16 ING-OCE
MARC 64233
Reg. 14005

ING-OCE
V456m
2014

Universidad de Valparaíso
CHILE

FACULTAD DE INGENIERÍA

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

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	7,0	
José Beyá Marshall Docente	7,0	
Hernán Vergara Cortés Docente	7,0	

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

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.

Cuando 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 COMPLEMENTRIOS 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: Limites 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: Sofware 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 m3 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 m3 de material. 159
Tabla 56: Costos para colocar un m2 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 m3 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 αmin. 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.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La playa El Salitre se ubica en el sector centro de la ciudad de Tocopilla, II Región de Antofagasta. Tocopilla se sitúa en una franja angosta de tierra entre el borde marino y el contrafuerte de la Cordillera de la Costa.

Figura 1: Ubicación de la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

El borde costero de la ciudad se presenta discontinuo, dominado por zonas rocosas e industriales, generándose mínimos espacios para el esparcimiento y playas que se caracterizan por ser bastante inseguras para los bañistas.

A esto se adiciona que el borde costero del sector centro y norte de la ciudad, históricamente ha sido afectado por procesos de contaminación con metales pesados y material particulado especialmente de origen minero. En base a antecedentes recopilados (Ref.10), se menciona que los sedimentos de la playa El Salitre, presentan altas concentraciones de metales pesados, sobrepasando ampliamente los niveles aceptables en normas internacionales.

Con el objeto de mejorar la disponibilidad de espacios recreativos del borde costero, en el año 2005 el Ministerio de Obras Públicas (MOP) realizó la construcción de la playa Artificial Covadonga, la cual se emplaza en el sector sur de la ciudad. La lejanía de esta playa y la nula solución a los problemas de contaminación, no permiten que toda la comunidad pueda disfrutar de bordes costeros y playas de buena calidad, manteniéndose el déficit de oferta por estos espacios recreativos.

Por lo anterior, se requiere habilitar un nuevo sector de playa para la ciudad, mejorando las obras costeras y solucionando los problemas ambientales de la playa El Salitre. Para ello el Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección de Obras Portuarias, adjudicó a la Empresa GHD S.A. la consultoría "Proyecto de Ingeniería Diseño Playa Artificial Sector El Salitre, Tocopilla" (Ref.14).

Figura 2: Vista panorámica de la playa El Salitre.
(Fuente: Ref.14)

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

El propósito de este Proyecto de Título es considerar en el diseño de la playa artificial El Salitre, alternativas de manejo para las arenas contaminadas que actualmente se encuentran en la playa, analizando su calidad ambiental, determinando los volúmenes de sedimentos que se puedan manejar y sus respectivos costos económicos.

Se analizan alternativas que consideran varias formas de extracción y disposición del material, las cuales se basan en conceptos de ingeniería marítima y costera, y principalmente consideran aspectos ambientales establecidos en recomendaciones y normas nacionales e internacionales. Se incorpora al análisis alternativas limpias e innovadoras, que permiten que el proyecto de playa artificial sea ambientalmente sustentable y económicamente factible para el MOP.

Finalmente se pretende recomendar alternativas de manejo que resulten técnicamente factibles, económicamente ejecutables y principalmente, que presenten ventajas ambientales considerables para el proyecto de playa, solucionando de manera limpia los problemas de contaminación que han afectado a la playa El Salitre.

Con el desarrollo de este Proyecto de Título, además de contribuir en el diseño de la playa artificial, se espera ser un aporte a futuros proyectos de bordes costeros, en los cuales se presenten problemas similares de contaminación de sedimentos y se puedan aplicar las soluciones innovadoras que se analizan en este documento.

CAPÍTULO II

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente Proyecto de Título, es realizar un estudio que contribuya al diseño de la playa artificial El Salitre, mediante el análisis técnico-económico de alternativas de manejo de los sedimentos contaminados que se encuentran en el sitio de estudio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las condiciones naturales del sector en estudio.
- Proponer y analizar la configuración de una playa artificial.
- Analizar la calidad ambiental de los sedimentos que se encuentran en la playa.
- Estimar los volúmenes de arenas contaminadas que se encuentran en el sitio de estudio y en el área directa del proyecto.
- Estudiar y analizar alternativas de manejo para las arenas contaminadas, con sus respectivos costos económicos.

CAPÍTULO III

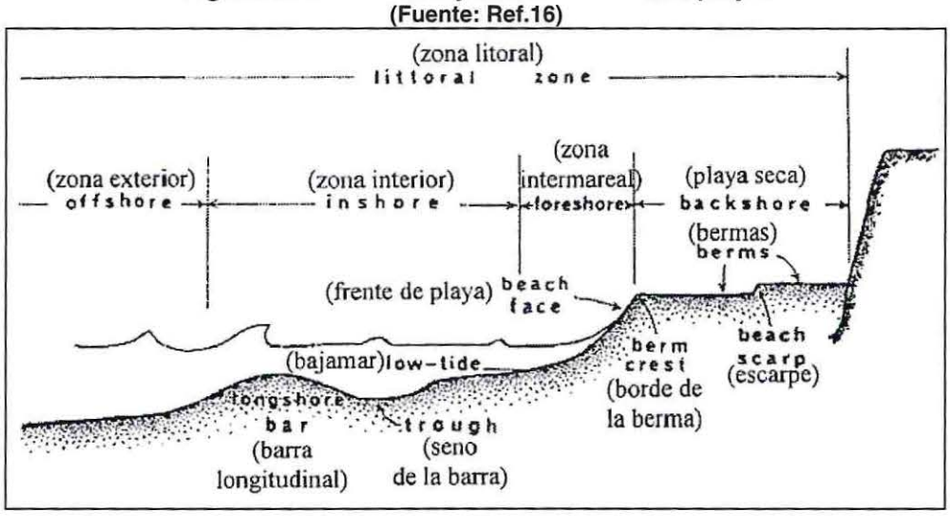
3. MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES DE LAS PLAYAS

Se define playa como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje (Ref.16).

Las playas se enmarcan dentro de la zona costera, que comprende el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos son determinados por la dinámica marina, entendiéndose como tal al oleaje, las corrientes litorales o de deriva y la marea. El desarrollo de la playa hacia tierra y hacia mar depende de la tipología de la costa, de la plataforma continental, del clima marítimo de la zona y del trasporte de sedimentos (Ref.16).

Figura 3: Zonificación y elementos de una playa.
(Fuente: Ref.16)



3.1.1 FORMACIÓN DE LAS PLAYAS

De acuerdo a lo presentado en la Ref.16, se entiende que la formación de una playa depende de la existencia de una fuente de sedimentos, de la tipología de a costa, permitiendo que los sedimentos se acumulen y del clima marítimo.

Los sedimentos que se presentan en las playas generalmente corresponden a arenas, gravillas, gravas y bolones, provenientes principalmente de los cauces fluviales que los aportan de forma más o menos regular, como ríos, esteros, arroyos o esporádicamente como acantilados, barrancos y quebradas, aunque ocasionalmente pueden tener otros orígenes (Ref.27).

El oleaje y las corrientes de deriva son los agentes principales que transportan los materiales aportados por las corrientes fluviales a lo largo de la costa.

Por lo general el oleaje de baja energía moviliza arenas, aportando material a la playa, ensanchándola y levantándola. Mientras que el oleaje de alta anergia, asociado a temporales, moviliza gravas y cantos, material de mayor tamaño, generando procesos erosivos, arrastrando material mar a dentro.

Por lo anterior se puede inferir que el tamaño del sedimento que se presenta en una playa dependerá de la energía del oleaje. Si es una playa de alta energía, por lo general el sedimento es de mayor tamaño. Mientras que en playas con baja o media energía del oleaje, los sedimentos tienden a ser finos y medios.

3.1.2 TIPOS DE PLAYAS

De forma general las playas se pueden clasificar en dos tipos:

- Playas Abiertas: Estas playas se encuentran afectadas de forma directa por las dinámicas litorales, encontrándose totalmente expuestas a la incidencia del oleaje y las corrientes. Su funcionamiento hidrodinámico es efecto tanto al transporte longitudinal y trasversal de sedimentos (Ref.16).
- Playas Encajadas: Corresponde a una playa que se encuentra confinada lateralmente por contornos impermeables naturales o artificiales. Dicho confinamiento actúa directamente sobre la hidrodinámica (oleaje y corrientes) y el trasporte de sedimentos, elementos que definen la forma de la playa (Ref.16).

3.1.3 FUNCIONES DE UNA PLAYA

La playa tiene tres funciones básicas en el territorio:

- Defensa de la costa: Una de las funciones de modo natural que realizan las playas, es la disipación de la energía del oleaje que incide sobre ellas. Esta modificación evita y al menos reduce los embates de la dinámica marina sobre la infraestructura existente tras la playa (Ref.15).

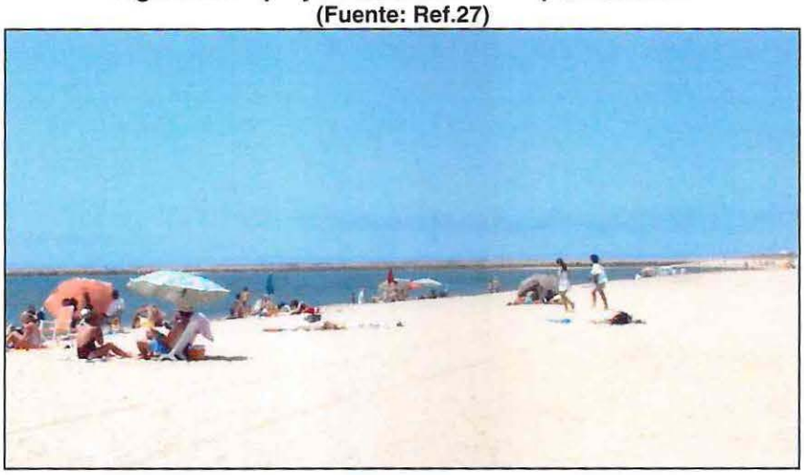
Figura 4: Playa como defensa de la costa.
(Fuente: Ref.27)

- Hábitat para la flora y fauna: Las playas constituyen el hábitat de diversas especies de flora y de fauna. Por lo general la franja más próxima a la orilla no suele ser una zona muy productiva ni de gran biodiversidad a excepción en las zonas intermareales de las playas tranquilas. Pero frecuentemente se pueden encontrar comunidades en las partes más alejadas de la orilla, tanto en tierra (sistemas dunares) como en el mar (fondos) (Ref.15).

Figura 5: Sistema de dunar costero.
(Fuente: Ref.27)

- Zona de esparcimiento y uso público social: La playa y zonas adyacentes permiten el desarrollo de un gran número de actividades humanas, fundamentalmente de carácter lúdico (Ref.15).

Figura 6: La playa como zona de esparcimiento.
(Fuente: Ref.27)



3.1.4 TIPOS DE ACTUACIONES EN LAS PLAYAS

Las actuaciones que se pueden plantear en las playas tienen por objeto superar alguno de los problemas estructurales que pueda estar sometida, defensa de la costa, o bien tratar de atender las demandas ambientales y/o sociales que gravitan sobre ellas (Ref.27).

- Problemas Estructurales, riesgo o pérdida de la condición de defensa de la costa.
    - *Déficit en la aportación natural de sedimentos.*
    - *Impedimentos a la libre evolución y movimiento de los sedimentos que la integran.*
- Demandas Ambientales, riesgo de pérdida de la condición de hábitat.
    - *Protección y mejora de ecosistemas y hábitats valiosos.*

- Demandas sociales, riesgo de pérdida de la condición de zona de ocio.
    - *Aseguramiento de una cierta anchura de playa seca en las estaciones de mayor utilización.*
    - *Aseguramiento de presencia de sedimentos utilizables por los usuarios.*
    - *Aseguramiento de condiciones óptimas de oleaje.*
    - *Creación de playas artificiales.*

Para el tratamiento de estos problemas existen una serie de técnicas que a muy grandes rasgos pueden conducir a los siguientes tipos básicos de actuaciones:

- Alimentación artificial de sedimentos, con material del sistema litoral.
- Alimentación artificial de sedimentos, con material ajeno al sistema litoral.
- Construcción y remodelación de estructuras marítimas, sumergidas o emergidas, para contribuir a la contención, abrigo y estabilidad de la playa.
- Desmantelamiento de estructuras marítimas.
- Excavación en tierra para encajar un perfil de playa estable y compatible con el material que la constituye.
- Levantamiento de edificaciones, instalaciones o infraestructuras de la playa.
- Extracción de fracciones gruesas del material, para sustituirlos por otras más finas.
- Restauración de acondicionamiento de bordes costeros.

