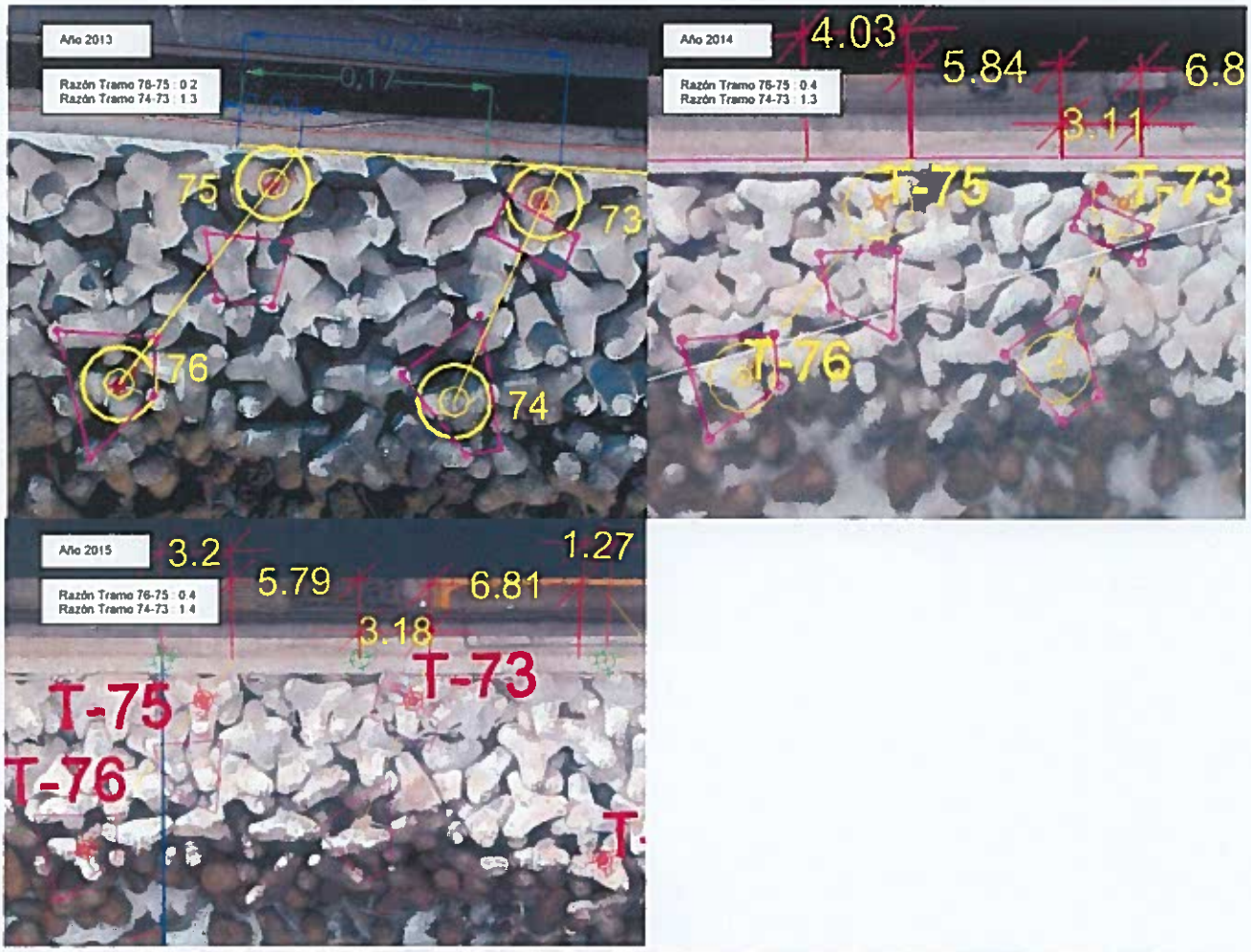

Figura 2.3 (Continuación): Comparación y Evaluación de Desplazamientos Relativos entre Tetrápodos

2.2.4.2 Evaluación de estabilidad mediante el Método de van der Meer (1988)

Con los datos de los tetrápodos dañados observados en las fotografías aéreas se calculó el número de estabilidad de van der Meer (1988), el cual relaciona tres elementos de diseño:

- La ola de diseño en el lugar de emplazamiento del rompeolas, a través de la relación Hs/Lo.
- El tipo de armadura y su tamaño, mediante el diámetro nominal Dn.
- El nivel de daños presente o de diseño, con el indice de daño Nod.

