



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS PARA EL DISEÑO DE LA PLAYA ARTIFICIAL EL SALITRE, TOCOPILLA

Mario Alejandro Venenciano Vivanco

Enero 2014

PROYECTO DE TÍTULO

Manejo de arenas contaminadas para el diseño de la playa artificial El Salitre, Tocopilla.

**MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS PARA EL DISEÑO DE LA PLAYA ARTIFICIAL EL
SALITRE, TOCOPILLA.**

Mario Alejandro Venenciano Vivanco

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Claudio Hernández
Profesor guía

José Beyá Marshall
Docente

Hernán Vergara Cortés
Docente

VALPARAÍSO
Enero 2014

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.

CLAUDIO HERNÁNDEZ TORO
PROFESOR GUÍA

MARIO VENENCIANO VIVANCO
AUTOR

*Dedicado a mi madre Micaela.
Dios sabe porque partiste antes de lo esperado,
mi corazón sabe cuánto te extraño,
en este instante mis ojos reflejan la tristeza de no poder tenerte conmigo.
Hubiera querido poder agradecerte personalmente
tu sacrificio, esfuerzo, amor y cariño que me entregaste.
Ojalá estés orgullosa de la persona que formaste.
Te quiero mucho.*

*Quisiera agradecer a Loreto,
la persona que ha llenado mi corazón con su amor,
que ha estado conmigo en las buenas y en las malas,
motivándome y ayudándome a seguir adelante.
A mi hija Isidora, mi princesa, mi pollo, mi razón de vivir.
A mis suegros, Isabel y Jorge, mis segundos padres.*

*Quisiera agradecer también a mi padre Mario,
quien siempre me apoyó en mis decisiones,
si bien no estuvo tan presente,
sé que ahora desde el cielo lo está.*

*Agradezco a la Empresa GHD y a Paula Arias,
por facilitar antecedentes y software para desarrollar esta memoria,
y por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.*

*A Claudio Hernández, mi profesor guía,
por aclarar mis dudas y guiarme en la elaboración de este documento,
y principalmente por motivarme a finalizar mi memoria.*

*A mis compañeros de trabajo,
sería arriesgado y laborioso nombrarlos a cada uno,
los que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme, orientarme en mis dudas,
y a recordarme día a día que debía terminar mi memoria.*

Agradecer a Alexis Toro, por ayudarme con la revisión final del documento.

*Finalmente, agradecer a mis compañeros y profesores de carrera,
los cuales me dieron la base para poder ser
un profesional del área marítima.*

*Quando la vida te presenta razones para llorar,
demuéstrale que tienes mil y una razones para reír.
Facundo Cabral.*

CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	19
2.	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GENERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3.	MARCO TEÓRICO	24
3.1	GENERALIDADES DE LAS PLAYAS	24
3.1.1	FORMACIÓN DE LAS PLAYAS	24
3.1.2	TIPOS DE PLAYAS	25
3.1.3	FUNCIONES DE UNA PLAYA	25
3.1.4	TIPOS DE ACTUACIONES EN LAS PLAYAS	26
3.1.5	PLAYAS ARTIFICIALES	27
3.1.6	EQUILIBRIO DE PLAYAS	28
3.2	CONTAMINACIÓN MARINA	32
3.2.1	FUENTES Y ORIGENES DE LA CONTAMINACIÓN MARINA	32
3.2.2	CONVENIOS SOBRE VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR	34
3.2.3	LEGISLACIÓN SOBRE VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR	35
3.2.4	METALES PESADOS EN SEDIMENTOS	39
4.	DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO	44
4.1	UBICACIÓN DE LA PLAYA	44
4.2	EVOLUCIÓN DE LA PLAYA	45
4.3	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA PLAYA	48
4.4	ROMPIENTE DE LA PLAYA	49
4.5	ROMPEOLAS EXISTENTE	51
4.6	ROCAS ACUMULADAS EN LA PLAYA	52
4.7	AFLORAMIENTOS ROCOSOS	52
4.8	USO DE LA PLAYA	53
4.9	INFRAESTRUCTURA TERRESTRE	54
5.	ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES	57
5.1	TOPO-BATIMETRÍA	57
5.2	CORRIENTES	57
5.3	MAREA	59
5.4	OLEAJE	61
5.5	GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS	65
6.	ANÁLISIS DE CALIDAD AMBIENTAL DE SEDIMENTOS	69
6.1	CALIDAD AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS	69
6.2	PELIGROSIDAD DE LAS ARENAS	72
7.	CONFIGURACIÓN DE PLAYA ARTIFICIAL	75
7.1	ANÁLISIS DE PLAYA ARTIFICIAL PARA PLAYA EL SALITRE	75
7.2	PLAYAS ARTIFICIALES CONSTRUIDAS EN LA REGIÓN	76
7.2.1	ESTUDIO DE MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PLAYAS ARTIFICIALES DE LA II REGIÓN	80
7.3	CRITERIOS DE DISEÑO PARA CONFIGURACIÓN DE PLAYA	82
7.3.1	ANCHO DE PLAYA	82

