



Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA AL MAR MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS

PABLO ANTONIO FEDERICI HERNÁNDEZ

ABRIL 2017

ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA AL MAR MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS

Pablo Antonio Federici Hernández

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

PATRICIO WINCKLER G.
Profesor guía

MATÍAS QUEZADA L.
Revisor

EUGENIA VALDEBENITO F.
Revisor

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.

AGRADECIMIENTOS

¡Un ciclo cerrado, una meta cumplida!

Eternamente agradecido de la vida.

La ayuda que me ha brindado mi mamá, toda mi familia y mis amigos ha sido perpetua y estoy completamente gratificado por ello.

Ciertamente me considero una persona afortunada, pues se me han presentado oportunidades maravillosas a lo largo de mi vida y en mi convicción de retribución quiero devolverlas a otras personas, para así propagar las cadenas del buen vivir.

Gracias al Pato por ser un excelente profesor guía y una mejor persona, a los profesores guías por su disposición y a todas las personas que me ayudaron durante toda esta etapa.

También tengo que agradecer a MixZone Inc y al Instituto de Hidráulica de Cantabria por facilitar licencias académicas de sus respectivos software y por tener la voluntad de responder cientos de dudas a través de correos electrónicos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. RESUMEN	10
2. INTRODUCCIÓN	11
3. OBJETIVOS	12
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
4. TERMINOLOGÍA	13
5. FUNDAMENTO TEÓRICO	15
5.1. GENERALIDADES.....	15
5.1.1. PLANTA DESALINIZADORA.....	15
5.1.2. SALMUERA.....	15
5.1.3. EMISARIO SUBMARINO.....	17
5.1.4. DILUCIÓN.....	19
5.2. NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE.....	20
5.3. COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR.....	24
5.4. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR.....	26
5.4.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO.....	26
5.4.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX.....	29
6. RESULTADOS	39
6.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO.....	40
6.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX.....	41
6.3. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX1.....	43
6.3.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR.....	44

6.3.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL	45
6.3.3. VELOCIDAD DE DESCARGA	47
6.3.4. DIFERENCIA DE DENSIDADES ENTRE EL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO	48
6.3.5. ÁNGULO DE DIRECCIÓN ENTRE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO.....	50
6.3.6. ESTRATIFICACIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA	51
6.3.7. PENDIENTE DE FONDO	53
6.4. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX2	56
6.4.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR.....	56
6.4.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL	57
6.4.3. VELOCIDAD DE DESCARGA	59
6.4.4. ÁNGULO DIRECCIÓN CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR - CHORRO 60	
6.4.5. NÚMERO DE CHORROS DESCARGANDO.....	62
6.4.6. CONFIGURACIÓN DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA	64
6.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	67
7. CONCLUSIONES.....	72
8. BIBLIOGRAFÍA.....	74
9. ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Procesos básicos osmosis inversa.....	15
Imagen 2: Esquemas de las diferentes descargas de salmuera en el medio ambiente marino	18
Imagen 3: Ejemplo de dilución de un fluido a medida que aumenta la distancia	19
Imagen 4: Ejemplo de una descarga de salmuera realizada desde el fondo.....	24
Imagen 5: Regiones en el comportamiento de la salmuera descargada en el mar.....	24
Imagen 6: Comienzo y expansión horizontal de la corriente de densidad	25
Imagen 7: Esquema para un chorro individual sumergido hipersalino con 60° de inclinación.....	27
Imagen 8: Esquema de la sección transversal medio receptor ilimitado	30
Imagen 9: Ejemplo de secuencia de ejecución de módulos para simular y clasificar chorros con flotabilidad positiva y negativa	31
Imagen 10: Variables axiales sección transversal.....	32
Imagen 11: Diagrama de descarga para un chorro individual sumergido.....	35
Imagen 12: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX1	36
Imagen 13: Interacción entre chorros y paso de chorro 3D a pluma 2D.....	37
Imagen 14: Variables vista en planta CORMIX2.....	37
Imagen 15: Ejemplos de configuraciones de difusores	38
Imagen 16: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX2.....	39
Imagen 17: Representación grafica de las características del chorro estimadas por (Roberts et al., 1997)	41
Imagen 18: Comparación de los resultados entre la caracterización teórica (Roberts et al., 1997) y la modelación numérica CORMIX	42
Imagen 19: Análisis de sensibilidad velocidad corriente medio receptor, CORMIX1	45
Imagen 20: Análisis de sensibilidad ángulo de inclinación c/r a la horizontal, CORMIX1 .	46
Imagen 21: Análisis de sensibilidad velocidad de descarga, CORMIX1	48