En la Figura 2.4 se muestra un gráfico que indica distintas condiciones estructurales o niveles de daño en un rompeolas con armadura de tetrápodos. La condición de oleaje de diseño en Arica corresponde a la línea azul. En condiciones ideales, es decir, sin daño, el número de estabilidad (relación altura de ola respecto del tamaño de la armadura) de esta estructura es de 1.1 (punto "a" en Figura 2.4). En condiciones ideales y bajo la condición de oleaje en Arica, se obtiene un comportamiento estructural sin daño hasta un número de estabilidad de 2.4 (punto "b" en Figura

2.4), suficientemente lejano como para asegurar la estabilidad global de la estructura. La condición máxima de diseño sugerida por van der Meer es la de inicio de daño, en este caso con un número de estabilidad de 3.5 (punto "c" en Figura 2.4).

Dados los daños en la zona intermareal del molo de abrigo, el número de estabilidad real de este rompeolas se calculó entre 3.3 y 3.8 según los datos obtenidos en 2005, ver Figura 2.4. Con los datos obtenidos en 2014, este número resultó entre 3.4 y 3.9, sin considerar la sección reparada del codo. De igual manera, este año (2015) el número estructural se ubica entre 3.3 y 3.8.

Se concluye que el daño determinado en el monitoreo de línea base del año 2005 no ha avanzado significativamente y que la condición real del rompeolas está en la zona de inicio de daño o condición máxima de diseño. La disminución en el número de estabilidad, se debe a que no fue posible contar unidades de tetrápodos dañados en la zona intermareal cercana al NRS. Notar que el número de estabilidad de falla en la estructura corresponde a 4.5 (punto "d" en Figura 2.4).