3.1.5 PLAYAS ARTIFICIALES

Las playas artificiales responden al concepto de crear una nueva playa en un tramo de costa rocoso o de materiales cohesivos, donde antes no lo había. También son frecuentas las playas artificiales en tramos con elementos artificiales como escolleras o muros de protección que defienden terrenos de la costa, generalmente ganados al mar (Ref.27).

Las playas artificiales intentan dar respuesta a la gran apreciación y apetencia ciudadana por el uso de playas, especialmente en torno a grandes áreas urbanas que carecen de playas naturales de cualquier tipo (Ref.27).

Aunque se trate de playas creadas por el hombre, una vez construidas, su comportamiento no difiere en nada de las playas naturales, ya que los materiales sueltos que las forman son igualmente modelados por el oleaje y los demás agentes forzantes, a través de los mecanismos comunes a las playas naturales (Ref.27).

Es importante mencionar que se debe tener en cuenta los efectos ambientales que generan estas playas en el resto del sistema litoral, tanto en la dinámica de los sedimentos como en el estado ecológico (Ref.27).

Generalmente las playas artificiales corresponden a playas encajadas, las cuales se confinan lateralmente y/o frontalmente con diques laterales y/o exentos. A continuación se presentan ejemplos de varios tipos de playas artificiales:

Figura 7: Ejemplos de tipos de playas artificiales.
(Fuente: Google Earth)

3.1.6 EQUILIBRIO DE PLAYAS

El término playa en equilibrio se define como el estado morfodinámico que alcanza una playa en planta y perfil, bajo la acción de un oleaje incidente, constante en el tiempo, actuando sobre una geometría de playa inicial. Esta playa consigue su estado de equilibrio a partir del momento en que no presente cambios en su forma en planta ni tampoco en su perfil (Ref.16).

Las playas en estado natural se encuentran en equilibrio, mientras que las playas artificiales no necesariamente están en equilibrio debido a un proceso de reacomodación de carácter temporal. Se diferencian dos tipos de equilibrio en las playas:

- Equilibrio Estático: Corresponde a una playa con un sistema relativamente cerrado, donde el material presente es siempre el mismo, es decir, no ingresa ni sale sedimento de la playa.
- Equilibrio Dinámico: Corresponde a una playa donde el volumen de sedimento que ingresa es similar al que sale, con lo que su forma promedio prácticamente no varía.

3.1.6.1 EQUILIBRIO EN PLANTA DE PLAYAS

La forma de equilibrio en planta adoptada por una playa depende del flujo de energía incidente en dicha playa. Son muchos los investigadores que han estudiado el equilibrio de playas con salientes a los costados u obras exentas, tratando de encontrar el mejor ajuste geométrico de la línea de costa a una función paramétrica conocida.

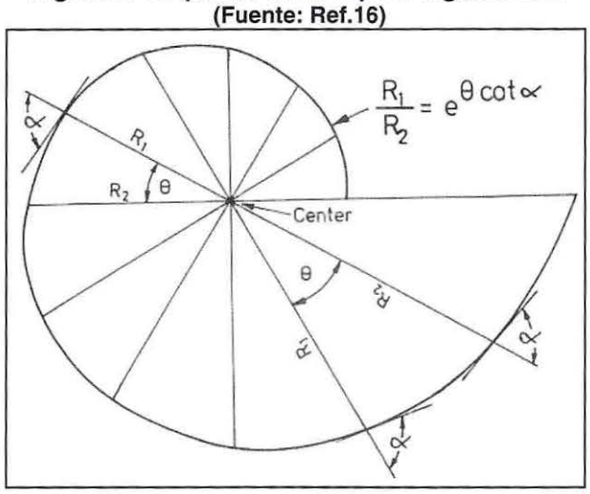
Las primeras expresiones de playas en equilibrio se obtuvieron ajustando formas predeterminadas a datos reales. Estas expresiones se basaban en la observación de playas encajadas y bahías presentes en la naturaleza con un equilibrio estático. Los datos reales de la posición de la línea de costa se extraían de fotografías aéreas o cartas náuticas (Krumbrein, 1944; Yasso, 1965).

En la década del 60 se comenzaron a emplear modelos físicos con ensayos de laboratorio para analizar configuraciones en equilibrio, ajustando y validando varios métodos para la forma de las playas (Silvester, 1960; Vichetpan, 1969; Ho, 1971).

3.1.6.1.1 ESPIRAL LOGARÍTMICA

Yasso (1965) afirmó que la curva de la forma de una playa encajada puede ser definida por una espiral logarítmica. La función espiral logarítmica se define como la curva cuya tangente forma un ángulo constante con los radios emitidos desde el polo (ángulo característico de la espiral).

Figura 8: Esquema de la espiral logarítmica.
(Fuente: Ref.16)



3.1.6.1.2 PARÁBOLA DE HSU (HSU, 1989)

Posterior a la formulación de Yasso, los trabajos de Silvester permitieron mejorar el ajuste, en comparación a las formas logarítmicas, en las secciones más alejadas del polo de difracción, en los sectores donde la costa tiende a ser rectilínea.

Los investigadores Hsu et al., (1987); Hsu & Evans (1989) y Hsu et al., (1989), propusieron un modelo de ajuste con una función parabólica con los cuales se obtuvieron buenos resultados en equilibrio estático.

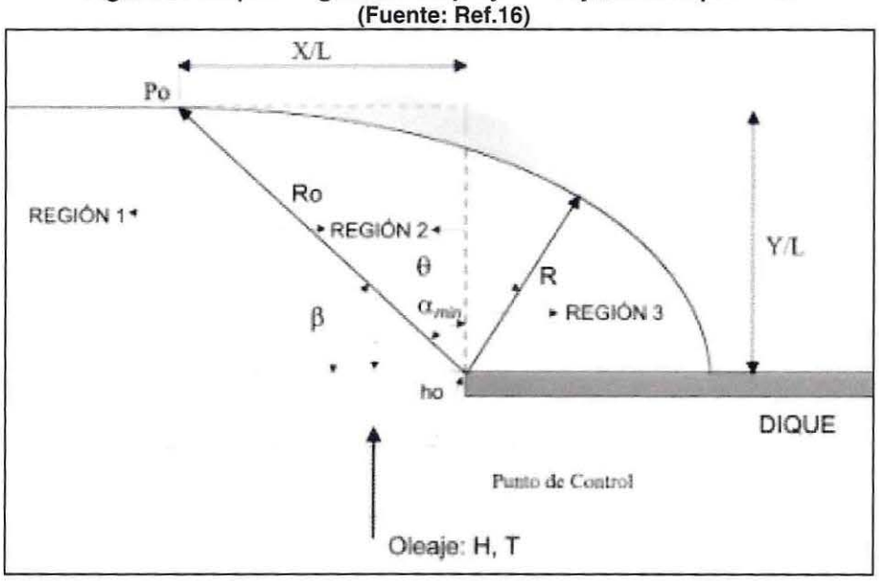
Ecuación 1: Formulación de la parábola Hsu (1989).

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

Donde los coeficientes C_0, C_1 y C_2 son función del ángulo de incidencia del oleaje β.

Al aplicar el modelo parabólico de Hsu y Evans (1989) a las playas del litoral español, González (1995) comprobó que dicho modelo parabólico sólo era aplicable en las regiones 2 y 3 (Ver Figura 9), es decir, en las zonas donde el dique altera el oleaje que alcanza la playa. El punto Po define el inicio de la zona donde resulta aplicable el modelo parabólico. Para solucionar dicho inconveniente González y Medina (2001) propusieron una metodología basada en una aproximación teórica.

Figura 9: Esquema general de playa encajada en equilibrio.
(Fuente: Ref.16)



González y Medina (2001) propusieron un sistema para la determinación del punto Po, en base al ángulo α_{min} y la distancia Y/L a la cual se encuentra la playa. Donde el ángulo α_{min} representa el ángulo complementario de β.

Para la determinación de α_{min}, estos autores recopilaron información de playas de la costa española (Atlántica y Mediterránea) en situación de equilibrio. La expresión que estos autores obtuvieron del ajuste fue:

Ecuación 2: Ecuación para determinar α_{min}.

$$\alpha_{min} = \arctan\left[\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^4}{2}\frac{Y}{L}\right)^{1/2}}{\frac{Y}{L}}\right]; \text{ con } \beta_r = 2.13.$$

3.1.6.2 EQUILIBRIO EN PERFIL DE PLAYAS

El perfil de equilibrio puede ser definido como el perfil final que se produce en una playa con un tamaño de grano concreto expuesto a condiciones de oleaje constantes. Es importante mencionar que el perfil de equilibrio de una playa no pretende explicar los mecanismos o procesos de transporte de un perfil de playa, sino que solamente su forma final (Ref.15).

De acuerdo a lo anterior, el perfil de equilibrio sólo puede ser obtenido en un laboratorio, donde se puede fijar el oleaje incidente. En la naturaleza, la variación del nivel mar y del oleaje da como resultado que el perfil de equilibrio, en sentido estricto, no existe nunca. Sin embargo las

variaciones de los diferentes agentes están acotadas, también lo estará la variabilidad del perfil, pudiendo admitir en la naturaleza la existencia de un perfil medio que sufre variaciones en función de la dinámica actuante.

Diversos autores han propuesto formulaciones empíricas con el objeto de representar el perfil de equilibrio de una playa. De todas ellas la más comúnmente utilizada es la propuesta, inicialmente, por Bruun (1954) y posteriormente por Dean (1977). Esta forma de perfil, conocida como perfil parabólico, adopta la siguiente relación:

Ecuación 3: Perfil de equilibrio (Dean 1977).

$$h(x) = Ax^{2/3}$$

Donde *h(x)* corresponde a la profundidad *x* de la línea de costa, y *A* es un parámetro de escala que depende, principalmente, de las características del sedimento de la playa. La aplicación inicial de esta expresión estaba limitaba a la zona del perfil aguas-adentro del punto de rotura. Dean extendió la aplicación de esta expresión a la zona de rompientes, ajustándola a 504 perfiles de la costa atlántica y el golfo de Estados Unidos medidos por Hayden *et al.* (1975). Posteriormente Dean (1987) relacionó el parámetro de forma *A* con la velocidad de caída del grano, *w* (m/s).

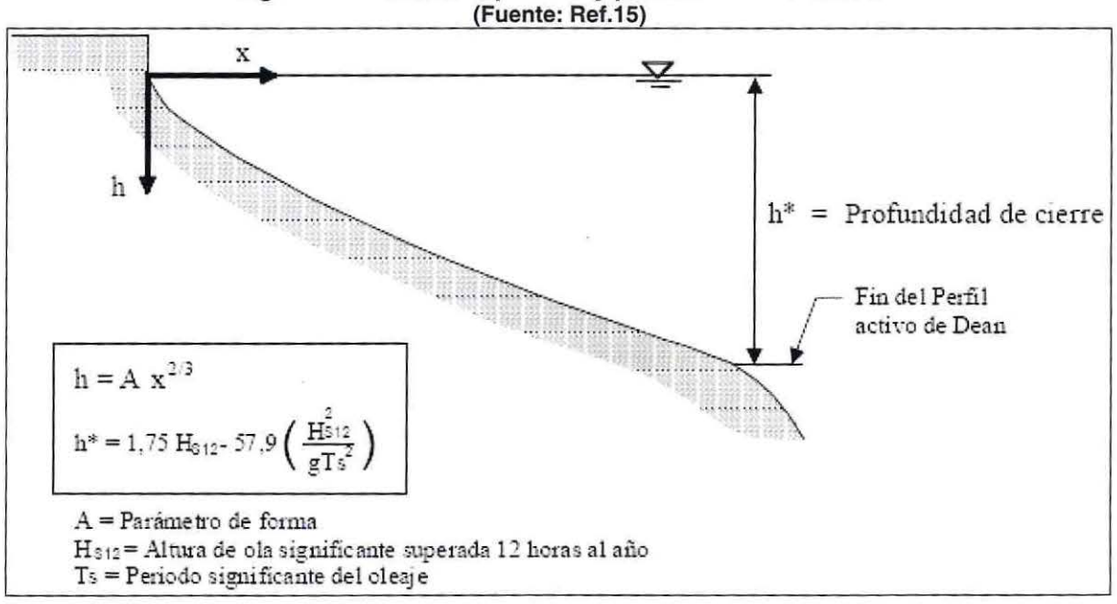
Ecuación 4: Factor de forma *A*, Dean (1987).

$$A = 0.51w^{0.44}$$

De acuerdo con el modelo teórico de perfil de equilibrio propuesto por Dean, el perfil de equilibrio solo es válido dentro de la zona de rotura del oleaje. Donde la extensión del perfil varía a lo largo del tiempo en función del oleaje existente.

