



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO CONCEPTUAL DE PROFUNDIZACIÓN DEL  
CANAL HAVERBECK, XIV REGIÓN DE LOS RÍOS,  
VALDIVIA.**

**GINA ISRAEL GAJARDO ESPINOZA**

Noviembre 2018

ESTUDIO DE LA PROFUNDIZACIÓN DEL CANAL HAVERBECK, XIV REGIÓN  
DE LOS RÍOS, VALDIVIA.

Gina Israel Gajardo Espinoza

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
PATRICIO WINCKLER, REVISOR 1 Profesor guía	_____	_____
MATÍAS QUEZADA, REVISOR 2 Docente	_____	_____
SOLEDAD HIDALGO, REVISOR 3 Docente	_____	_____

## DECLARACIÓN

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.*

*La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

---

**Gina Gajardo Espinoza**  
**Memorista**

---

**Patricio Winckler Grez**  
**Profesor Guía**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por poner esta carrera en mi camino y ayudarme en cada momento que lo necesité. Considero que sin Él nada soy y nada puedo hacer.*

*Agradezco también a mi profesor guía Patricio Winckler por su disposición de revisar y poner atención a las dudas que tenía, a pesar de su escaso tiempo. Y un agradecimiento muy especial a mi profesor de Comisión Matías Quezada, quien a pesar de ya no ser mi profesor guía, se dio el tiempo de enseñarme con mucha paciencia el modelo y me ayudó bastante, considerando que su tiempo era muy limitado, se daba los espacios necesarios para atender mis dudas.*

*Agradezco a mi familia completa, en especial a mi madre Gina Espinoza quien me daba aliento (varios retos) y me ayudó en el proceso de tamizar las muestras de sedimento. Ella ha sido y siempre será el pilar fundamental en mi vida. Agradezco también a mi padre Oscar Gajardo quien siempre me apoyó en todo lo necesario, tanto moral como económicamente. A mis abuelitos Juan Espinoza y Rosa Ibañez, quisiera agradecer por sus oraciones constantes que me ayudaron mucho. También a mi novio Luis Jelvez, por la paciencia y comprensión que siempre me brindó, gracias por darme ánimo cuando más lo necesité.*

*Doy gracias a Dios por poder encontrar a unos amigos muy buenos dentro de la carrera, que también sentí su apoyo y ayuda cada vez que tenía alguna duda, especialmente a Francisco Navarro (Kiko), José Ribba (J.I), Paulette Massart (Polilla), Rodrigo Campos (Ro) y Javiera Nuñez (Javivi), los llevaré siempre en mi corazón.*

*Sin todos los que antes mencioné no hubiese podido lograrlo, por eso estoy inmensamente agradecida de cada uno de ellos.*

## LISTA DE CONTENIDOS

<b>DECLARACIÓN</b> .....	2
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	3
<b>LISTA DE CONTENIDOS</b> .....	4
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	7
1 RESUMEN.....	11
2 INTRODUCCIÓN.....	12
3 OBJETIVOS .....	13
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
4 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	14
5 MARCO TEÓRICO .....	15
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO.....	15
5.1.1 TERREMOTO 1960, VALDIVIA.....	16
5.1.2 CLIMA .....	17
5.2 ASPECTOS GENERALES DE LA HIDRÁULICA EN CONTORNO ABIERTO ...	19
5.2.1 CLASIFICACIÓN DEL ESCURRIMIENTO.....	19
5.2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS CANALES.....	23
5.2.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CANAL ABIERTO.....	23
5.2.4 DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN UNA SECCIÓN DEL CANAL .....	26
5.3 ASPECTOS GENERALES DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS ..	27
5.3.1 ARRASTRE INCIPIENTE DE SEDIMENTOS NO COHESIVOS.....	27
5.3.2 ÁNGULO DE REPOSO SUMERGIDO.....	27
5.3.3 FORMAS DE FONDO E INFLUENCIA DEL NÚMERO DE FROUDE .....	29
5.3.4 CRITERIOS DE ARRASTRE INCIPIENTE .....	30
5.3.5 TRANSPORTE INCIPIENTE DE SEDIMENTO GRADUADO .....	31
5.3.6 MECANISMOS DE TRANSPORTE .....	32
5.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO .....	33
5.4.1 MÓDULO HIDRODINÁMICO.....	34
5.4.2 MÓDULO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	35
5.5 BUQUE DE DISEÑO .....	36