7.3.2	FUNCIONALIDAD DE LA PLAYA	82
7.3.3	PASEO COSTERO COMPLEMENTARIO	82
7.3.4	OLEAJE	82
7.3.5	GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS	83
7.3.6	NIVELES DE SUPERFICIE AGUA	83
7.3.7	CORONAMIENTO BERMA DE PLAYA	84
7.3.8	FUNCIONALIDAD DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN	84
7.4	FORMA DE PLAYA	84
7.4.1	ANÁLISIS DE PLANTA DE PLAYA	84
7.4.2	ANÁLISIS DE PERFIL DE PLAYA	86
7.5	CONFIGURACIÓN PROPUESTA	91
8.	VOLÚMENES DE ARENAS A MANEJAR	93
8.1	VOLUMEN TOTAL DE ARENAS A EXTRAER EN LA PLAYA	93
8.1.1	RESULTADOS DE ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS	93
8.1.2	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE ARENAS	95
8.2	VOLUMEN TOTAL DE ARENAS A EXTRAER CON PROYECTO	96
8.3	ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN PARCIAL DE ARENAS	97
8.3.1	VOLÚMENES DE ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN PARCIAL DE ARENAS	98
8.4	VOLUMEN DE ARENAS LIMPIAS DE RELLENO	98
8.5	RESUMEN DE VOLÚMENES DE ARENAS A MANEJAR	99
9.	MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS	101
9.1	ALTERNATIVAS DE MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS	101
9.1.1	TRASLADO DE LAS ARENAS A UNA PLANTA DE TRATAMIENTO	101
9.1.2	VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR	102
9.1.3	REUTILIZACIÓN DE LAS ARENAS	105
9.2	COSTOS ECONÓMICOS DE ALTERNATIVAS DE MANEJO	125
9.2.1	COSTOS TRASLADO DE LAS ARENAS A UNA PLANTA DE TRATAMIENTO	125
9.2.2	COSTOS VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR	126
9.2.3	COSTOS REUTILIZACIÓN DE ARENAS	126
9.2.4	COSTOS DEPÓSITO DE ARENAS LIMPIAS DE RELLENO	128
9.3	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MANEJO	129
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
10.1	SITUACIÓN ACTUAL DE LA PLAYA	138
10.2	CONDICIONES NATURALES	138
10.3	CALIDAD AMBIENTAL DE SEDIMENTOS	138
10.4	VOLUMEN DE ARENAS CONTAMINADAS	138
10.5	ALTERNATIVAS DE MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS	139
10.6	COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE MANEJO	140
10.7	RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL PROYECTO DE PLAYA ARTIFICIAL	140
10.8	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	141
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
12.	ANEXOS	148
12.1	ESTIMACIÓN DE ENROCADOS PARA ROMPEOLAS	148
12.1.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	148
12.1.2	DISEÑO DE ELEMENTOS DE CORAZA	151
12.2	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MURO DE CONTENCIÓN	153
12.2.1	PARÁMETROS GEOTECNICOS DE LOS SUELOS DE RELLENO	153