Dentro de los estudios de largo plazo de estabilidad de playas es usual utilizar la denominada "Profundidad de Cierre" como límite de la aplicación del perfil de equilibrio. Esta profundidad está relacionada con el transporte de sedimentos y se aplica en el sector donde las variaciones verticales del perfil son reducidas e indistinguibles de los errores de medida.

Figura 10: Perfil de equilibrio y profundidad de cierre.
(Fuente: Ref.15)



3.2 CONTAMINACIÓN MARINA

La definición oficial de contaminación marina establecida por el GESAMP (Grupo Mixto de Expertos sobre Aspectos Científicos de Protección del Medio Marino), dice:

"Contaminación marina es la introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o energía en el medio marino (incluyendo los estuarios) causando efectos perjudiciales tales como daños a recursos vivos, peligros para la salud humana, obstáculos para las actividades marinas, incluida la pesca, el deterioro de la calidad del agua del mar, y la reducción de los atractivos naturales" (Ref.11).

De acuerdo a la definición anterior, se entiende que para que exista contaminación es necesaria la intervención del hombre. Así el dióxido de azufre que emite la industria, aunque sea en cantidades mínimas, puede llegar al mar en forma de ácido sulfúrico: esto es contaminación marina. Caso contrario, un volcán submarino que también desprende dióxido de azufre, aunque sea en grandes cantidades, no es contaminación marina ya que no ha existido intervención del hombre. La erupción volcánica es un fenómeno natural sobre el que nada se puede hacer, en cambio en la industria si se puede adoptar medidas para reducir sus emisiones.

3.2.1 FUENTES Y ORIGENES DE LA CONTAMINACIÓN MARINA

El problema de la contaminación marina presenta su mayor incidencia en la franja litoral, zona donde se concentra la mayoría de las fuentes de contaminación y donde el hombre lleva a cabo las actividades marinas básicas. Se distinguen tres vías o fuentes principales a través de las cuales los agentes contaminantes pueden llegar al medio marino (Ref.7):

- Vía Atmosférica

Por la vía atmosférica puede incorporarse a las aguas marinas productos muy diversos, tales como residuos de la combustión de motores, residuos radioactivos, pesticidas, lluvia ácida, cenizas de carbón producidas en las centrales termoeléctricas, emisiones atmosféricas industriales.

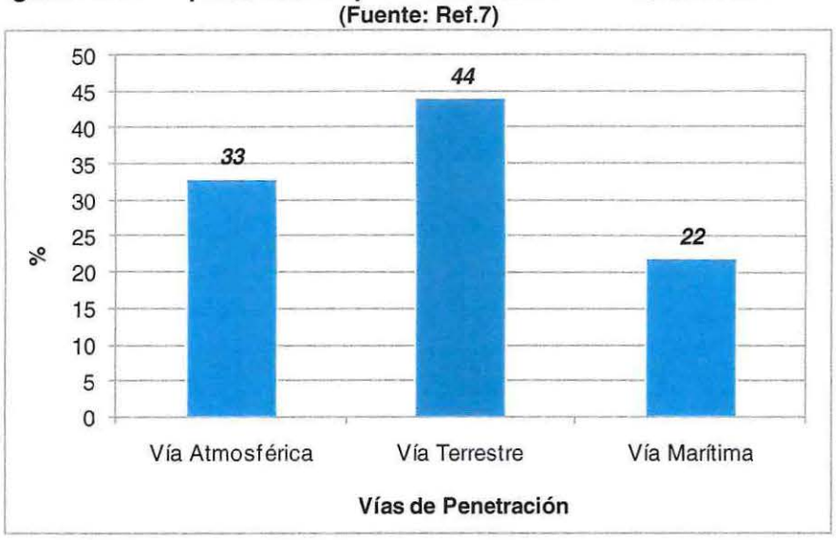
- Vía Terrestre

Por esta vía llegan al mar por vertido directo o a través de los ríos, aguas lluvias, las aguas residuales urbanas o industriales y los productos plaguicidas y fertilizantes usados en la agricultura y residuos industriales usados en la minería.

- Vía Marítima

Aquí se incluyen la mayoría de las actividades que el hombre desarrolla en el mar, como explotaciones del subsuelo marino, la navegación y transporte marítimo, las operaciones de carga y descarga de buques, vertidos realizados desde los mismos buques, vertidos de residuos industriales (minería), emisarios submarinos etc. Además de los accidentes ocasionales en puertos y buques petroleros.

Figura 11: Principales vías de penetración de contaminantes en el mar.
(Fuente: Ref.7)



A grandes rasgos se distinguen dos tipos de aportaciones u origen de la contaminación al medio marino:

- Aportaciones de origen natural

De acuerdo a la definición de contaminación, las aportaciones naturales no corresponden a una contaminación auténtica. Sin embargo determinados fenómenos naturales arrojan al mar una serie de materiales y sustancias que, si procedieran del hombre, no se dudaría en calificar de contaminación.

Dentro de las aportaciones naturales se consideran las siguientes:

- Erupciones volcánicas que arrojan metales pesados y calientan el agua.
- Los ríos que arrojan agua dulce y más fría, además aportan aguas y sedimentos de muy diversa calidad.
- Fisuras en el fondo marino aportan importante hidrocarburos.

Estas aportaciones de contaminantes de origen natural, pueden ser asimiladas perfectamente por el sistema, pudiendo considerarse como un factor modelador del mismo (Ref.7).

- Aportaciones de Origen Artificial

Las aportaciones de contaminantes al medio marino procedentes de la actividad humana, se constituyen en realidad como verdaderas fuentes de contaminación marina.

A continuación se presentan las aportaciones de origen artificial que generan contaminación:

- Aportaciones contaminantes de origen urbano.
- Aportaciones contaminantes de origen industrial.
- Aportaciones contaminantes debidas al tráfico marítimo y a las operaciones y trabajos portuarios.
- Aportaciones contaminantes debidas a operaciones de extracción en el subsuelo marino.

3.2.2 CONVENIOS SOBRE VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR

Entre los múltiples usos que el hombre ha hecho históricamente del mar, se encuentra el de utilizarlo como basurero, debido a un poder autodepurativo supuestamente ilimitado, resultaba aceptable realizar cualquier tipo de vertimiento sin ser necesario ningún control.

Como consecuencia del vertido abusivo de sustancias al mar, muchas de ellas de gran persistencia y toxicidad, el incremento del tráfico marítimo e industrias, en los últimos 30 años se han aprobado una serie de medidas que buscan reducir o prevenir la contaminación marina.

El Estado de Chile ha suscrito y ratificado diversos convenios internacionales, los que complementados con la legislación nacional, conforman la base legal para controlar, reducir o prevenir la contaminación marina. De los convenios suscritos, destaca el Convenio de Londres de 1972.

3.2.2.1 CONVENIO DE LONDRES 1972

Este Convenio trata sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de residuos y otras materias, el cual fue acordado en Londres el 29 de diciembre de 1972.

Conforme a este Convenio, se entiende por vertimiento:

Toda evacuación deliberada en el mar de desechos u otras materias efectuadas desde buques, aeronaves, plataformas u otras construcciones en el mar y a todo hundimiento deliberado en el mar de buques, aeronaves, plataforma u otras construcciones en el mar.

Este convenio establecía en su texto original la prohibición de vertimiento de los desechos enumerados en el Anexo I, y un requerimiento de un permiso especial para el vertido de los desechos u otras materias enumeradas en el Anexo II y un permiso general para el vertimiento de todos los demás desechos o materias.

Sustancias del Anexo I:

- Compuestos orgánicos halogenados.
- Mercurio y compuestos de mercurio.
- Cadmio y compuestos de cadmio.
- Plásticos persistentes y otros materiales sintéticos que puedan obstaculizar los usos legítimos del mar.
- Petróleo crudo e hidrocarburos derivados del petróleo.
- Residuos radiactivos.
- Materiales de cualquier forma, producidos para la guerra química y biológica.

En este anexo no era de aplicación si las sustancias se transforman rápidamente en el mar en sustancias inocuas mediante procesos físicos, químicos o biológicos. Tampoco era de aplicación los lodos de aguas residuales, escombros de dragados, cuando tenían como vestigios contaminantes las cinco primeras sustancias que estaban sujetos a las disposiciones de los Anexos II y III.

Sustancias del Anexo II:

- Desechos que contengan cantidades considerables de arsénico, plomo, cobre y zinc y sus compuestos, compuestos orgánicos de silicio, cianuros, fluoruros, pesticidas y subproductos no incluidos en el Anexo I.

- Para el vertido de grandes cantidades de ácidos y álcalis, se tenía en cuenta la presciencia de las sustancias anteriores y de las siguientes: berilio, cromo, níquel, vanadio y sus compuestos.
- Contenedores, chatarra y otros desechos que interfieran con la pesca o navegación.
- Desechos radioactivos no incluidos en el Anexo I.

Posteriormente este Convenio renovó el contenido de sus textos, elaborando en el año 1996 un Protocolo, el cual introducía planteamientos basados en la precaución y prevención. En el artículo 4 de este Protocolo se establecía que las Partes Contratantes prohibirían el vertimiento en el mar de cualesquiera desechos u otras materias, con excepción de los que se enumeran el Anexo I del Protocolo:

- Materiales de dragado.
- Fangos cloacales.
- Desechos de pescado o materiales resultantes de las operaciones de elaboración del pescado.
- Buques y plataformas u otras construcciones en el mar.
- Materiales geológicos inorgánicos inertes.
- Materiales orgánicos de origen natural.
- Objetos voluminosos construidos principalmente por hierro, acero, hormigón y materiales igualmente no perjudiciales en relación con los cuales el impacto físico sea el motivo de preocupación y solamente en esas circunstancias, en que esos desechos se produzcan en lugares, tales como islas pequeñas con comunidades aisladas, en que no se disponga de acceso práctico a otras opciones de evacuación que no sea el vertimiento.

Es importante mencionar que para el vertimiento de estos desechos u otras materias será necesario un permiso. Las Partes Contratantes adoptarán medidas administrativas para la expedición de permisos y cumplir con las condiciones del Anexo II del Protocolo:

- Obligación de elaborar una lista nacional de criterios de actuación como mecanismo para seleccionar los desechos propuestos y sus componentes a partir de sus efectos potenciales sobre la salud del hombre y el medio marino.
- Información para la caracterización del lugar de vertimiento y el procedimiento de evaluación de los posibles efectos potenciales.

3.2.3 LEGISLACIÓN SOBRE VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR

3.2.3.1 NORMATIVA NACIONAL PARA EL VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR

Como se mencionó anteriormente, el Estado Chile ha suscrito y ratificado diversos convenios internacionales, para reducir o eliminar la contaminación de los océanos, mares, lagos y ríos de jurisdicción nacional.

Uno de estos convenios es el "Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias, de Londres, 1972, que fue aprobado por Decreto Ley N° 1.809 del 26 de mayo de 1977.

En Chile la autoridad competente para velar el cumplimiento de este Convenio es la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante de Chile (DGTMM Y MM).

Con el objeto de disponer procedimientos a seguir para el cumplimiento de las disposiciones respecto al vertimiento de desechos y otras materias contaminantes en el mar, la DGTMM Y MM elaboró la Circular "Procedimientos a seguir para el cumplimiento de las disposiciones respecto al vertido de desechos y otras materias contaminantes" (Ref.9).