5.6	DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD Y ANCHO DEL CANAL .....	38
5.6.1	PROFUNDIDAD DE LA VÍA DE NAVEGACIÓN .....	38
5.6.2	ANCHO DE LA VÍA DE NAVEGACIÓN .....	40
6	METODOLOGÍA .....	43
6.1	ASPECTOS GENERALES .....	43
6.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES NATURALES .....	44
6.2.1	SEDIMENTOS.....	45
6.2.2	MAREA.....	49
6.2.3	CORRIENTES.....	51
6.2.4	CAUDAL.....	52
6.2.5	BATIMETRÍA.....	53
6.3	MODELACIÓN NUMÉRICA SITUACIÓN ACTUAL (SIN DRAGADO).....	53
6.3.1	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	53
6.3.2	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	54
6.3.3	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTO .....	55
6.4	DISEÑO DE LA VÍA DE NAVEGACIÓN .....	56
6.5	MODELACIÓN NUMERICA SITUACIÓN CON PROYECTO (CON DRAGADO) 57	
6.5.1	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	57
6.5.2	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	57
6.6	EVALUACIÓN CONCEPTUAL DEL PROYECTO DEL CANAL ARTIFICIAL .....	57
6.6.1	TASA DE SEDIMENTACIÓN.....	57
6.6.2	DRAGADO INICIAL Y DE MANTENCIÓN .....	58
6.6.3	CUBICACIÓN.....	58
6.6.4	COSTOS DEL DRAGADO.....	58
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	59
7.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES NATURALES .....	59
7.1.1	SEDIMENTOS.....	59
7.1.2	MAREA.....	60
7.1.3	CORRIENTES.....	62
7.1.4	CAUDALES .....	64
7.2	MODELACIÓN NUMÉRICA SITUACIÓN ACTUAL, (SIN DRAGADO).....	66

7.2.1	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	66
7.2.2	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	68
7.2.3	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTO .....	76
7.3	DISEÑO DE LA VÍA DE NAVEGACIÓN .....	86
7.3.1	TASA DE SEDIMENTACIÓN ACTUAL.....	86
7.3.2	DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD.....	87
7.3.3	DETERMINACIÓN DEL ANCHO DE LA VIA DE NAVEGACIÓN.....	87
7.3.4	GEOMETRÍA DEL DRAGADO .....	87
7.4	MODELACIÓN NUMÉRICA SITUACIÓN CON PROYECTO.....	89
7.4.1	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	89
7.4.2	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	96
7.5	EVALUACIÓN CONCEPTUAL DEL PROYECTO DEL CANAL ARTIFICIAL ...	109
7.5.1	TASA DE SEDIMENTACIÓN.....	109
7.5.2	DRAGADO DE MANTENCIÓN.....	111
7.5.3	CUBICACIÓN Y COSTOS DEL DRAGADO .....	112
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	114
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
10	ANEXOS.....	117
10.1	SEDIMENTOS.....	117
10.2	RESULTADOS DETALLADO DE LOS PERFILES .....	119
10.2.1	PERFIL 1.....	119
10.2.2	PERFIL 2.....	120
10.2.3	PERFIL 3.....	121
10.2.4	PERFIL 4.....	123
10.2.5	PERFIL 5.....	124
10.2.6	PERFIL 6.....	125
10.2.7	PERFIL 7.....	126
10.2.8	PERFIL 8.....	127
10.3	MAREAS .....	129
10.4	CORRIENTES .....	130
10.5	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA SITUACIÓN ACTUAL.....	132
10.6	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SITUACIÓN ACTUAL .....	133