12.2.2	GEOMETRÍA DEL MURO	153
12.2.3	CASO ESTÁTICO	153
12.2.4	CASO SÍSMICO	155
12.3	ANEXOS DE COSTOS DE ALTERNATIVAS DE MANEJO	158
12.3.1	ANEXOS DE COSTOS DE DRAGADO Y VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR	158
12.3.2	ANEXOS DE COSTOS ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE ARENAS	159
12.3.3	ANEXOS DE COSTOS DEPÓSITO ARENAS LIMPIAS DE RELLENO	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la playa El Salitre.	19
Figura 2: Vista panorámica de la playa El Salitre.	20
Figura 3: Zonificación y elementos de una playa.	24
Figura 4: Playa como defensa de la costa.	25
Figura 5: Sistema de dunar costero.	26
Figura 6: La playa como zona de esparcimiento.	26
Figura 7: Ejemplos de tipos de playas artificiales.	28
Figura 8: Esquema de la espiral logarítmica.	29
Figura 9: Esquema general de playa encajada en equilibrio.	30
Figura 10: Perfil de equilibrio y profundidad de cierre.	31
Figura 11: Principales vías de penetración de contaminantes en el mar.	33
Figura 12: Procedimiento para gestión de materiales de dragado en España.	39
Figura 13: Procedencia y vías principales de entrada al mar de los metales pesados.	40
Figura 14: El rol de los elementos químicos en los procesos vitales.	40
Figura 15: Concentraciones de contaminantes y daños al ecosistema y al hombre.	41
Figura 16: Ubicación de playa El Salitre.	44
Figura 17: Imagen aérea de playa El Salitre año 1980 (04/09/1980-13:28).	45
Figura 18: Imagen aérea de playa El Salitre año 1998 (26/03/1998-13:15).	46
Figura 19: Imagen aérea de playa El Salitre año 2005 (23/08/2005-18:53).	47
Figura 20: Comparación de líneas de baja marea y de playa.	48
Figura 21: Características geométricas de la playa El Salitre.	48
Figura 22: Perfil tipo de la playa.	49
Figura 23: Bajamar y pleamar observadas en terreno.	49
Figura 24: Tipos de rompientes.	50
Figura 25: Secuencia de rompimiento en la playa El Salitre.	50
Figura 26: Rompeolas de la playa El Salitre.	51
Figura 27: Imágenes de rompeolas existente en la playa.	51
Figura 28: Ubicación de rocas acumuladas en la playa.	52
Figura 29: Rocas acumuladas en la playa.	52
Figura 30: Ubicación de afloramientos rocosos.	53
Figura 31: Afloramientos rocosos.	53
Figura 32: Usos actuales de la playa.	54
Figura 33: Prohibido el paso.	54
Figura 34: Infraestructura terrestre.	55
Figura 35: Paseo costero.	55
Figura 36: Edificaciones abandonadas.	55
Figura 37: Levantamiento topo-batimétrico, playa El Salitre.	57
Figura 38: Mediciones de corrientes lagrangianas en playa El Salitre.	57
Figura 39: Trayectorias de los derivadores en marea vaciante y llenante, medidos en cuadratura.	58
Figura 40: Trayectorias de los derivadores en marea vaciante y llenante, medidos en sicigia.	59
Figura 41: Estación de marea instalada en la caleta de pescadores de Tocopilla.	61
Figura 42: Comparación de marea medida con marea pronosticada por SHOA.	61
Figura 43: Ubicación de zona de estudio, playa El Salitre.	62
Figura 44: Imagen de ubicación de puntos de extracción de resultados.	62
Figura 45: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=225°.	63
Figura 46: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=270°.	63
Figura 47: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=315°.	63
Figura 48: Rosa altura oleaje en P2.	64
Figura 49: Ubicación de las estaciones de muestreo de sedimentos.	66
Figura 50: Grafico de tamaños medios de los sedimentos.	67
Figura 51: Límites de concentraciones de metales pesados (CEDEX 2004).	69