Las instrucciones generales de esta circular indican lo siguiente:

- Todo proyecto o actividad de vertimiento en el medio marino en el que se solicite permiso o autorización a la Autoridad Marítima Nacional deberá estar fuera de las aguas interiores de Jurisdicción Nacional.
- No se podrá efectuar ningún tipo de actividad de vertimiento en los cuerpos de agua lacustres y fluviales, conforme a la sensibilidad que presentan dichos cuerpos de agua. Los proyectos que involucren efectuar faenas de dragado en dichos cuerpos, deberán quedar depositados en tierra, autorizado por el organismo competente.
- Cuando se trate de dragados con volúmenes inferiores a 100.000 m^3 se deberá presentar a la Gobernación Marítima involucrada, todos los antecedentes ambientales, científicos y técnicos que avalen la solicitud de vertimiento conforme a las Especificaciones Técnicas contenidas en el Anexo "A" de la circular.
- Cuando se trate de proyectos o actividades de dragados con volúmenes superiores a 100.000 m^3, los antecedentes deberán ser presentados a la CONAMA Regional correspondiente, ingresando al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, para que a través de este sistema sea revisado y analizado el estudio, el cual deberá ajustarse a las especificaciones técnicas.

En las Especificaciones Técnicas "Anexo A" de la circular, se indica que para la elaboración de estudios o actividades de dragados, éstos deberán contener al menos la siguiente información:

- Descripción del método de dragado y del equipamiento a utilizar.
- Caracterización química y física del sedimento a dragar y recopilación de antecedentes sobre usos y del conocimiento científico disponible sobre el área a dragar.
- Estudio oceanográfico – ambiental de línea base en el sitio de dragado.
- Identificación, análisis y valorización de los impactos.
- Proposición de medidas de mitigación.
- Programa de Vigilancia Ambiental del área de dragado durante las faenas de dragado.

La caracterización química y física del sedimento se realizará en base a un muestreo mínimo de los sedimentos, el cual dependerá de los m^3 a dragar y verter:

Tabla 1: Número mínimo de muestras para volúmenes de sedimentos a dragar. (Fuente:Ref.9)

VOLUMEN A DRAGAR (m^3)	NÚMERO DE MUESTRAS
Menos de 2.000	6
Entre 2.000 y 10.000	10
Entre 10.000 y 30.000	14
Entre 30.000 y 100.000	20
Más de 100.000	Más de 25

Se indica que los resultados de los análisis efectuados a los sedimentos a dragar, serán comparados con las normas de calidad ambiental señaladas en el Artículo 7 del Reglamento SEIA.

Art 7 - Reglamento SEIA: Las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del artículo 11 de la Ley, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República de Italia, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud, en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local.

Artículo 11 de la Ley 19300: Los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes efectos, características o circunstancias:

a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos.

b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.

3.2.3.2 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DEL MATERIAL DRAGADO EN LOS PUERTOS ESPAÑOLES (CEDEX, 1994)

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX), desarrolló recomendaciones para la gestión del material dragado en los puertos españoles. El contenido de estas recomendaciones se basa en directrices de Convenios Internacionales, pero adaptadas a las necesidades de España. Estas especificaciones fueron aprobadas en el año 1994 y presentadas como documento de referencia en las reuniones preparatorias de las "Pautas de evaluación del material dragado" del Convenio de Londres de 1995, siendo aceptada una parte de sus contenidos para ser incluidos en las pautas de este Convenio.

Estas recomendaciones están fundamentalmente enfocadas a la regulación del vertido de materiales de dragado al medio marino en función de su calidad ambiental. En ellas se establecen niveles de acción, categorías de material dragado y tipos de permiso.

Los niveles de acción deben ser capaces de distinguir aquellos materiales que únicamente tienen un impacto potencial sobre las características físicas del medio, de aquellos cuyo vertido en el mar supondría unos efectos negativos no admisibles sobre la biota, así como definir los materiales cuyo efecto debe ser objeto de un estudio más pormenorizado.

La caracterización de los sedimentos incluye los elementos establecidos en la siguiente Tabla:

Tabla 2: Concentraciones utilizadas para establecer niveles de acción.
(Fuente: Ref.7)

	NIVEL DE ACCIÓN 1 (mg/kg)	NIVEL DE ACCIÓN 2 (mg/kg)
Mercurio	0.6	3.0
Cadmio	1.0	5.0
Plomo	120	600
Cobre	100	400
Zinc	500	3000
Cromo	200	1000
Arsénico	80	200
Níquel	100	400
7 PCBs (*)	0.03	0.10
(*) Suma de los congéneres IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) números 28, 52, 101, 118, 138, 153 y 180.		

De acuerdo a los niveles de acción anteriores, el material de dragado puede clasificarse en las siguientes categorías:

- Categoría I

Pertenecerán a esta categoría aquellos materiales cuyas concentraciones de contaminantes no sobrepasan el nivel de acción 1. Para estos materiales de dragado se permite el vertido libre al mar, aunque considerando los posibles efectos de naturaleza mecánica.

- Categoría II

Pertenecerán a esta categoría aquellos materiales cuyas concentraciones sea superior al nivel de acción 1 e inferior al nivel de acción 2. Se podrán verter al mar de forma controlada según los términos previstos en las recomendaciones.

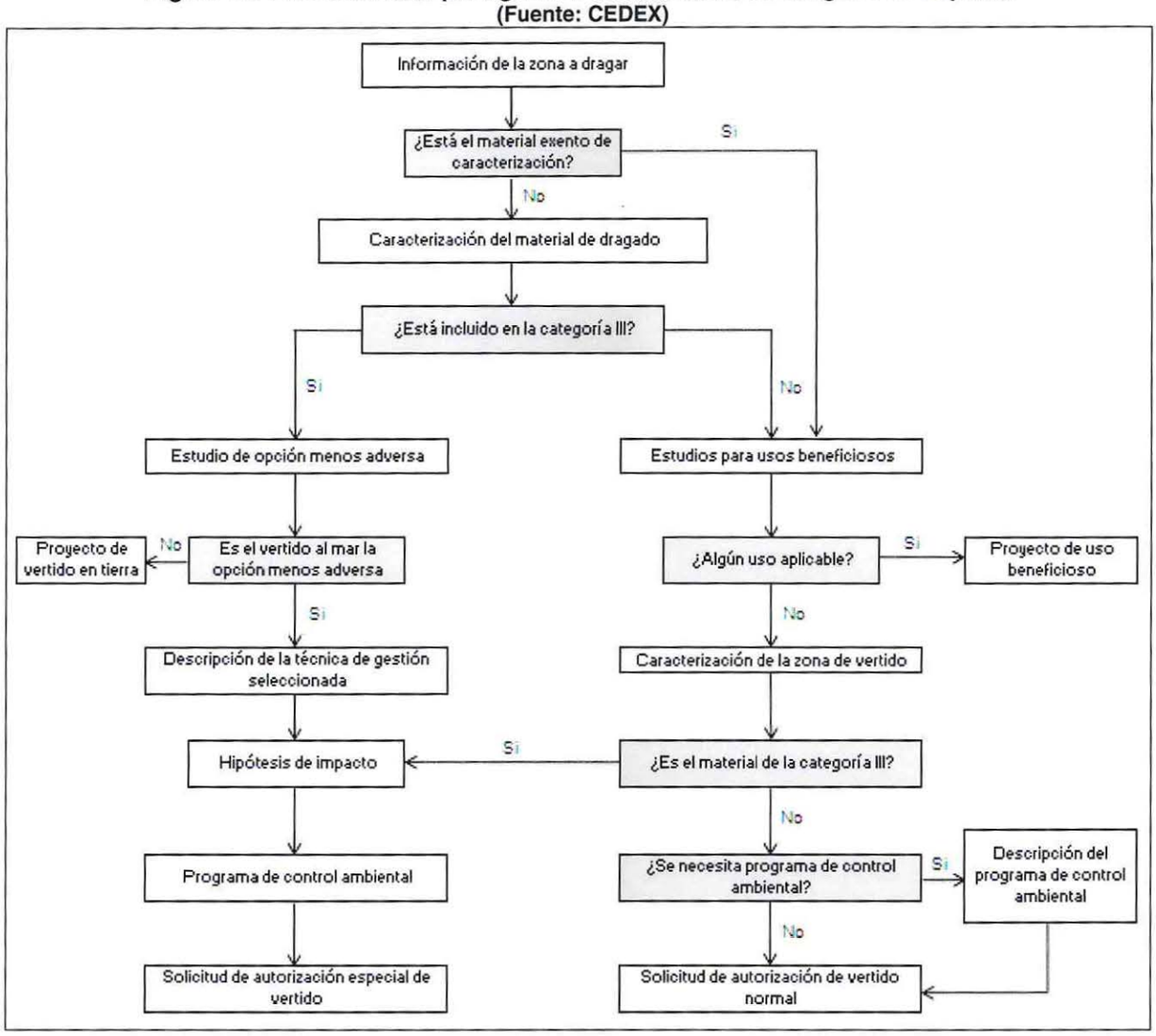
- Categoría III

Pertenecerán a esta categoría los materiales dragados con concentraciones elevadas de contaminantes.

  - Subcategoría III a): Aquellos materiales con concentraciones comprendidas entre el nivel de acción 2 y ocho veces el nivel de acción 2. En su gestión podrán emplearse técnicas de aislamiento blando.
  - Subcategoría III b): Pertenecen a esta categoría los materiales de dragado con concentraciones superiores a ocho veces el nivel de acción 2. En su gestión deberán emplearse técnicas de gestión de aislamiento.

En el caso que el material dragado contenga concentraciones iguales o superiores a las establecidas en la Categoría III, estas recomendaciones sugieren analizar y estudiar cual sería la opción menos adversa para el vertido. En el caso de generarse mayores daños en el medio marino, se recomienda realizar el vertido en tierra.

Figura 12: Procedimiento para gestión de materiales de dragado en España.
(Fuente: CEDEX)



3.2.4 METALES PESADOS EN SEDIMENTOS

Los metales pesados en el ambiente marino provienen principalmente de desechos domésticos, agrícolas e industriales, los cuales son peligrosos para la biota marina, el hombre y el ambiente en general. Bajo este escenario, los sedimentos son unos de los principales reservorios de estos elementos, actuando como recursos secundarios de contaminación en el medio ambiente marino (Rubio *et al.*, 1996). Principalmente los metales pesados se concentran en los sedimentos superficiales de las zonas costeras alteradas por el hombre.

En la siguiente Tabla se presenta la procedencia y vías antropogénicas principales de entrada al mar de los metales pesados:

Figura 13: Procedencia y vías principales de entrada al mar de los metales pesados.
(Fuente: Ref.17)

Elemento	Procedencia más común	Vías principales de entrada al mar
Cd	Carbón, minería, tratamiento metales	Vertido efluentes industriales
Cr	Recubrimiento metales, industria textil y curtido	Vertido efluentes industriales
Cu	Recubrimiento de metales, minería y corrosión	Vertido efluentes industriales, tratamientos antifouling y efluentes agrícolas
Hg	Minería, carbón, fungicidas, industria química	Vertido efluentes industriales, efluentes de pluviales por lixiviación de depósitos de la combustión de combustibles fósiles
Pb	Minería, carbón, fungicidas, industria química	Vertido efluentes industriales y efluentes de pluviales
Zn	Recubrimiento de metales, aleaciones, pigmentos, pinturas, catalizador	Vertido efluentes industriales
Ni	Recubrimiento de metales, aleaciones, baterías, pigmentos y catalizadores	Vertido efluentes industriales
As	Minería, pesticidas, industria química	Vertido efluentes industriales y efluentes agrícolas

Algunos metales pesados son esenciales o imprescindibles para la vida, pero dosis o concentraciones elevadas resultan ser perjudiciales. Así, el Cobre, el Hierro y el Vanadio son un constituyente esencial de algunos moluscos y animales marinos. Sin embargo, estos tres metales en altas cantidades pueden ser mortales para los organismos marinos.

En la siguiente Figura se presentan las listas de a) Elementos químicos que son necesarios para los procesos vitales. b) Elementos que probablemente sean esenciales. c) Elementos que no son esenciales para la vida.

Figura 14: El rol de los elementos químicos en los procesos vitales.
(Fuente: Ref.7)

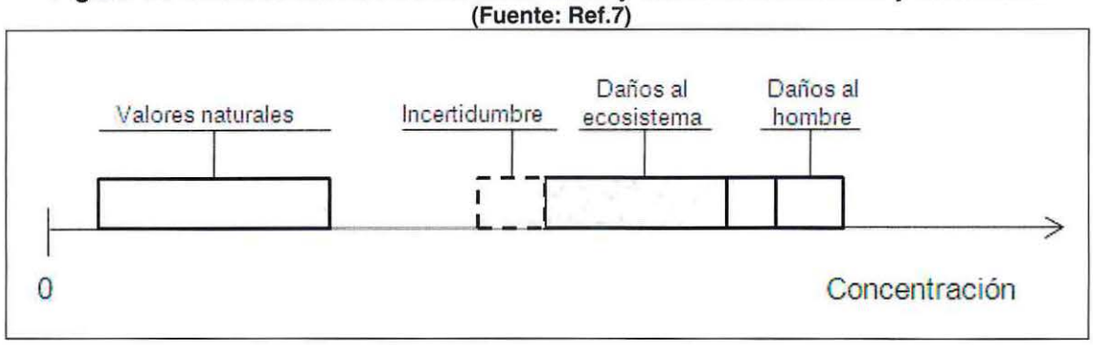
Elementos necesarios para los procesos de la vida
H, B, C, N, O, F, Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Ca, V, Ma, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Br, I.