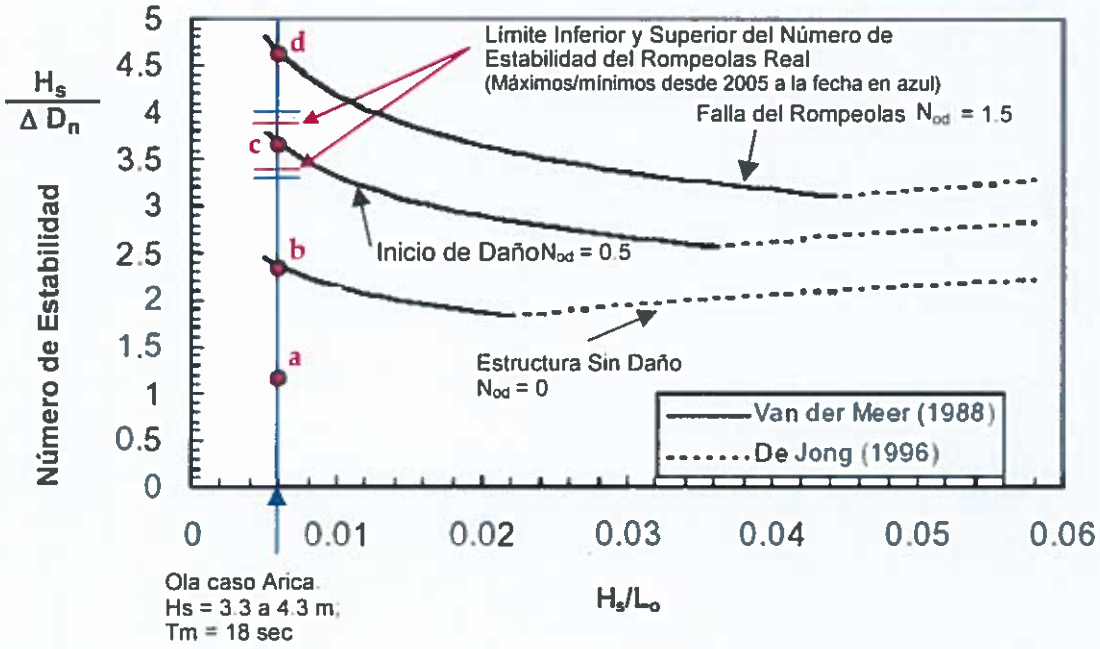

Figura 2.4: Número de Estabilidad según van der Meer para rompeolas de Arica

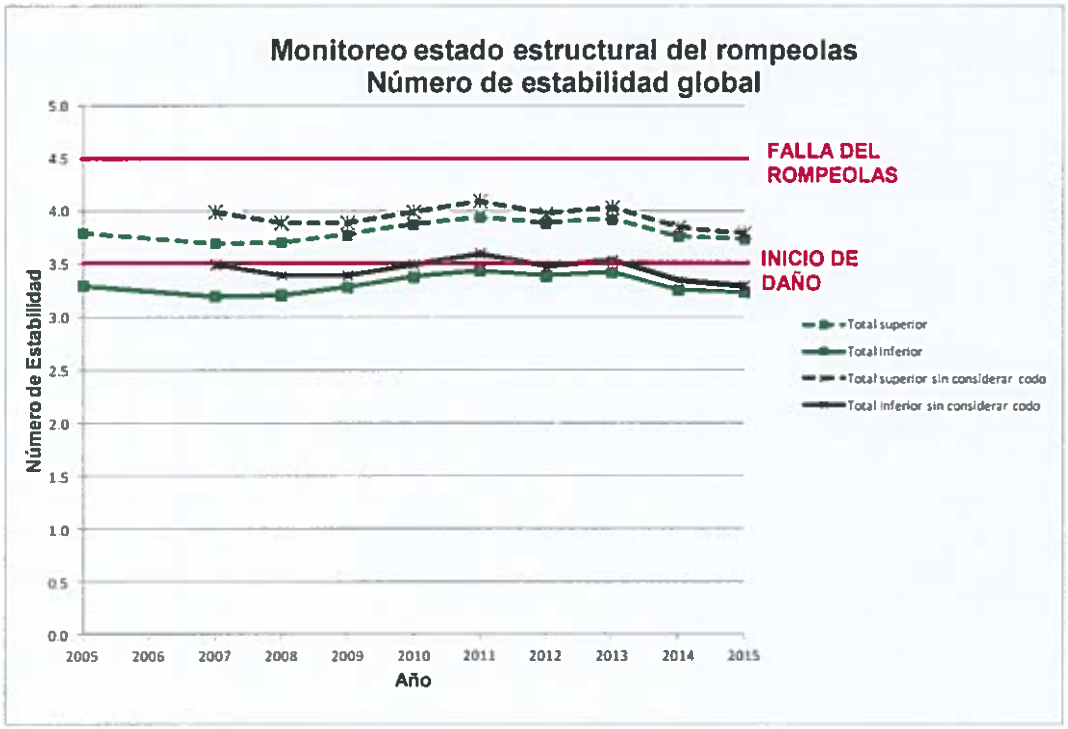

Figura 2.5: Número de estabilidad estructura global

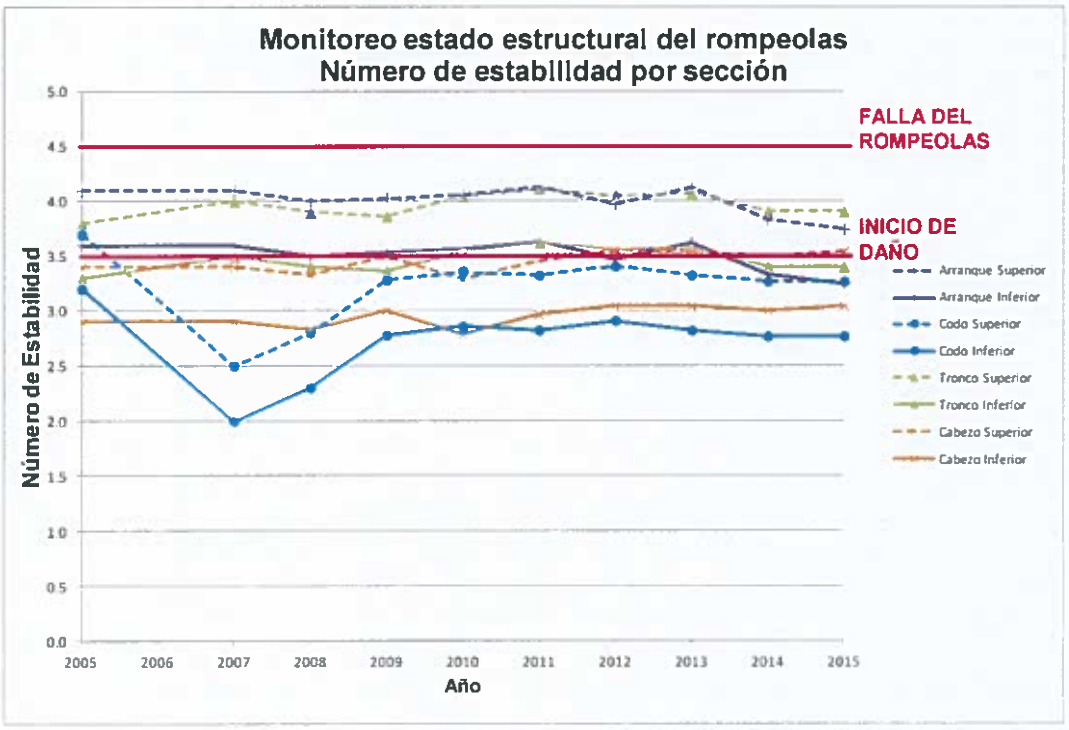

Figura 2.6: Número de estabilidad por sección

2.3 Calidad de hormigón de los tetrápodos

Se tomaron 12 muestras de hormigón de tetrápodos seleccionados en el arranque, codo, tronco y cabezo del rompeolas. Las muestras se sometieron a ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión de dichos elementos y analizar la evolución del deterioro en el tiempo. El detalle de las pruebas de laboratorio se encuentra en el Anexo B.