Figura 52: Comparación de concentraciones de Cobre y Zinc con normativa CEDEX.	70
Figura 53: Concentración aproximada de Cobre en el área de estudio.	70
Figura 54: Concentración aproximada de Zinc en el área de estudio.	71
Figura 55: Comparación de suelos al norte y sur del puerto de Tocopilla.	72
Figura 56: Puntos de muestreo para ensayo de peligrosidad.	73
Figura 57: Planta playa El Salitre, proyecto Incostas 1998.	75
Figura 58: Proyecto Incostas, superpuesto con imagen SAF 2005.	76
Figura 59: Playas artificiales construidas en la ciudad de Antofagasta.	77
Figura 60: Playa artificial construida en la ciudad de Tocopilla.	77
Figura 61: Playa Balneario-Antofagasta.	78
Figura 62: Playa Balneario-Antofagasta.	78
Figura 63: Playa Trocadero-Antofagasta.	79
Figura 64: Playa Covadonga-Tocopilla.	79
Figura 65: Sectores erosionados de las playas artificiales.	80
Figura 66: Plantas de equilibrio playa Balneario y playa Paraíso.	81
Figura 67: Planta de equilibrio playa Trocadero.	81
Figura 68: Proyección de límite de paseo costero.	82
Figura 69: Rosa altura oleaje en P2.	83
Figura 70: Coeficientes C0, C1, C2 en función de β .	84
Figura 71: Dirección de flujo medio de oleaje en playa El Salitre.	85
Figura 72: Trazado de rayos y forma en planta de playa.	86
Figura 73: Perfil de equilibrio, Dean (1977).	87
Figura 74: Probabilidad de excedencia de altura de oleaje en zona cercana.	88
Figura 75: Ubicación en planta de profundidad de cierre.	88
Figura 76: Forma del perfil de equilibrio de la playa El Salitre.	89
Figura 77: Forma del perfil de equilibrio proyectado para la playa El Salitre.	90
Figura 78: Configuración de playa propuesta.	91
Figura 79: Ubicación de las lanzas de agua y calicatas.	93
Figura 80: Estratos de arenas estimados para la playa El Salitre.	95
Figura 81: Superficies de estratos de arena de playa El Salitre.	95
Figura 82: Estimación en planta de estratos de arena con proyecto.	96
Figura 83: Extracción parcial y relleno por estrato de arenas.	97
Figura 84: Superficies y volúmenes de extracción para alternativas de extracción parcial.	98
Figura 85: Modelo civil 3D de arenas de relleno.	98
Figura 86: Planta de tratamiento Hidronor Chile.	101
Figura 87: Vehículos de Hidronor para el transporte de residuos.	102
Figura 88: Draga Ernesto Pinto.	103
Figura 89: Clasificación del material dragado en base a concentraciones de Cobre.	104
Figura 90: Clasificación del material dragado en base a concentraciones de Zinc.	105
Figura 91: Nivelación playa para alternativas de extracción.	106
Figura 92: Superficies y volúmenes de nivelación para alternativas de extracción parcial.	106
Figura 93: Superficie de playa a cubrir con geotextil de separación.	106
Figura 94: Sección tipo de geotubos.	107
Figura 95: Funcionamiento de los geotubos.	108
Figura 96: Extracción y llenado de geotubos con sedimentos contaminados.	108
Figura 97: Sección tipo de rompeolas con núcleo de geotubos y coraza de rocas.	110
Figura 98: Construcción rompeolas con núcleo de geotubos y coraza de rocas.	110
Figura 99: Marina Stella Maris.	111
Figura 100: Canal bidimensional del INH.	111
Figura 101: Equipos y Canal Bidimensional del INH.	112
Figura 102: Perfil de modelación.	112
Figura 103: Sección ensayada de rompeolas sur con núcleo de rocas.	113
Figura 104: Estado inicial rompeolas sur con núcleo de rocas.	114
Figura 105: Estado final rompeolas sur con núcleo de rocas.	114
Figura 106: Gráfico de desplazamiento de rocas por ensayo - rompeolas núcleo rocas.	115