10.7	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA SITUACIÓN CON PROYECTO .....	135
10.8	MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SITUACIÓN CON PROYECTO.....	137
10.9	<i>HYDRODYNAMICS</i> .....	141
10.9.1	TWO-DIMENSIONAL DEPTH-AVERAGED FLOW EQUATIONS.....	141
10.9.2	MOMENTUM FLUX CORRECTION COEFFICIENT.....	142
10.9.3	CORIOLIS PARAMETER .....	143
10.9.4	BED SHEAR STRESSES.....	143
10.9.5	WIND SHEAR STRESSES.....	144
10.9.6	LATERAL SHEAR STRESSES CAUSED BY TURBULENCE .....	145
10.9.7	ELEMENT WETTING AND DRYING .....	146

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1:	Modelos numéricos.....	12
Tabla 2:	Rangos de validez de las ecuaciones de transporte de sedimentos del modelo FESWMS.....	35
Tabla 3:	Características del Buque de Diseño .....	38
Tabla 4:	Resguardo para la seguridad y control de la maniobrabilidad del buque ( <i>rvsm</i> ) y el margen de seguridad ( <i>rvsd</i> ).....	40
Tabla 5:	Coordenadas de los puntos de extracción .....	47
Tabla 6:	Coordenadas UTM Perfiles muestreados.....	60
Tabla 7:	Planos de referencia .....	61
Tabla 8:	Constituyentes de marea significativos, Bahía de Corral.....	62
Tabla 9:	Caudales simulados para discretizar el transporte de sedimentos .....	65
Tabla 10:	Costos del dragado inicial .....	113
Tabla 11:	Costos del dragado de mantención.....	113
Tabla 12:	Tabla de Marea del puerto de Corral, diciembre del 2013.....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1:	Área de estudio.....	16
Figura 5-2:	comparación de los climas templado, cálido, lluvioso y templado frío lluvioso con influencia mediterránea.....	17
Figura 5-3:	Estaciones Fluviométricas interpretadas de la Cuenca del río Valdivia.....	18
Figura 5-4:	Variación media mensual de las estaciones pluviales.....	19
Figura 5-5:	Clasificación de escurrimiento uniforme y variado .....	20
Figura 5-6:	Propagación de ondas en canales abiertos .....	22
Figura 5-7:	Compatibilización de regímenes de escurrimiento de torrente y río .....	23
Figura 5-8:	Elementos para caracterizar secciones de escurrimiento de canales .....	23



Figura 5-9: Distribución de Velocidades en sección transversal.....	24
Figura 5-10: Perfil vertical de velocidades, indicando la estructura estratificada del flujo .	25
Figura 5-11: Distribución de presión en canal de flujo recto (A) y curvilíneo (B).....	27
Figura 5-12: Angulo de reposo sumergido .....	28
Figura 5-13: Ondas sedimentarias del tipo micro y mesoformicas .....	30
Figura 5-14: Esquema de mecanismos de transporte de sólidos en ríos .....	33
Figura 5-15: Buque de Diseño .....	37
Figura 5-16: Buque de diseño atracado en el canal Haverbeck .....	37
Figura 5-17: Factores que intervienen en al determinar las profundidades del agua en las áreas de navegación y flotación.....	38
Figura 5-18: Anchura de las vías de tramo recto con un solo carril de navegación .....	42
Figura 6-1: Diagrama de flujo del desarrollo del estudio .....	43
Figura 6-2: Ubicación de los datos empleados para la caracterización de las condiciones naturales.....	44
Figura 6-3: División de los puntos de muestreo de sedimentos, Canal Haverbeck .....	46
Figura 6-4: Escala granulométrica de Wentworth.....	49
Figura 6-5: Forzantes del modelo .....	55
Figura 6-6: Puntos de análisis de simulación en el modelo FESWMS .....	56
Figura 7-1: Serie de tiempo, mes de diciembre 2013.....	61
Figura 7-2: Áreas de ubicación de derivadores.....	64
Figura 7-3: Batimetría en la condición actual. La escala representa profundidades [m] ...	66
Figura 7-4: Comparación series de tiempo .....	67
Figura 7-5: Comparación dato a dato.....	68
Figura 7-6: Superficie del agua, mes de julio .....	69
Figura 7-7: Número de Froude, mes de julio.....	70
Figura 7-8: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de julio.....	71
Figura 7-9: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de septiembre.....	71
Figura 7-10: Velocidades en el punto aguas arriba .....	72
Figura 7-11: Velocidad en el punto inicio .....	73
Figura 7-12: Velocidades en el punto curva del canal .....	73
Figura 7-13: Velocidades en el punto recto del canal.....	74
Figura 7-14: Velocidades en el punto final del canal .....	74
Figura 7-15: Velocidades en el punto aguas abajo .....	75
Figura 7-16: Velocidades del flujo en planta, según la marea .....	76
Figura 7-17: Bed shear stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de julio .....	77
Figura 7-18: Bed shear stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de septiembre .....	78
Figura 7-19: Bed shear stress en el punto aguas arriba.....	78
Figura 7-20: Bed shear stress en el punto de inicio .....	79
Figura 7-21: Bed shear stress en el punto curva del canal.....	79
Figura 7-22: Bed shear stress en el punto recto del canal .....	80
Figura 7-23: Bed shear stress en el punto final del canal.....	80
Figura 7-24: Bed shear stress en el punto aguas abajo .....	81