En la Tabla 2.1 se encuentra un resumen de la resistencia a la compresión de las probetas analizadas durante los años 2005 al 2015. El resultado muestra que la resistencia del hormigón aumentó en aproximadamente un 7% el año 2015 respecto al 2014 y aumentó 16% respecto del promedio total, obteniéndose un valor de 30.5 MPA. Las variaciones interanuales muestran una alta dispersión en los valores de resistencia, esto se atribuye a la variabilidad del material entre diferentes muestras y no a una disminución de la resistencia del hormigón, la cual ocurre lentamente con el tiempo.

Por último, se reitera que el hormigón según los elementos analizados tiene una calidad en torno a un hormigón H-25. Generalmente el hormigón para uso en armaduras es de calidad H-35, con una resistencia a la compresión de 35 Mpa (350 Kg/cm2), es decir, que los tetrápodos analizados en el año 2015 presentan en promedio un 87% de la resistencia mínima exigida a una estructura nueva.

Tabla 2.1: Resumen de la resistencia a la compresión

SECTOR	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPA)									
	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Cabezo	22.5	25.5	26.6	17	19.5	14.9	-	29.5	25.6	26.9
Tronco	23.4	26.4	27.7	21	18.6	-	-	24.6	28.9	26.1
Codo	27.7	29.8	32.2	22	22.2	24.2	33.4	30.8	30.3	29.7
Arranque	21.7	21.8	21.8	18.7	27.4	24.9	35.3	32.4	29.1	39.2
Promedio General	23.8	25.9	27.1	19.7	21.9	21.3	34.4	29.3	28.5	30.5
Desviación Estándar	2.7	3.3	4.3	2.3	4.0	5.6	1.3	3.4	2.0	6.0

SECTOR	DENSIDAD (kg/m³)									
	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Cabezo	2373	2366	2357	2107	2420	2351	-	2347	2363	2350
Tronco	2356	2373	2353	2373	2390	–	-	2360	2353	2320
Codo	2253	2370	2383	2400	2360	2364	2345	2343	2353	2343
Arranque	2215	2356	2387	2393	2355	2347	2367	2363	2363	2317
Promedio General	2299	2366	2370	2318	2381	2354	2356	2353	2358	2332
Desviación Estándar	77.2	7.4	17.5	141.3	30.1	8.9	15.6	9.7	5.8	16.6

2.4 Topobatimetría

Se efectuó un levantamiento topobatimétrico del molo de abrigo, de manera de comparar con los perfiles generados los años 2005 y 2014. Se generaron perfiles transversales cada 5 metros a lo largo del rompeolas. A continuación se entrega una descripción de los trabajos realizados.

2.4.1 Topografía

- Se realizó un levantamiento fotogramétrico sobre el área emergida del rompeolas y muro parapeto.
- Se generó un modelo de superficie digital, ortofoto y nube de puntos 3d mediante las técnicas de fotogrametría.

Uno de los productos que es posible obtener con las técnicas fotogramétricas realizadas a las imágenes aéreas es una nube de puntos 3D así como un modelo digital de superficie. La validez cuantitativa y precisión dependerán tanto de la calidad de los GCP asignados en el área levantada como del post proceso realizado al levantamiento.

Para el levantamiento 2015 se contó con una gran cantidad de GCP a lo largo de todo el molo de abrigo, de los cuales se escogieron y utilizaron 19 para la generación de información geoespacial, de la cual es posible obtener perfiles topográficos de precisión del orden de los centímetros. Si se combina dicha información con la información obtenida del levantamiento con multihaz, es posible generar perfiles topobatimétricos en cualquier sección del rompeolas, con una alta densidad.

La información topográfica, además de contar con coordenadas xyz, incluye un color asociado a cada punto en RGB lo que facilita el análisis visual. En la Figura 2.7 se presenta la zona del cabezo de acuerdo con el producto obtenido con el levantamiento 2015.