Figura 107: Gráfico de desplazamiento de rocas por sector de rompeolas - rompeolas núcleo rocas.	115
Figura 108: Sección ensayada de rompeolas sur con núcleo de geotubos.	116
Figura 109: Preparación de ensayo de rompeolas con núcleo de geotubos.	116
Figura 110: Estado inicial rompeolas sur con núcleo de geotubos.	116
Figura 111: Estado final rompeolas sur con núcleo de geotubos.	117
Figura 112: Gráfico de desplazamiento de rocas por ensayo - rompeolas núcleo geotubos.	117
Figura 113: Gráfico de desplazamiento de rocas por sector de rompeolas - rompeolas núcleo geotubos.	118
Figura 114: Gráfico de comparación de desplazamiento de rocas.	118
Figura 115: Imagen referencial de proyecto MINVU para playa El Salitre.	120
Figura 116: Sectores factibles de proyecto MINVU para relleno.	120
Figura 117: Sección tipo de relleno para proyecto MINVU.	121
Figura 118: Alternativas de ampliación del proyecto MINVU.	122
Figura 119: Alternativa de ampliación sector sur de proyecto MINVU.	123
Figura 120: Sección tipo, ampliación de obras en el sector sur.	123
Figura 121: Alternativa de ampliación sector norte de proyecto MINVU.	124
Figura 122: Sección tipo, ampliación de obras en el sector norte.	124
Figura 123: Volúmenes de arenas para las alternativas de extracción.	129
Figura 124: Costos de alternativas planta de tratamiento y vertido en el mar.	130
Figura 125: Distribución general de arenas reutilizadas.	131
Figura 126: Gráfico de volúmenes totales de alternativas de reutilización.	132
Figura 127: Gráfico de costos de alternativas de reutilización.	133
Figura 128: Costos por manejo de arenas sobrantes.	133
Figura 129: Costos totales de alternativa planta de tratamiento con manejo de arenas no reutilizadas.	134
Figura 130: Costos totales de alternativa vertido de arenas en el mar con manejo de arenas no reutilizadas.	134
Figura 131: Costos totales de alternativa reutilización de arenas con manejo de arenas sobrantes mediante una planta tratamiento.	135
Figura 132: Costos totales de alternativa reutilización de arenas con manejo de arenas sobrantes mediante vertido de arenas en el mar.	135
Figura 133: Comparación de costos totales de alternativas de manejo.	136
Figura 134: Formulaciones de Goda para determinar altura al pie.	149
Figura 135: Grafico para determinar coeficiente de shoaling.	150
Figura 136: Evolución de la altura de oleaje de diseño con la profundidad.	150
Figura 137: Rangos de peso para los elementos de coraza.	152
Figura 138: Parámetros geométricos de muro de contención.	153
Figura 139: Empujes estativos sobre muro gravitacional y muro tipo L.	153
Figura 140: Empujes sísmicos sobre muro gravitacional y muro tipo L.	155
Figura 141: Zonificación sísmica de las regiones I, II y III.	156
Figura 142: Disminución de muro y enrocados en sector sur proyecto.	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Número mínimo de muestras para volúmenes de sedimentos a dragar.	36
Tabla 2: Concentraciones utilizadas para establecer niveles de acción.	38
Tabla 3: Normas de calidad de sedimentos para protección de organismos marinos.	42
Tabla 4: Normativa española de calidad de sedimentos para regeneración de playas.	42
Tabla 5: Clasificación de rotura según número de Iribarren.	50
Tabla 6: Diferencias de marea y otras constantes.	60
Tabla 7: Planos maréales pronosticados para Tocopilla.	60
Tabla 8: Tabla incidencia dirección y altura, Punto 2.	64
Tabla 9: Tabla incidencia altura y periodo, Punto 2.	65
Tabla 10: Tabla incidencia dirección y periodo, Punto 2.	65
Tabla 11 Valores extremos de altura de ola en sitio estudio, III cuadrante.	65
Tabla 12: Coordenadas de ubicación de las muestras de sedimentos.	66
Tabla 13: Resultados de estaciones de muestreo.	67
Tabla 14: Concentraciones de metales pesados (mg/kg) encontradas en la playa El Salitre.	69
Tabla 15: Valores de radios para parábolas de rompeolas sur y norte.	86
Tabla 16: Parámetros del perfil de equilibrio.	87
Tabla 17: Dimensiones del perfil de equilibrio.	89
Tabla 18: Profundidades del perfil de equilibrio proyectado.	90
Tabla 19: Coordenadas de ubicación de lanzas de agua y calicatas (UTM).	94
Tabla 20: Profundidad a la roca obtenida en las lanzas de agua y calicatas.	94
Tabla 21: Superficies y volúmenes de estratos de arenas.	96
Tabla 22: Superficies y volúmenes de estratos de arenas con proyecto.	96
Tabla 23: Volúmenes de extracción parcial de arenas.	98
Tabla 24: Volúmenes de extracción parcial de arenas.	99
Tabla 25: Resumen de volúmenes de arenas a manejar.	99
Tabla 26: Características generales draga Ernesto Pinto.	103
Tabla 27: Componentes del sistema de dragado de draga Ernesto Pinto.	103
Tabla 28: Rangos de clasificación de material dragado (CEDEX 1994).	103
Tabla 29: Rangos de clasificación de material dragado (CEDEX 1994).	104
Tabla 30: Características técnicas del geotextil utilizado para los geotubos.	109
Tabla 31: Software TenCate para cálculo de geotubos.	109
Tabla 32: Tormenta de diseño.	113
Tabla 33: Resultados ensayo rompeolas sur con núcleo de rocas.	114
Tabla 34: Resultados ensayo rompeolas sur con núcleo de geotubos.	117
Tabla 35: Estimación de volumen de arenas a reutilizar en geotubos.	119
Tabla 36: Resultados de estabilidad del muro con relleno de arenas.	122
Tabla 37: Resultados de estabilidad del muro con relleno granular.	122
Tabla 38: Costo por tratamiento de 1 m ³ en la planta Hidronor Chile.	125
Tabla 39: Costos para traslado de arenas a planta tratamiento.	125
Tabla 40: Costos por dragado y vertido de arenas para cada alternativa de extracción.	126
Tabla 41: Costos de nivelación de playa para alternativas de extracción.	126
Tabla 42: Resumen de costos de rompeolas con núcleo de geotubos.	127
Tabla 43: Presupuesto Rompeolas con núcleo de rocas.	127
Tabla 44: Costo total por utilizar las arenas existentes como material de relleno.	128
Tabla 45: Costos depósito de arenas limpias de relleno.	128
Tabla 46: Costos depósito de arenas limpias para nivelación de playa.	129
Tabla 47: Volúmenes totales de alternativas de reutilización.	132
Tabla 48: Costos de alternativas de reutilización.	132
Tabla 49: Vidas útiles mínimas recomendadas por la ROM.	148
Tabla 50: Riesgos máximos admisibles recomendados por la ROM 02-90.	149
Tabla 51: Coeficiente de estabilidad para los elementos de rocas.	151