Elemento probablemente necesario para la vida
Al, Ti, As, Sn.

Elementos probablemente no necesarios para la vida
He, Li, Be, Ne, A, Se, Cr, Ga, Ge, Se, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Te, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Te, Xe, Cs, Ba, La, Tierras Raras, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Bi, Po, At, Rn, Ff, Ac, Th, Pa, U.

Existen sustancias que son componentes naturales del medio marino, los cuales están en el mar antes de existir el hombre y por lo tanto antes de que existiese contaminación. Los metales y los hidrocarburos son algunas de estas sustancias que conforman la "concentración natural" o valor "back ground". Se cree que actualmente en el mundo no existe ninguna región oceánica que no hayan llegado los efectos de la actividad humana, por lo que resulta imposible determinar cuáles eran las concentraciones naturales, las cuales seguramente existen regiones o zonas prístinas (originales) o lo más limpias posibles, alejadas de focos de contaminación (Ref.7).

Figura 15: Concentraciones de contaminantes y daños al ecosistema y al hombre.
(Fuente: Ref.7)



3.2.4.1 NORMATIVAS DE CALIDAD AMBIENTAL DE SEDIMENTOS

Actualmente en Chile no existen normativas nacionales para determinar criterios de calidad ambiental de los sedimentos marinos, si bien se ha avanzado persisten vacíos en esta materia.

En el año 2012 se promulgó la Norma secundaria de Calidad Ambiental que establece los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias y elementos, cuya presencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente). Sin embargo, para el caso de los sedimentos marinos, la región de Aysén es la única que cuenta con un anteproyecto en elaboración de Norma de Calidad Ambiental para Sedimentos Marinos (Resolución Exenta N°1152). Este documento se finalizó en diciembre de 2005. Esta norma se encuentra relacionada con el Decreto Supremo 90, el cual regula la descarga de residuos líquidos a aguas marinas, lo que está relacionado con el origen de la contaminación por metales pesados en los sedimentos, los cuales provienen principalmente de desechos domésticos, agrícolas e industriales.

Por el contrario, a nivel internacional, durante las últimas décadas se han desarrollado varios procedimientos técnicos, destacando la guía Sediment Quality Guideline (SQG) o Guía de Calidad de Sedimentos de Canadá. Los objetivos del SQG son proteger a los organismos que viven en los sedimentos acuáticos de los efectos negativos producidos por sustancias químicas presentes en estos ambientes, evaluar y comparar los patrones de distribución espacial de sedimentos contaminados y, diseñar y aplicar programas de monitoreo y remediación. Por su parte Estados Unidos, a través de su departamento científico NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), también establece límites de concentraciones en sedimentos que pueden ser tolerados por organismos marinos.

En la siguiente Tabla se presenta una comparación de las concentraciones límites de estas normativas:

Tabla 3: Normas de calidad de sedimentos para protección de organismos marinos.
(Fuente: Ref.5 y Ref.29)

Elemento	Canadian SedimentQuality (Canadá) (mg/Kg)		NOAA (USA) (mg/Kg)	
	ISQG[1]	PEL[2]	ERL[3]	ERM[4]
As	7.24	41.6	8.2	70
Cd	0.7	4.2	1.2	9,6
Cr	52.3	160	81	370
Cu	18.7	108	34	270
Hg	0.13	0.7	0.15	0.71
Ni	-	-	20.9	51.6
Pb	30.2	112	46.7	218
Zn	124	271	150	410

[1] ISQG (probable efecto límite) límite a partir del cual existe peligro de toxicidad.
[2] PEL (valor medio de la calidad del sedimento marino) valor a partir del cual puede existir algún fenómeno de toxicidad.
[3] ERL (effects range-low): concentración por debajo de la cual no se observa ningún efecto de toxicidad sobre los organismos estudiados (percentil 10°).
[4] ERM (effects-range médium): concentración a partir de la cual la probabilidad de aparecer toxicidad es mayor (percentil 50°).

Respecto a la calidad de sedimentos para la protección humana, se relaciona la normativa española *CEDEX*, en la cual se presentan valores límites de concentraciones de metales pesados para arenas destinadas a la regeneración de playas.

Tabla 4: Normativa española de calidad de sedimentos para regeneración de playas.
(Fuente: Ref.6)

Elemento	CEDEX (España) (mg/Kg)
As	80
Cd	0.5
Cr	200
Cu	50
Hg	0.3
Ni	-
Pb	60
Zn	250

CAPÍTULO IV

4. DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO

4.1 UBICACIÓN DE LA PLAYA

La playa El Salitre se ubica en un punto estratégico de Tocopilla, situándose en el centro del desarrollo longitudinal que ha tenido la ciudad, cercana a la rotonda vial que une sus avenidas principales.

Figura 16: Ubicación de playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

La ubicación central de la playa, permite una accesibilidad de importancia, ya que se vincula a gran parte de la ciudad con el borde costero, ayudando además la presencia de infraestructura deportiva que se ubica tras la playa, como es el caso del Estadio Municipal y el Diamante de Beisbol.

4.2 EVOLUCIÓN DE LA PLAYA

En el presente capítulo se analiza la evolución que ha tenido la playa El Salitre, para ello se comparan imágenes históricas del sector correspondientes a los años 1980,1998 y 2005.

En la imagen del año 1980 se observa que la playa se encontraba sin intervenciones, no teniendo infraestructuras marítimas ni obras de apoyo terrestre, sólo se observa la presencia de casas y edificaciones que actualmente aún existen. Además, se detecta que la línea de playa presentaba una forma curva, asociado a la presencia Beach Cusps.

Beach Cusps: Formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, con una longitud de onda del orden de la decena de metros (Ref.16).

Figura 17: Imagen aérea de playa El Salitre año 1980 (04/09/1980-13:28).
(Fuente: Ref.34)

De acuerdo a la fecha y hora de la imagen, se consultó al SHOA por el estado del nivel del mar, detectando que éste se encontraba en marea vaciante, cercano a la baja marea, con un valor de +0.21 mNRS.

El año 1998 (Figura 18), se observa la presencia de un rompeolas ubicado en el sector sur de la playa, donde su tramo final se orienta de forma perpendicular al oleaje, no generando una protección adecuada para la playa ni para los bañistas, sólo permitió una pequeña acumulación de sedimentos en su lado interno, generando un adelantamiento mínimo de la línea de playa. En el resto de la playa no se aprecian modificaciones de esta línea. Se observa además la existencia del paseo costero y edificaciones ubicadas tras la playa.

Respecto al nivel de marea que se presentaba en el instante de la imagen, éste se encontraba saliendo de la baja marea, con un valor aproximado de +0.23 mNRS.

Figura 18: Imagen aérea de playa El Salitre año 1998 (26/03/1998-13:15).
(Fuente: Ref.34)

La imagen del año 2005 (Figura 19) presenta una adecuada resolución para distinguir la ubicación de la línea de playa, la cual posee una forma curva similar a la del año 1980, pero menos pronunciada. Además, en esta imagen se logra distinguir la ubicación de dos afloramientos rocosos, uno en el sector sur, a un costado del rompeolas, y el otro en el sector norte de la playa.

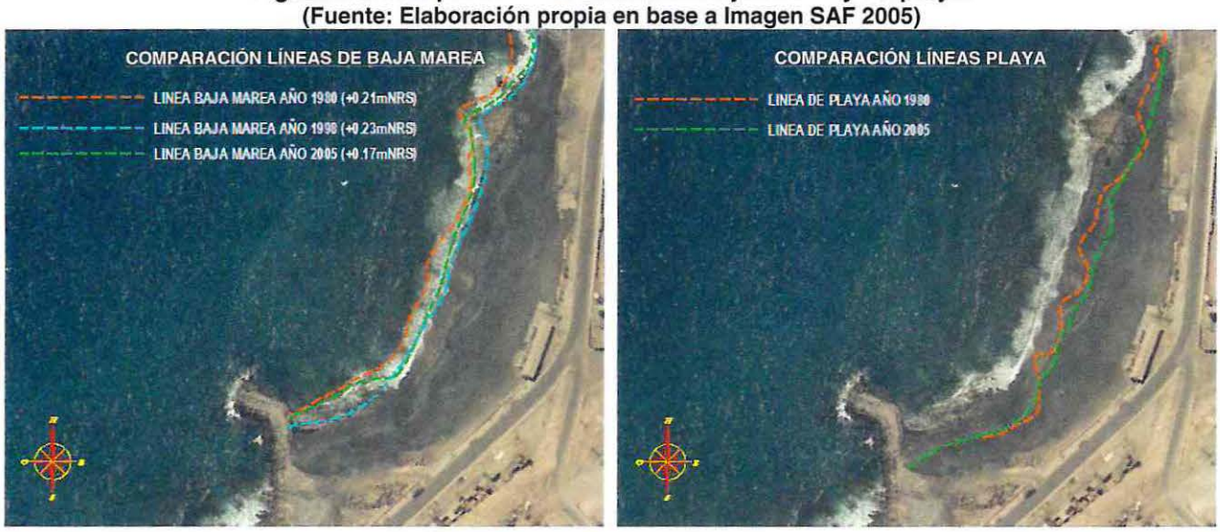
El nivel de marea que se presentaba en el instante de la imagen era de +0.17 mNRS, saliendo de baja marea.

Figura 19: Imagen aérea de playa El Salitre año 2005 (23/08/2005-18:53).
(Fuente: Ref.34)

De la comparación de las imágenes se concluye que desde el año 1980 hasta el año 2005 la playa no ha tenido un cambio morfológico significativo, sólo se aprecia una acumulación mínima de sedimentos en la zona interna del rompeolas, debido a la construcción de éste en la década de los 90.

En la Figura 20 se compara la ubicación de las líneas de baja marea y de playa de los años 1980, 1998 y 2005. Es importante mencionar que por baja resolución de la imagen del año 1998, no se pudo trazar la línea playa. Respecto a la comparación, se detecta que en el sector central de la playa, las líneas analizadas han experimentado un leve retroceso respecto al año 1980, aproximadamente 7.0 m. Se menciona, además, que la línea de playa del año 2005 mantiene una forma curva similar a la del año 1980, pero menos pronunciada.

Figura 20: Comparación de líneas de baja marea y de playa.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



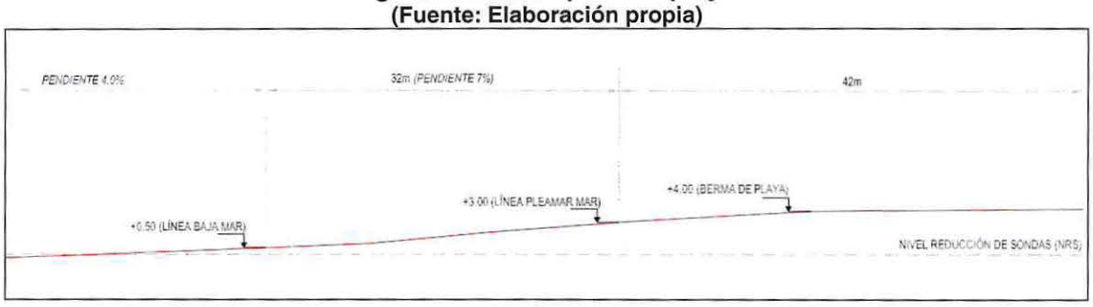
4.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA PLAYA

Actualmente la playa tiene una superficie aproximada de 22,656 m2, donde 12,169 m2 corresponden a la berma o zona de solana y 10,487 m2 a la zona de intermarea. La playa posee una longitud aproximada de 311 m y un ancho máximo en la zona media de 74 m.