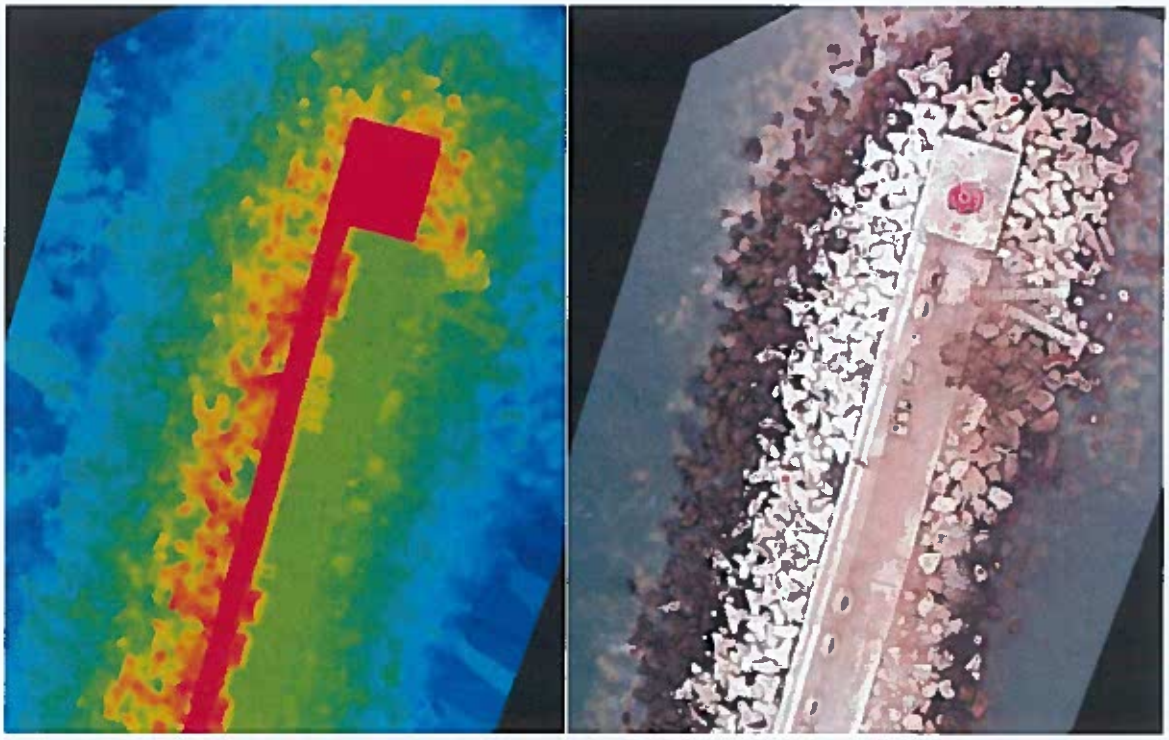

Figura 2.7: Modelo digital de topografía generado con levantamiento drone.

2.4.2 Batimetria

Dentro de los estudios, se ha realizado un barrido lateral del rompeolas por medio de una ecosonda multihaz. Este sistema ha permitido obtener un levantamiento de las características batimétricas e intermareales del sector con un alto nivel de detalles. La Figura 2.8 muestra la batimería de la zona por medio de un mapa de colores, logrando identifcar la configuración morfológica del fondo y de la zona intermareal. En esta se puede apreciar el elevado nivel de precisión de la zona del pie de la estructura, en la cual se logran discernir fragmentos de rocas, desmembramientos de los elementos y también formas de fondo, tales como ondas de arena. Se incluirá imágenes de la totalidad del rompeolas en el informe final.

Del análisis de la figura se concluye que el pie y la zona sumergida del rompeolas no muestran zonas con daños que puedan afectar la estabilidad global de la estructura. A pesar de la calidad de la imagen, no es posible contabilizar unidades dañadas o rotas.