Tabla 52: Estimación de pesos de los elementos de coraza.	152
Tabla 53: Rangos de peso para los elementos de coraza.	152
Tabla 54: Valor de coeficiente de aceleración máxima efectiva.	156
Tabla 55: Costos para nivelación de 1 m ³ de material.	159
Tabla 56: Costos para colocar un m ² de geotextil de separación.	159
Tabla 57: Plazos de dragado para cada alternativa de extracción.	160
Tabla 58: Costos de dragado para alternativa de extracción total arenas.	160
Tabla 59: Costos de dragado para alternativa de extracción total proyecto.	160
Tabla 60: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 2.00 m.	161
Tabla 61: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 1.50 m.	161
Tabla 62: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 1.00 m.	161
Tabla 63: Costos de rompeolas con núcleo de geotubos.	162
Tabla 64: Presupuesto Rompeolas con núcleo de rocas.	163
Tabla 65: Costos al utilizar las arenas existentes como material de relleno.	164
Tabla 66: Costos al utilizar un relleno granular como material de relleno.	164
Tabla 67: Costos ampliación sur proyecto MINVU.	165
Tabla 68: Costos ampliación norte proyecto MINVU.	165
Tabla 69: Costos m ³ de arenas limpias de relleno.	166
Tabla 70: Costos depósito de arenas limpias de relleno.	166