Figura 21: Características geométricas de la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

En el sector medio de la playa, se traza un perfil del terreno (Figura 22), observando que la berma de la playa se ubica a la cota +4.00 mNRS y posee un ancho aproximado de 42 m. La zona de intermarea se ubica entre las cotas +0.50 y +3.00 mNRS, con un ancho aproximado de 32 m y una pendiente media de un 7%. Desde la línea de baja mar hacia mayores profundidades la pendiente promedio del fondo marino es de aproximadamente un 4.0%.

Figura 22: Perfil tipo de la playa.
(Fuente: Elaboración propia)



En la siguiente Figura se muestra la zona de intermarea captada en terreno, donde se observa que la línea de bajamar se ubica bajo el afloramiento rocoso del sector sur, mientras que la alta marea cubre plenamente este afloramiento llegando hasta la berma de la playa.

Figura 23: Bajamar y pleamar observadas en terreno.
(Fuente: Elaboración propia)

4.4 ROMPIENTE DE LA PLAYA

El tipo de rompiente se puede diferenciar en base a la estimación del número de Iribarren I_r, siendo un parámetro ampliamente aceptado como controlador del tipo de rotura. El tipo de rotura depende del peralte de la ola y de la pendiente del fondo marino.

Ecuación 5: Número de Iribarren.

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

Donde:

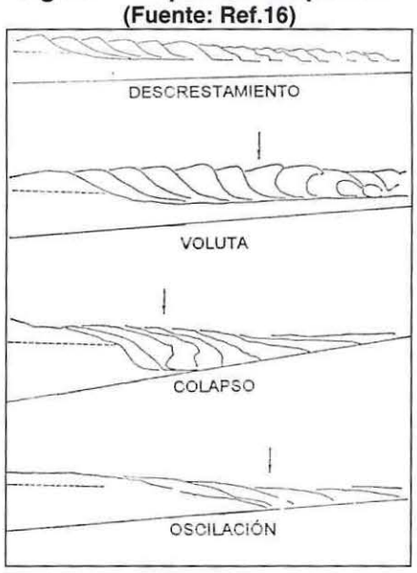
β: Pendiente del fondo marino.

L_0: Longitud de onda en aguas profundas.

H_0: Altura de ola en aguas profundas.

En la siguiente Figura se muestran los distintos tipos de rotura para diferentes secciones transversales:

Figura 24: Tipos de rompientes.
(Fuente: Ref.16)



En la siguiente Tabla se presentan los rangos del número de Iribarren para distintos tipos de rotura:

Tabla 5: Clasificación de rotura según número de Iribarren.
(Fuente: Ref.16)

Tipo de Rotura	I_r
Descrestamiento	≤ 0.46
Voluta	0.46 – 2.5
Colapso	2.5 – 3.3
Oscilación	≥ 3.3

De acuerdo estimaciones realizadas, el tipo de rotura que se presenta la playa El Salitre se asocia a descrestamiento: "*En la cresta de la ola aparece espuma, burbujas y turbulencia y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se descresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda*". Ref.16.

En la siguiente Figura se muestra una secuencia de rompimiento de oleaje captada en el sector de estudio:

Figura 25: Secuencia de rompimiento en la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia)

4.5 ROMPEOLAS EXISTENTE

En el sector sur de la playa se encuentra un rompeolas compuesto por rocas, el cual posee tramos con diferentes orientaciones.

Figura 26: Rompeolas de la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

En terreno se pudo observar que el rompeolas presenta fallas, detectando erosiones en el tronco y en el cabezo, con desmoronamientos de rocas, pérdida de los taludes y daños en general. No se tiene la certeza si estas fallas fueron generadas por el terremoto que afectó a Tocopilla en el año 2007 y/o alguna condición exigente de oleaje asociadas a marejadas.

Figura 27: Imágenes de rompeolas existente en la playa.
(Fuente: Elaboración propia)

El rompeolas posee una cota de coronamiento variable en toda su longitud, la cual aumenta cuando se interna en el mar. Su cota inicial es de +3.20 mNRS alcanzando la máxima cota en el cabezo de +5.00 mNRS.

4.6 ROCAS ACUMULADAS EN LA PLAYA

Se observa que a un costado de la playa se encuentra una cantidad considerable de rocas acumuladas, aproximadamente 150 unidades, las cuales seguramente corresponden a rocas que sobraron de la construcción del rompeolas existente.

Figura 28: Ubicación de rocas acumuladas en la playa.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

Figura 29: Rocas acumuladas en la playa.
(Fuente: Elaboración propia)

Se estimó que el diámetro de las rocas acumuladas en la playa varía entre 1.00 a 1.20 m, que corresponde aproximadamente a rocas con un peso entre 2 a 4 toneladas. Se determinó además que el volumen total de rocas acumuladas es de aproximadamente 135 m^3.

4.7 AFLORAMIENTOS ROCOSOS

Se detectaron dos afloramientos rocosos en la playa, uno ubicado en el sector sur a un costado del rompeolas y el otro ubicado en el sector norte, aproximadamente unos 200 m del primero, además en este segundo afloramiento, se observó la presencia de una roca de una altura aproximada de 1.80 m.

Figura 30: Ubicación de afloramientos rocosos.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

Figura 31: Afloramientos rocosos.
(Fuente: Elaboración propia)

a) Afloramiento sector sur.

b) Afloramiento sector norte.

4.8 USO DE LA PLAYA

El uso principal de la playa es humano, donde las personas realizan actividades de recreación y esparcimiento, esto ayudado por el clima que se presenta en la región, permitiendo que la playa sea utilizada en gran parte del año. Además se detecta que el rompeolas existente se utiliza para la pesca de orilla.

Figura 32: Usos actuales de la playa.
(Fuente: Elaboración propia)

Es importante mencionar que en la playa se observó la presencia de un cartel de prohibición de paso e ingreso al rompeolas, asociado por la mayor concentración de la energía del oleaje y el consiguiente peligro para las personas.

Figura 33: Prohibido el paso.
(Fuente: Elaboración propia)

4.9 INFRAESTRUCTURA TERRESTRE

Se detecta una escasa infraestructura de paseo costero, la que se compone por una franja de hormigón con bancas, sombreaderos y áreas verdes abandonadas. A esto se adiciona la presencia de edificaciones abandonadas, dentro de las cuales existe un centro juvenil, el cual fue administrado por la municipalidad, y tras un incendio éste fue abandonado por la misma.

Figura 34: Infraestructura terrestre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

Figura 35: Paseo costero.
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 36: Edificaciones abandonadas.
(Fuente: Elaboración propia)

a) Centro juvenil abandonado **b) Construcciones abandonas**

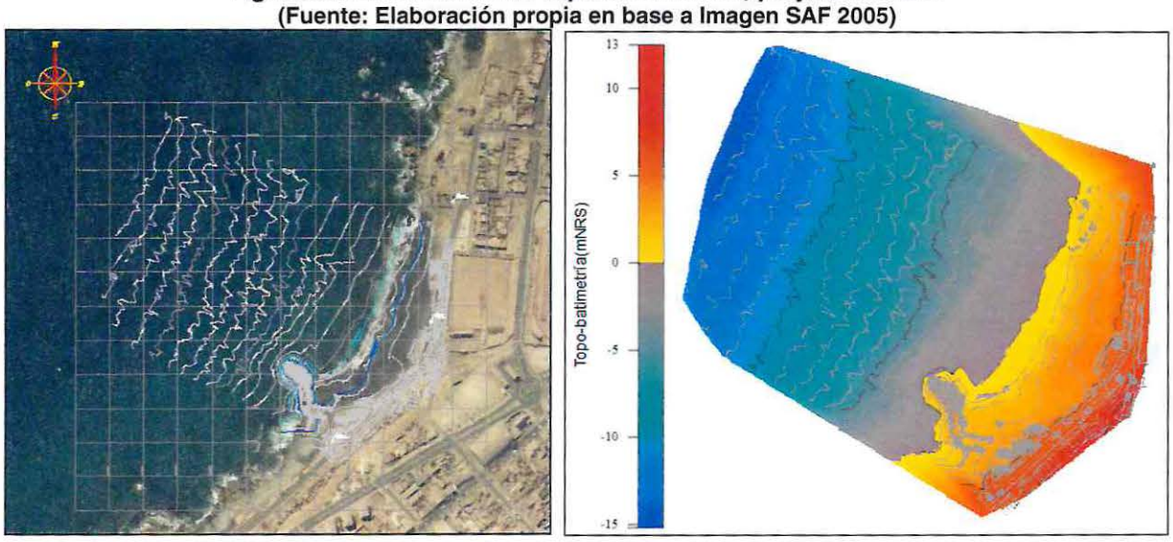
CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES

5.1 TOPO-BATIMETRÍA

El levantamiento topo-batimétrico realizado en el sector se ejecutó entre 28 de junio y 8 de julio de 2009, donde se levantó una superficie total de 17.6 ha. Con la batimetría se levantaron 13.2 ha, alcanzando hasta la profundidad de -15 mNRS. Respecto a la topografía, la superficie levantada fue de 4.4 ha, alcanzando hasta el veril +13 mNRS.

Figura 37: Levantamiento topo-batimétrico, playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



5.2 CORRIENTES

Con el objeto de caracterizar la dinámica de las corrientes en el sector de estudio, se efectuaron lances de derivadores lagrangianos en fase lunas de sicigia y cuadratura, durante marea llenante y vaciante en dos niveles de profundidad correspondiente a 0 y 2 m.

Figura 38: Mediciones de corrientes lagrangianas en playa El Salitre.
(Fuente: Ref.3)

A continuación se presentan los resultados de las corrientes medidas:

- Cuadratura

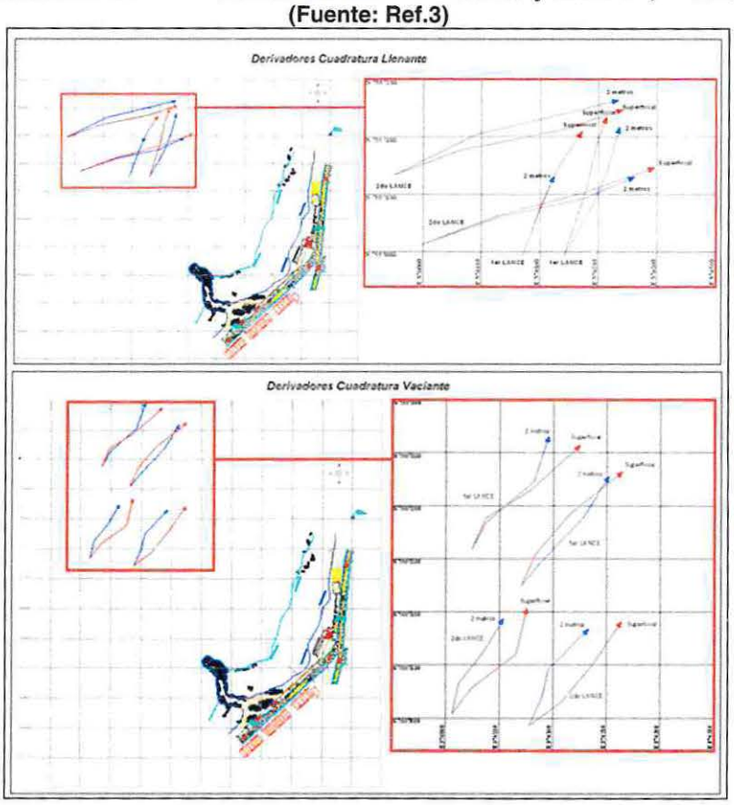
Para los lanzamientos realizados, tanto en fase de marea llenante como vaciante, los derivadores presentaron similares velocidades en las profundidades de 0 y 2 m.

En marea llenante, en el primer lance los derivadores se dirigieron hacia el N, con velocidades del orden de 6 cm/s. Durante el segundo lance los derivadores se dirigieron hacia el NE, con velocidades de 11 cm/s.

Para la fase de marea vaciante, en el primer lance las velocidades estuvieron en el orden de 8 cm/s, mientras que durante el segundo lance las velocidades fueron un poco menores del orden de 7 cm/s. Para ambos lances los derivadores se dirigieron hacia el NNE.

El viento registrado durante las mediciones de corrientes incidió principalmente desde la dirección SW, con intensidades promedio de 2.3 m/s.