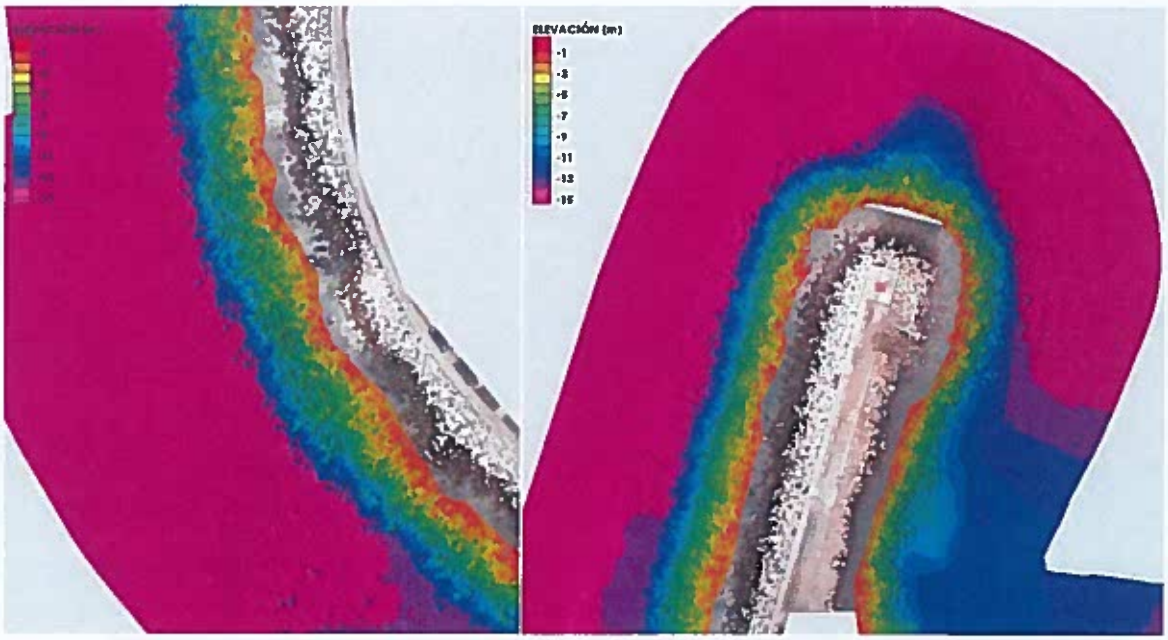

Figura 2.8: Segmentos del rompeolas con levantamiento multihaz

Dada la calidad de este tipo de levantamiento se recomienda considerar el reemplazo de la inspección submarina por este tipo de barrido para la determinación del estado del rompeolas bajo el nivel del mar y en la zona intermareal en los monitoreos posteriores, ya que su nivel de precisión permitiría determinar las condiciones en las cuales se encuentra la estructura y las características del fondo. Además, permite analizar la estructura como un todo, en vez de la escasa información de los perfiles.

2.4.3 Perfiles

Una vez que los datos topográficos y batímetricos fueron postprocesados y combinados, se procedió a generar perfiles transversales de las secciones del rompeolas. Además, se realizó perfiles comparativos con la información levantada en los años 2005 y 2014. Los perfiles actuales y las comparaciones se encuentran en el Anexo C del presente informe.

2.4.3.1 Comparación 2005 v/s 2015

El año 2005 se realizó un levantamiento de 14 perfiles transversales a lo largo del rompeolas. Dicho levantamiento fue realizado mediante técnicas de topografía convencional, tomando puntos de elemento en elemento, buscando seguir el eje referencial del perfil.