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Formulación de la parábola Hsu (1989).	29
Ecuación 2: Ecuación para determinar α_{min} .	30
Ecuación 3: Perfil de equilibrio (Dean 1977).	31
Ecuación 4: Factor de forma A, Dean (1987).	31
Ecuación 5: Número de Iribarren.	49
Ecuación 6: Velocidad de caída del grano.	87
Ecuación 7: Profundidad de cierre.	87
Ecuación 8: Periodo de retorno.	149
Ecuación 9: Formulación de Hudson.	151
Ecuación 10: Empuje de suelo estático.	154
Ecuación 11: Resultante de empuje suelo estático sin cohesión.	154
Ecuación 12: Coeficiente de empuje estático.	154
Ecuación 13: Ángulo de fricción entre el relleno y el muro.	154
Ecuación 14: Verificación estabilidad al deslizamiento-caso estático.	154
Ecuación 15: Verificación estabilidad al volcamiento-caso estático.	155
Ecuación 16: Empuje de suelo sísmico.	155
Ecuación 17: Empuje de sobrecarga sísmica.	155
Ecuación 18: Resultante de empuje de suelo sísmico sin cohesión.	155
Ecuación 19: Resultante de empuje de sobrecarga sísmica sin cohesión.	155
Ecuación 20: Coeficiente de empuje sísmico.	156
Ecuación 21: Verificación estabilidad al deslizamiento-caso sísmico.	157
Ecuación 22: Verificación estabilidad al volcamiento-caso sísmico.	157

RESUMEN

Históricamente el borde costero de la ciudad de Tocopilla ha sido afectado por procesos de contaminación con metales pesados y material particulado de origen minero, perjudicando directamente a la playa El Salitre, presentando en sus arenas altas concentraciones de metales pesados (Cobre y Zinc), las cuales superan ampliamente los límites establecidos por las normativas internacionales.

Para mejorar las condiciones ambientales y la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) adjudicó a la Empresa GHD, el desarrollo de un proyecto que permita habilitar una playa artificial en el sector El Salitre.

Las elevadas concentraciones de metales pesados, los altos volúmenes de arenas que se encuentran depositados en la playa y los importantes costos que significa el manejo de las arenas contaminadas, generan una problemática ambiental y económica compleja para el proyecto, provocando incluso que su ejecución sea inviable.

El presente Proyecto de Título tiene como propósito contribuir en el diseño de la playa artificial El Salitre, mediante el análisis de alternativas de manejo para las arenas contaminadas que se encuentran actualmente depositadas en la playa.

Las primeras alternativas que se estudian se relacionan con los volúmenes de arenas que se podrían extraer de la playa, analizando la extracción de la totalidad de las arenas, las que sólo se intervienen con el proyecto de playa o bien la extracción de una parte de éstas, las cuales buscan disminuir los volúmenes de arenas a manejar y consisten básicamente en extraer una fracción de las arenas y depositar sobre éstas una capa de arenas limpias.

Se analizan alternativas de manejo que consideran variadas formas de disposición de las arenas contaminadas: traslado de las arenas a un botadero en tierra (planta de tratamiento), vertido de las arenas en el mar y reutilización de las arenas en obras del mismo proyecto de playa artificial, donde se analiza reutilizar las arenas como material de relleno de las obras terrestres, nivelar la playa y confinarlas en geotubos para generar los núcleos de los rompeolas.

De las alternativas estudiadas, se destacan las alternativas de extracción parcial y las alternativas de reutilización de arenas, en las cuales se incorporan soluciones limpias e innovadoras, obteniendo menores costos para el manejo e importantes ventajas ambientales, permitiendo que el proyecto de playa artificial resulte ambiental y económicamente factible.