Figura 39: Trayectorias de los derivadores en marea vaciante y llenante, medidos en cuadratura. (Fuente: Ref.3)



- Sicigia

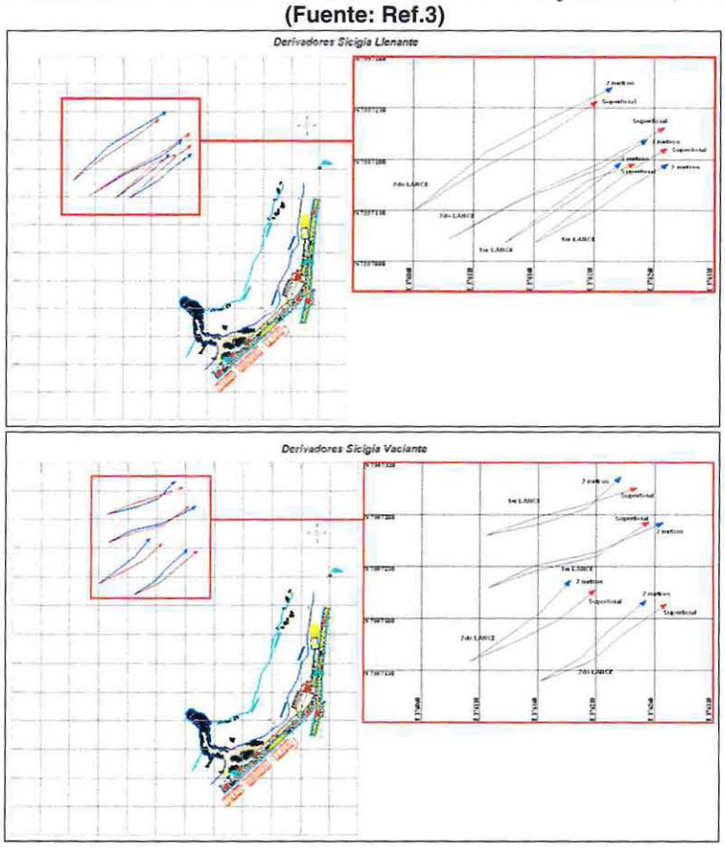
Para los lanzamientos realizados, tanto en marea llenante como vaciante, los derivadores se dirigieron hacia el NE, presentando velocidades similares en las profundidades de 0 y 2 m.

Al igual que durante las mediciones en cuadratura, el viento registrado durante las mediciones de corrientes incidió principalmente desde la dirección SW, con intensidades promedio de 1.7 m/s.

En marea llenante, las velocidades estuvieron en el orden de 7 cm/s, mientras que durante el segundo lance las velocidades fueron un poco mayores del orden de 11 cm/s.

Para fase de marea vaciante, durante el primer lance las velocidades estuvieron en el orden de 8 cm/s, mientras que durante el segundo lance las velocidades fueron un poco menores del orden de 7 cm/s.

Figura 40: Trayectorias de los derivadores en marea vaciante y llenante, medidos en sicigia. (Fuente: Ref.3)



Considerando que durante la marea llenante y vaciante la dirección de las corrientes no se modificó, manteniendo en ambos casos una dirección NE ó NNE, se puede inferir que la componente mareal es insignificante sobre las corrientes, siendo el oleaje y el viento los forzantes principales.

5.3 MAREA

- Análisis No Armónico de las Tablas de Marea

Con el objetivo de determinar el comportamiento de la marea astronómica a lo largo del tiempo, se analizan las tablas los años 2007, 2008 y 2009 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) (Ref.35).

El análisis se realiza para los pronósticos del puerto patrón de Antofagasta, ya que Tocopilla es considerado como un puerto secundario. Para obtener niveles representativos de marea en la zona de estudio, en la Ref.35 se presentan los valores de corrección a las alturas del puerto patrón.

Tabla 6: Diferencias de marea y otras constantes.
(Fuente: Ref.35)

Nº	LOCALIDAD	POSICIÓN		DIFERENCIAS DE MAREAS				E. del P.	Rango de la Marea en Sicigias
				Hora		Altura			
		Lat.	Long.	Plea	Baja	Plea	Baja		
		sur	weste	H. M.	H. M.	M	M	H. M.	M
				PUERTO PATRÓN: ARICA					
210	RADA DE ARICA	18 29	70 19	VER PÁGINAS DE LA 13 A LA 16				8 32	1.40
				PUERTO PATRÓN: ANTOFAGASTA					
215	CALETA VÍTOR	18 45	70 21	-0 08	-0 08	-0,23	-0,44	8 29	1.20
220	CALETA CHICA	19 21	70 17	-0 09	-0 09	-0,08	-0,03	8 17	1.20
225	BAHÍA DE PISAGUA	19 36	70 16	-0 10	-0 10	+0,02	-0,02	8 42	1.42
230	CALETA JUNÍN	19 39	70 11	-0 20	-0 20	-0,12	-0 24	8 30	1.22
				PUERTO PATRÓN: IQUIQUE					
235	BAHÍA DE IQUIQUE	20 13	70 10	VER PÁGINAS DE LA 17 A LA 20				8 55	1.50
				PUERTO PATRÓN: ANTOFAGASTA					
240	CALETA MOLLE	20 17	70 08	-0 11	-0 11	-0,13	-0,06	8 20	1.31
241	CALETA PATILLOS	20 44	70 11	-0 18	-0 18	-0,06	-0,08	8 40	1.31
245	CALETA LOBOS	21 01	70 10	-0 25	-0 25	+0,12	-0,03	9 13	1.20
	BAHÍA ALGODONALES								
250	PUERTO TOCOPILLA	22 06	70 14	-0 03	-0 03	-0,21	-0 14	8 21	1.20

En esta Tabla se propone una disminución de 0.21 m para las alturas de pleamar, mientras que para las bajamares se propone una disminución de 0.14 m, ambas respecto a las alturas de marea del puerto patrón de Antofagasta.

De acuerdo al análisis de las tablas de marea, y en base al Glosario Resumido de la Ref.35, se detecta que el régimen de marea que se presenta en la región, es de características semidurna con desigualdad diurna, es decir, a diario se presentan dos pleamares y dos bajamares con distintas amplitudes.

A continuación se presentan los planos maréales obtenidos para Tocopilla:

Tabla 7: Planos maréales pronosticados para Tocopilla.
(Fuente: Elaboración propia)

Planos Maréales 2007, 2008 y 2009 Tocopilla	mNRS
Pleamar Máxima	+1.55
Promedio Pleamares Mayores	+1.13
Promedio Pleamares	+0.96
Nivel Medio	+0.62
Promedio Bajamares	+0.28
Promedio Bajamares Menores	+0.23
Bajamar Mínima (*)	-0.03 (*)
Nivel de Reducción de Sondas (NRS)	0.00

(*) El SHOA propone para Tocopilla una disminución de 0.14 m a las bajamares de Antofagasta. De acuerdo al pronóstico de marea para Antofagasta (2007,2008 y 2009), se detectó una bajamar menor al valor propuesto de disminución (+0.11 mNRS), resultando un valor negativo, obteniendo una la bajamar mínima con una cota inferior al NRS, caso que no es factible que ocurra, ya que el NRS corresponde al nivel mínimo alcanzado en sicigia, estando la luna en perigeo. De acuerdo a lo anterior se utiliza como cota de bajamar mínima 0.00 mNRS.

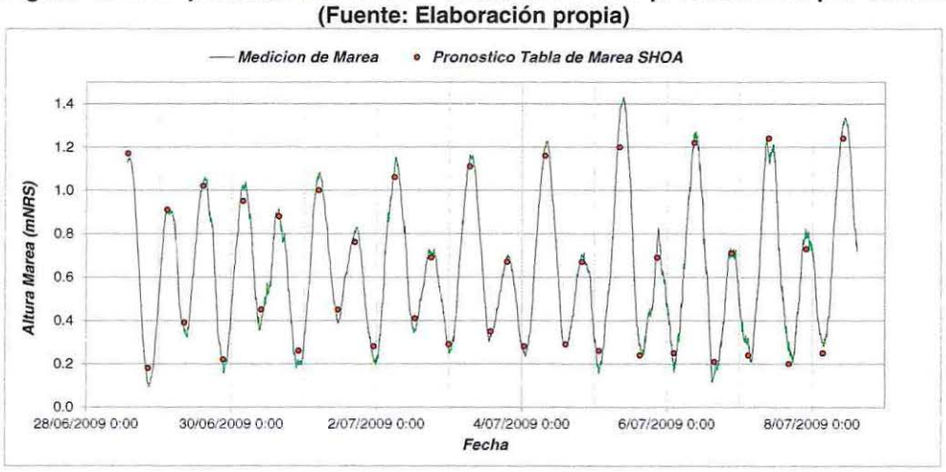
- Mediciones de Marea

Con el objeto de caracterizar de mejor manera la marea en la zona de estudio, se analizan las mediciones de marea de la Ref.4. La estación de marea permaneció instalada durante un periodo de 10 días, entre el 28 de junio y el 08 de julio de 2009.

Figura 41: Estación de marea instalada en la caleta de pescadores de Tocopilla.
(Fuente: Ref.4)

En la siguiente Figura, se comparan los resultados de las mediciones de marea con las pronosticadas en las Tablas de Marea del SHOA para Tocopilla como puerto secundario.

Figura 42: Comparación de marea medida con marea pronosticada por SHOA.
(Fuente: Elaboración propia)



De la comparación grafica realizada, se puede observar que el pronóstico de marea tiene un comportamiento similar a las mareas medidas, concluyendo que los factores propuestos por el SHOA para corregir las alturas de baja y alta marea del puerto patrón son aceptables. De acuerdo a lo anterior, se considera válido utilizar las tablas de marea del SHOA para definir niveles de diseño por marea astronómica.

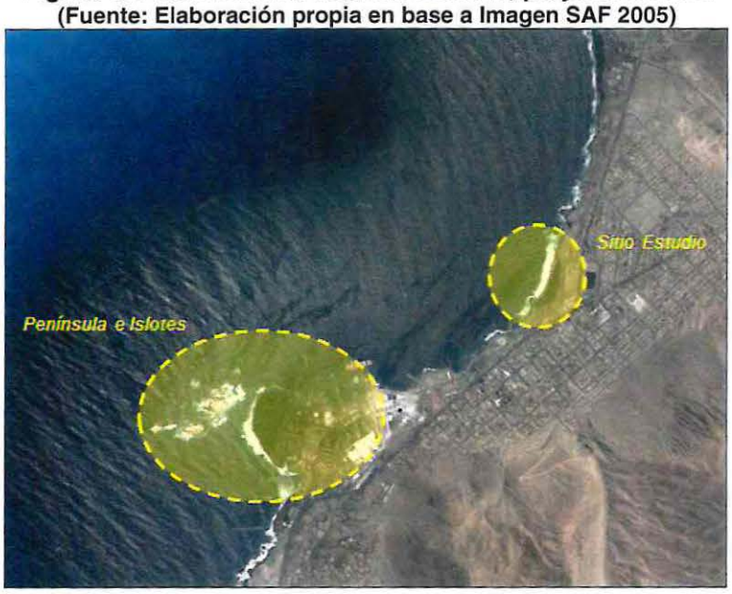
5.4 OLEAJE

En el presente capítulo se analiza el clima de oleaje que se presenta en el sector de la playa El Salitre, esto en base a la Ref.13. Con la definición del clima de oleaje operacional y extremo, se pueden establecer criterios necesarios para analizar la configuración de playa y los pre-diseños de las obras de abrigo.

De forma preliminar se observa que el área de estudio se encuentra protegida en una cierta parte al oleaje reinante que proviene del SW, gracias a la península donde se emplaza el puerto Tocopilla y un grupo se islotes que se ubican al sur del sitio de estudio, permitiendo que el oleaje

disminuya su energía al momento de ingresar a la playa. Además se detecta que el sector queda expuesto al oleaje que incide desde el IV cuadrante, oleaje lejano que proviene desde el hemisferio norte y que se presenta en época de verano (Ver Figura 43).

Figura 43: Ubicación de zona de estudio, playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



En la Ref.13 se menciona que para la caracterización del clima de oleaje se utilizaron datos de oleaje de aguas profundas Olas Chile III del nodo de Mejillones, correspondiente a 22 años de estadística. Además se menciona que la transferencia de oleaje fue realizada utilizando el modelo MIKE 21 FM SW desarrollado por DHI. La metodología que se utilizada para la propagación de oleaje consistió en propagaciones de alturas unitarias, determinando coeficientes de transformación de altura y de dirección, entregando los parámetros característicos del oleaje en una zona cercana al área de estudio.