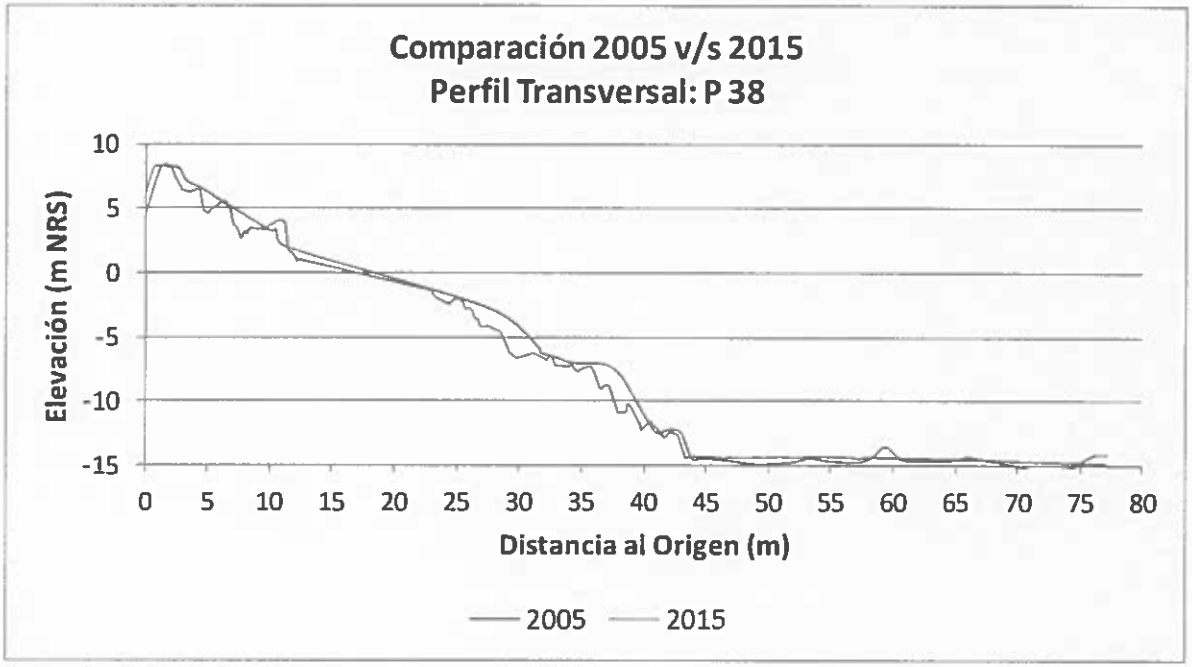

Figura 2.9: Comparación 2005 v/s 2015 de perfil transversal en el rompeolas

La metodología utilizada en 2005 dificulta la comparación de perfiles, dado que los puntos obtenidos no necesariamente pertenecen al eje del perfil, lo que no sucede con los perfiles extraídos el presente año. Para contrarrestar esto, se identificó los casos en que hubiese discrepancias y se extrajo perfiles en la vecindad del perfil original, con la topobatimetría del año 2015. Al hacer esto, es posible identificar si las diferencias entre perfiles se deben a la evolución del rompeolas o si se deben a incompatibilidad de ambas metodologías.

Al contar con una nube de puntos de todo el rompeolas, es relativamente sencillo generar perfiles en zonas donde no se tenía contemplado hacerlo.

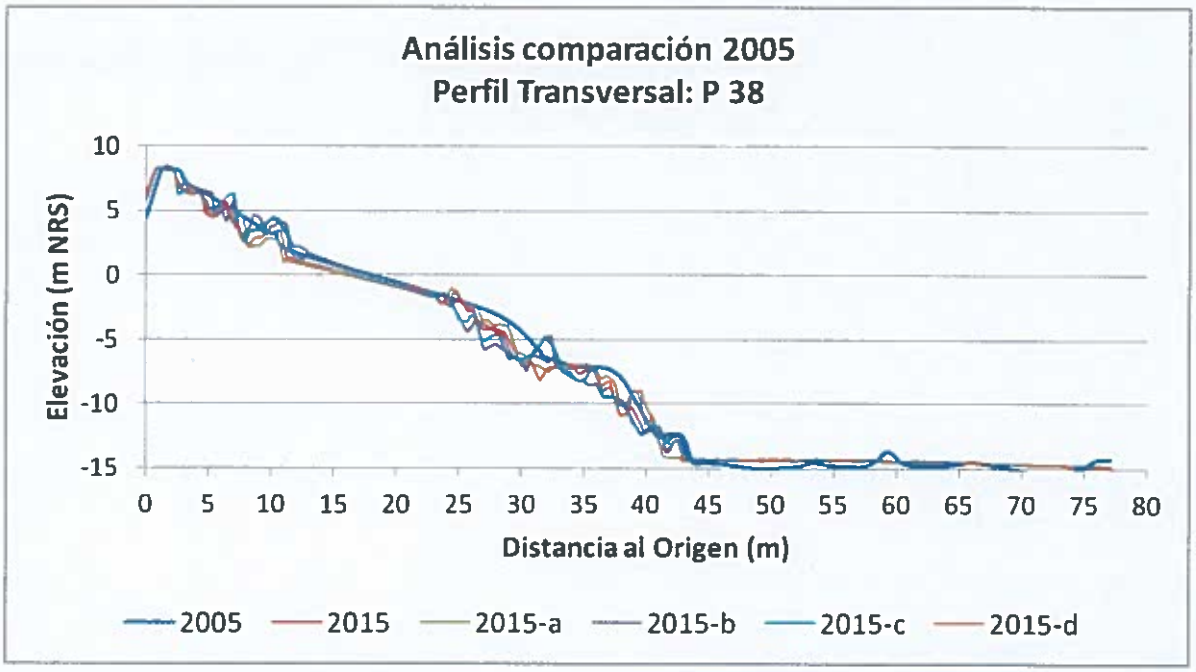

Figura 2.10: Análisis de discrepancias entre perfiles de 2005 y 2015.

La comparación de perfiles vecinos permite concluir que las diferencias observadas se deben a la naturaleza del levantamiento realizado en 2005 y no necesariamente a una evolución de la defensa.

2.4.3.2 Comparación 2014 v/s 2015

La comparación de perfiles entre ambos años se realizó utilizando para el año 2015 la topografía generada por la fotogrametría y para el año 2014 la topografía generada por el scanner láser. Una de las ventajas de realizar esto, es validar y comparar ambas metodologías.