Imagen 22: Análisis de sensibilidad de la diferencia de densidades entre el chorro descargado y el medio receptor, CORMIX1	49
Imagen 23: Análisis sensibilidad del ángulo de dirección entre corriente medio receptor - chorro, CORMIX1	50
Imagen 24: Tipos de perfiles de densidad que permite utilizar CORMIX.....	51
Imagen 25: Análisis de sensibilidad estratificación en la columna de agua, CORMIX1	52
Imagen 26: Análisis de sensibilidad pendiente del fondo, CORMIX1	53
Imagen 27: Análisis sensibilidad velocidad de la corriente del medio receptor, CORMIX257	
Imagen 28: Análisis de sensibilidad del ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal, CORMIX2.....	58
Imagen 29: Análisis de sensibilidad de la velocidad de descarga, CORMIX2	59
Imagen 30: Análisis de sensibilidad del ángulo de la dirección de la corriente del medio receptor con respecto al chorro, CORMIX2	61
Imagen 31: Cantidad de chorros descargando, CORMIX2.....	62
Imagen 32: Análisis de sensibilidad número de chorros, CORMIX2.....	63
Imagen 33: Configuraciones de las boquillas de descarga utilizadas, CORMIX2.....	64
Imagen 34: Análisis de sensibilidad de la configuración de las boquillas de descarga, CORMIX2	65
Imagen 35: Vista aérea de la localidad de Los Molles. Las líneas amarilla, roja y verde no están a escala con respecto a la imagen y solamente se muestran a modo de referencia.	67
Imagen 36: Información batimétrica en la localidad de Los Molles.....	69
Imagen 37: Resultados de la modelación numérica del ejemplo de aplicación	70
Imagen 38: Alcance de salmuera descargada	71
Imagen 39: Esquema de secuencia de trabajo CORMIX	77
Imagen 40: Validación de la geometría del subsistema CORMIX2	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de cuerpos de agua según salinidad	16
Tabla 2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos dentro de la ZPL.....	22
Tabla 3: Expresiones para caracterizar el comportamiento de un chorro individual sumergido.....	28
Tabla 4: Modelos y subsistemas de CORMIX.....	29
Tabla 5: Resumen de parámetros utilizados	40
Tabla 6: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX1	55
Tabla 7: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX2	66
Tabla 8: Parámetros químicos de la descarga de la planta desalinizadora	68

1. RESUMEN

En el presente estudio numérico del comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos, se modelan los fenómenos que ocurren en un medio receptor acuático idealizado desde un punto de vista teórico. Se trata de una estimación de las características geométricas, de dilución y concentración del chorro y de la pluma de salmuera descargada. Una modelación numérica con el software CORMIX entregó una serie de resultados que fueron cuantificados y analizados, además se realizó una comparación con resultados obtenidos mediante una metodología propuesta por Phillip J. Roberts.

Un análisis de sensibilidad de las variables que participan en la simulación del comportamiento de la salmuera descargada, determinó el grado de influencia de cada una de ellas de manera individual. Las variables más influyentes y determinantes en dicho comportamiento se separan en campo cercano y campo lejano. En el campo cercano depende principalmente del ángulo de inclinación del chorro respecto a la horizontal, la velocidad de descarga y el ángulo producido entre el chorro y la corriente del medio receptor; en el campo lejano depende principalmente de la velocidad de la corriente del medio receptor, la diferencia de densidades entre el fluido descargado y el fluido del medio receptor y la pendiente de fondo.

Los procesos de mezcla y dilución más eficientes se producen en el campo cercano, específicamente hasta el punto donde ocurre el impacto del chorro con el fondo. Una vez ocurrido dicho impacto los efectos turbulentos inducidos en la descarga inicial no son importantes y comienza la estratificación del flujo producto de la diferencia de densidades entre ambos fluidos. En esta zona se da comienzo a la región de campo lejano, la cual es característica de no producir importantes procesos de mezcla, salvo en los casos en que la velocidad de la corriente del medio receptor sea significativamente alta. También se determinó que las descargas mediante múltiples chorros producen procesos de mezcla más eficientes con respecto a las descargas mediante un chorro individual.

Se realizó un ejemplo de aplicación de una descarga de salmuera mediante emisario submarino en las cercanías de la localidad de Los Molles; se realizó un diseño de descarga en aguas relativamente profundas y otro en aguas menos profundas mediante múltiples chorros sumergidos. Se recurrió a las especificaciones que impone la normativa ambiental nacional e internacional y se calculó el área de impacto generada por la descarga. Para el caso en estudio se comprobó que en la región de campo cercano los valores de dilución y concentración de salinidad cumplen con las restricciones ambientales. Con ello se minimiza el potencial impacto ambiental que representan las descargas de salmuera en el medio ambiente marino.