Figura 7-25: Transporte Adimensional, mes de julio .....	82
Figura 7-26: Transporte adimensional, mes de septiembre.....	82
Figura 7-27: Transporte adimensional punto aguas arriba del canal.....	83
Figura 7-28: Transporte adimensional punto inicio del canal.....	84
Figura 7-29: Transporte adimensional punto curva del canal.....	84
Figura 7-30: Transporte adimensional punto recta del canal.....	85
Figura 7-31: Transporte adimensional punto final del canal .....	85
Figura 7-32: Transporte adimensional punto aguas abajo del canal .....	86
Figura 7-33: Tasa de sedimentación actual [m <sup>3</sup> /h] .....	87
Figura 7-34: Cortes en planta .....	88
Figura 7-35: Dimensiones de la geometría de dragado, sección transversal del canal ...	88
Figura 7-36: Comparación de secciones en 3 cortes transversales .....	89
Figura 7-37: Batimetría modificada .....	90
Figura 7-38: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de julio, sin y con proyecto.....	91
Figura 7-39: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de septiembre, sin y con proyecto .....	92
Figura 7-40: Velocidades en el punto recto del canal, sin y con proyecto .....	94
Figura 7-41: Velocidades en el punto final del canal, sin y con proyecto.....	95
Figura 7-42: Velocidades en el punto aguas abajo, sin y con proyecto .....	96
Figura 7-43: Bed Shear Stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de julio, sin y con proyecto.....	97
Figura 7-44: Bed shear stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de septiembre, sin y con proyecto.....	98
Figura 7-45: Bed Shear Stress en el punto recto del canal, sin y con proyecto.....	100
Figura 7-46: Bed shear stress en el punto final del canal, sin y con proyecto .....	101
Figura 7-47: Bed shear stress en el punto aguas abajo, sin y con proyecto.....	102
Figura 7-48: Transporte Adimensional, mes de julio, sin y con proyecto.....	103
Figura 7-49: Transporte adimensional, mes de septiembre, sin y con proyecto .....	104
Figura 7-50: Transporte adimensional punto recta del canal, sin y con proyecto .....	106
Figura 7-51: Transporte adimensional punto final del canal, sin y con proyecto.....	107
Figura 7-52: Transporte adimensional punto aguas abajo del canal, sin y con proyecto	108
Figura 7-53: Tasa anual de sedimentación [m <sup>3</sup> /h] .....	110
Figura 7-54: Tiempo de mantención de dragado v/s tiempo de ejecución.....	111
Figura 7-55: Tiempo de Mantención de dragado.....	112
Figura 10-1: Extracción de muestras de Sedimento en el Canal Haverbeck .....	117
Figura 10-2: Peso de la muestra antes de ser tamizada .....	118
Figura 10-3: Proceso de Tamizado.....	118
Figura 10-4: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 1.....	119
Figura 10-5: Clasificación de las muestras en el perfil 1 .....	120
Figura 10-6: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 2.....	120
Figura 10-7: Clasificación de las muestras en el perfil 2 .....	121
Figura 10-8: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 3.....	121
Figura 10-9: Clasificación de las muestras en el perfil 3 .....	122
Figura 10-10: Grava encontrada en la muestra 3 del perfil 3.....	122
Figura 10-11: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 4.....	123