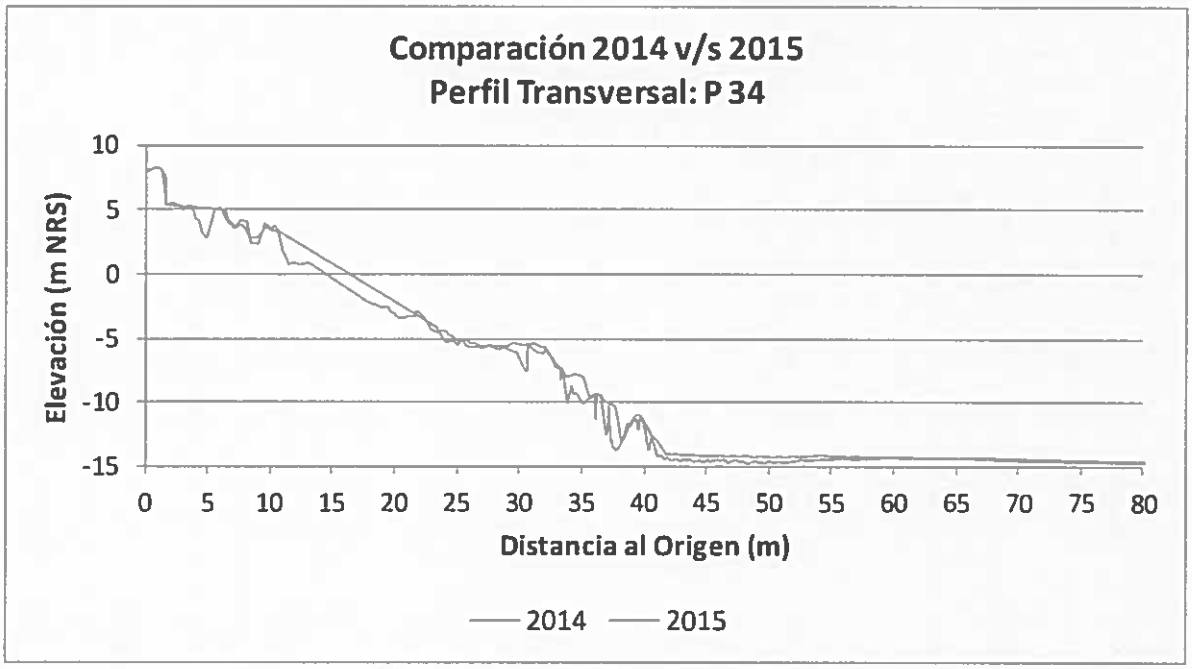

Figura 2.11: Análisis de discrepancias entre perfiles de 2014 y 2015.

En general, se observa una buena compatibilidad entre la información recogida por el scanner y la recogida por la fotogrametría.No se observa grandes variaciones de un año a otro.

3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se mostró mediante comparaciones de fotografías aéreas tomadas al rompeolas, que de acuerdo a la metodología utilizada, el deterioro que presenta la estructura no ha avanzado significativamente en estos últimos 10 años, dado que el movimiento relativo entre ellas es menor.

Con las nuevas fotografías se afinó la estimación de la estabilidad mediante el método de van der Meer (1988), encontrándose que este valor se localiza entre dos límites; el inferior equivalente a la condición de diseño máxima y el superior menor a la condición de falla.

El análisis de laboratorio de la resistencia del hormigón muestra que existe una variación de +7% respecto del año anterior. Ello se debe a la alta dispersión en el muestreo del hormigón, que hace que este análisis no sea confiable.

Sobre la base de las conclusiones anteriores se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Deben realizarse mantenciones anuales a las marcas en tetrápodos y sobre el muro parapeto, con el objeto de no perder las referencias del monitoreo.
2. Se recomienda mantener la metodología para el monitoreo fotográfico aéreo mediante el uso de drone, manteniendo los levantamientos topográficos convencionales a lo largo del rompeolas, como medida de control de calidad de los productos fotogramétricos.

   Se contempla un monitoreo anual de inspección visual y fotográfico apoyado con un drone bajo el enfoque de vuelo autónomo con puntos de control en tierra. Este enfoque permitirá mejor cobertura y mayor flexibilidad con respecto al aeroplano/helicóptero, concentrándose en zonas que lo requieran, coordinando de mejor manera condiciones ambientales (mareas y luminosidad) que optimicen la actividad. Además, el drone implica un costo menor al uso de una jornada en avioneta y permite un mayor control.
3. Se recomienda en adelante NO realizar los trabajos de extracción de muestras de hormigón, debido a los peligros y riesgos inherentes que existe en los trabajos de terreno asociados y a su escaso aporte adicional de información técnica útil.
4. Se recomienda cambiar la inspección submarina de video por una inspección mediante un sonar tipo multihaz, el cual es mucho más preciso y entrega mayor información.