Figura 10-12: Clasificación de las muestras en el perfil 4 .....	123
Figura 10-13: Grava fina en las muestras 2 y 3 del perfil 4 .....	124
Figura 10-14: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 5.....	124
Figura 10-15: Clasificación de las muestras en el perfil 5 .....	125
Figura 10-16: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 6.....	125
Figura 10-17: Clasificación de las muestras en el perfil 6 .....	126
Figura 10-18: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 7.....	126
Figura 10-19: Clasificación de las muestras en el perfil 7 .....	127
Figura 10-20: Curvas granulométricas correspondientes al perfil 8.....	127
Figura 10-21: Clasificación de las muestras en el perfil 8 .....	128
Figura 10-22: Derivadores tipo cruceta .....	130
Figura 10-23: Foto N°1 el GPS en la embarcación y Foto N°2 GPS en tierra .....	130
Figura 10-24: Foto N° 1 GPS de la lancha y foto N° 2 bote zodiac .....	130
Figura 10-25: Escala gráfica (en metros) 1 : 50.000 .....	131
Figura 10-26: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de junio.....	132
Figura 10-27: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de agosto.....	132
Figura 10-28: Tensión de corte [N/m <sup>2</sup> ], mes de junio.....	133
Figura 10-29: Bed shear stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de agosto .....	133
Figura 10-30: Transporte Adimensional, mes de junio .....	134
Figura 10-31: Transporte Adimensional, mes de agosto .....	134
Figura 10-32: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de junio, sin y con proyecto .....	135
Figura 10-33: Magnitud de la velocidad [m/s], mes de agosto, sin y con proyecto .....	136
Figura 10-34: Bed Shear Stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de junio, sin y con proyecto.....	137
Figura 10-35: Bed Shear Stress [N/m <sup>2</sup> ], mes de agosto, sin y con proyecto.....	138
Figura 10-36: Transporte Adimensional, mes de junio, sin y con proyecto.....	139
Figura 10-37: Transporte Adimensional, mes de agosto, sin y con proyecto.....	140

## **1 RESUMEN**

En este proyecto de título se realizó un estudio del transporte de sedimentos del canal Haverbeck en el río Valdivia, cuyos resultados fueron entregados con el modelo numérico FESWMS-2DH.

Se determinó que para caudales menores o iguales a 508 m<sup>3</sup>/s no se produce transporte de sedimentos, por lo tanto, solo en los meses de junio, julio, agosto y septiembre existiría transporte, ya que son los que tienen mayor escurrimiento medio. El resto de los meses no fueron considerados debido a que tenían un caudal menor o igual al indicado.

Debido a que el canal en la condición natural no se encuentra apto para la navegación de buques de calado máximo de 7 m, se determinó una sección donde el buque pueda desplazarse de forma segura. Para lograr este nuevo fondo, considerando las recomendaciones de la ROM, se calculó la profundidad y el ancho necesario para la navegación, con esto, se obtuvieron resultados del transporte una vez realizada la situación con proyecto. Se observó que, con una mayor profundidad, las velocidades de la hidrodinámica del canal disminuyen, así como también, el transporte de sedimentos.

Finalmente, se realizó un cálculo de la tasa de sedimentación, con el cual se determinó un dragado de mantención, debido a la alta probabilidad a que el canal vuelva a recargarse de sedimento. Dicha mantención, será necesaria para la óptima y continua navegación por el canal y, de este modo, alcanzar el objetivo del proyecto.