La información de salida de los modelos fue extraída en tres puntos o nodos cercanos al área de estudio.

Figura 44: Imagen de ubicación de puntos de extracción de resultados.
(Fuente: Ref.13)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados gráficos de la propagación unitaria de oleaje para las direcciones SW, W y NW, utilizando un periodo peak de 14 segundos.

Figura 45: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=225°.
(Fuente: Ref.13)

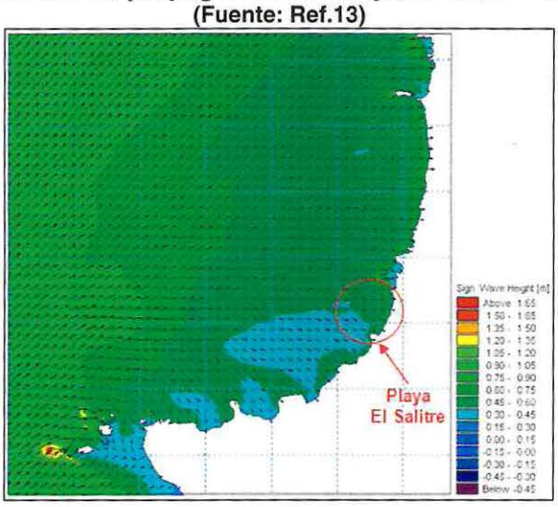


Figura 46: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=270°.
(Fuente: Ref.13)

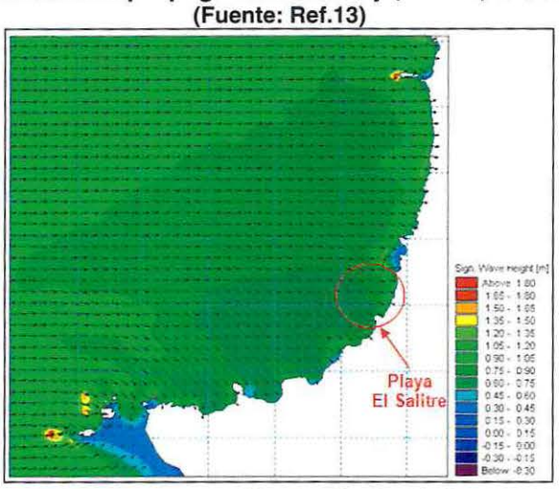
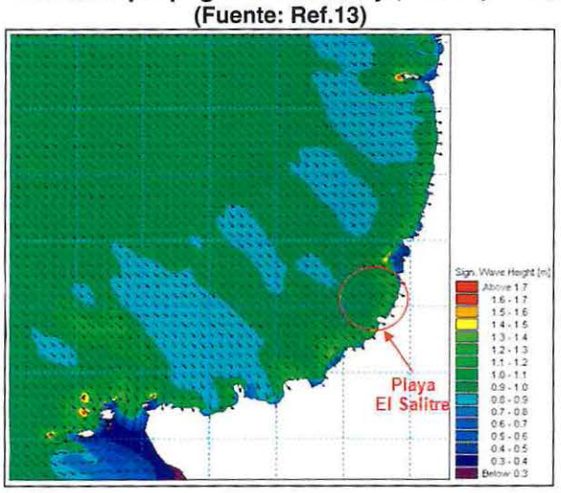


Figura 47: Resultado propagación de oleaje, H=1m, T=14s, Dir=315°.
(Fuente: Ref.13)



De las Figuras anteriores, se corrobora que por la presencia de la península y el pequeño grupo de islotes que se ubica al sur-oeste de la playa, el oleaje que proviene del III cuadrante disminuye su energía, presentando una menor altura de ola en el sitio, que el oleaje que proviene del IV cuadrante. Además de la configuración geográfica, el oleaje del III cuadrante está afectado a una mayor refracción respecto al que proviene del IV cuadrante, ya que el oleaje del norte incide casi perpendicular a la costa.

5.4.1.1 CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL

De acuerdo a los resultados presentados en la Ref.13, se infiere que el oleaje reinante incide en la zona de estudio mayoritariamente con una dirección de 280°. Se observa que aproximadamente un 98% de los datos presenta alturas inferiores a 2.0 m, donde el 28% corresponden a alturas entre 1.0 a 2.0 m. Además se detecta que las mayores alturas de oleaje detectadas en la zona cercana, inciden mayoritariamente con una dirección 300°, ya que el sector en estudio se encuentra totalmente expuesto al oleaje que proviene en estas direcciones.

Figura 48: Rosa altura oleaje en P2.
(Fuente: Ref.13)

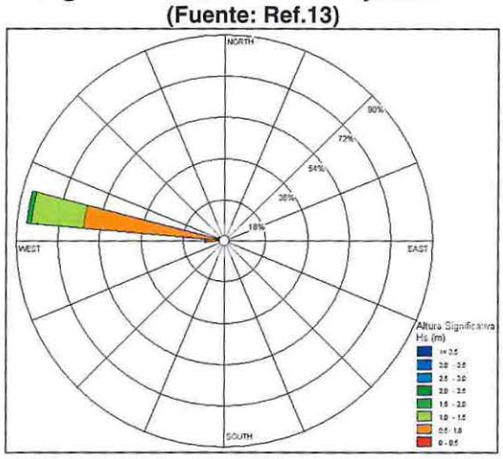


Tabla 8: Tabla incidencia dirección y altura, Punto 2.
(Fuente: Ref.13)

		Altura Significativa [m]										
		0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5+	Total	FR [%]	FA [%]
Dirección Peak [deg]	180									0	0.00	0.00
	190									0	0.00	0.00
	200									0	0.00	0.00
	210									0	0.00	0.00
	220									0	0.00	0.00
	230									0	0.00	0.00
	240									0	0.00	0.00
	250	178	9							187	0.29	0.29
	260	650	176							826	1.29	1.58
	270	2199	3210	85						5494	8.57	10.15
	280	2601	36496	14485	1256	63	3			54904	85.61	95.75
	290	14	154	419	188	32	2			809	1.26	97.02
	300	2	54	302	829	585	96	10		1878	2.93	99.94
	310		4	9	14	8	1			36	0.06	100
	320									0	0.00	100
	330									0	0.00	100
	340									0	0.00	100
	350									0	0.00	100
	360									0	0.00	100
	Total	5644	40103	15300	2287	688	102	10	0	64134		
	FR [%]	8.80	62.53	23.86	3.57	1.07	0.16	0.02	0.00		100	
	FA [%]	8.80	71.33	95.19	98.75	99.83	99.98	100	100			

Tabla 9: Tabla incidencia altura y periodo, Punto 2.
(Fuente: Ref.13)

Altura Significativa [m]		Período Peak [s] 0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20+	Total	FR [%]	FA [%]
0	0.5				740	1166	2499	1114	114	11			5644	8.80	8.80
0.5	1.0				294	1319	9680	22302	5447	929	131	1	40103	62.53	71.33
1.0	1.5					15	331	6163	6853	1749	189		15300	23.86	95.19
1.5	2.0							134	1120	930	102	1	2287	3.57	98.75
2.0	2.5							1	160	417	109	1	688	1.07	99.83
2.5	3.0								9	73	20		102	0.16	99.98
3.0	3.5									2	8		10	0.02	100
3.5+													0	0.00	100
Total		0	0	0	1034	2500	12510	29714	13703	4111	559	3	64134		
FR [%]		0.00	0.00	0.00	1.61	3.90	19.51	46.33	21.37	6.41	0.87	0.00		100	
FA [%]		0.00	0.00	0.00	1.61	5.51	25.02	71.35	92.71	99.12	100	100			

Tabla 10: Tabla incidencia dirección y periodo, Punto 2.
(Fuente: Ref.13)

Dirección Peak [deg]	Período Peak [s] 0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20+	Total	FR [%]	FA [%]
180												0	0.00	0.00
190												0	0.00	0.00
200												0	0.00	0.00
210												0	0.00	0.00
220												0	0.00	0.00
230												0	0.00	0.00
240												0	0.00	0.00
250				187								187	0.29	0.29
260				529	297							826	1.29	1.58
270				153	1804	2111	1139	281	6			5494	8.57	10.15
280				114	399	10399	28420	12507	2851	213	1	54904	85.61	95.75
290				49			82	363	190	125		809	1.26	97.02
300				2			70	541	1047	216	2	1878	2.93	99.94
310							3	11	17	5		36	0.06	100
320												0	0.00	100
330												0	0.00	100
340												0	0.00	100
350												0	0.00	100
360												0	0.00	100
Total	0	0	0	1034	2500	12510	29714	13703	4111	559	3	64134		
FR [%]	0.00	0.00	0.00	1.61	3.90	19.51	46.33	21.37	6.41	0.87	0.00		100	
FA [%]	0.00	0.00	0.00	1.61	5.51	25.02	71.35	92.71	99.12	100	100			

5.4.1.2 CLIMA DE OLEAJE EXTREMO

En las siguientes Tablas se presentan los resultados del clima extremo de oleaje en la zona de interés, asociados al III y IV cuadrante.

Tabla 11 Valores extremos de altura de ola en sitio estudio, III cuadrante.
(Fuente: Ref.13)

Tr (anos)	III Cuadrante			IV Cuadrante		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
2	1.88	11	281	2.58	17	299
5	2.04			2.82		
10	2.14			2.98		
25	2.27			3.18		
50	2.36			3.33		
70	2.41			3.4		
100	2.46			3.48		

5.5 GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS

Con el objeto de clasificar los sedimentos de acuerdo a su tamaño, se analizan los resultados presentados en la Ref.10, en la cual se realiza una caracterización granulométrica de los sedimentos que se encuentran en la playa, para ello se extrajeron muestras de sedimentos superficiales de 13 estaciones.

Las estaciones de muestreo se definieron en líneas paralelas a la costa, de acuerdo a lo siguiente:

- 5 muestras en la zona intermareal (1S a 5S).
- 5 muestras submareales cercanas al veril -5 mNRS (6S a 10S).
- 2 muestras submareales cercanas al veril -10 mNRS (11S y 12S).
- 1 estación submareales cercana al veril -15 mNRS (13S).

En la siguiente Figura se muestra la ubicación de las estaciones de muestreo.

Figura 49: Ubicación de las estaciones de muestreo de sedimentos.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

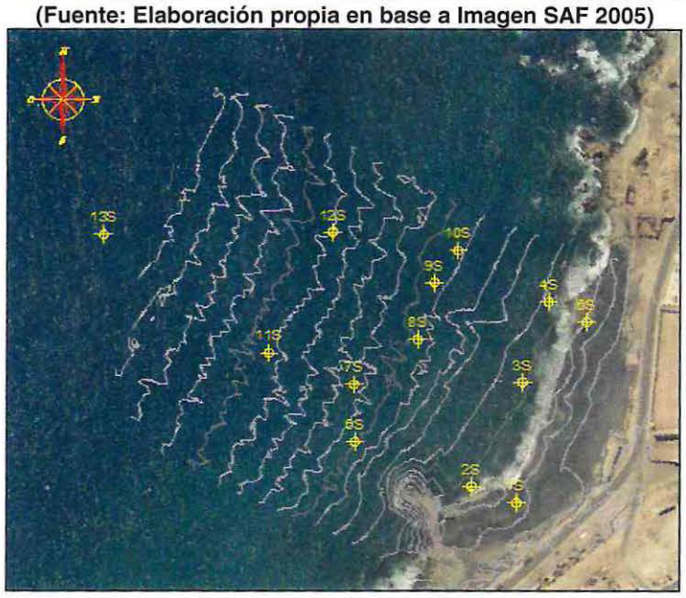


Tabla 12: Coordenadas de ubicación de las muestras de sedimentos.
(Fuente: Ref.10)

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste
1S	22° 5'18.53"	70°11'54.43"
2S	22° 5'18.01"	70°11'55.89"
3S	22° 5'14.84"	70°11'54.21"
4S	22° 5'12.38"	70°11'53.35"
5S	22° 5'13.00"	70°11'52.10"
6S	22° 5'16.63"	70°11'59.70"
7S	22° 5'14.87"	70°11'59.72"
8S	22° 5'13.51"	70°11'57.63"
9S	22° 5'11.76"	70°11'57.07"
10S	22° 5'10.78"	70°11'56.29"
11S	22° 5'13.88"	70°12'02.49"
12S	22° 5'10.19"	70°12'00.39"
13S	22° 5'10.20"	70°12'07.88"

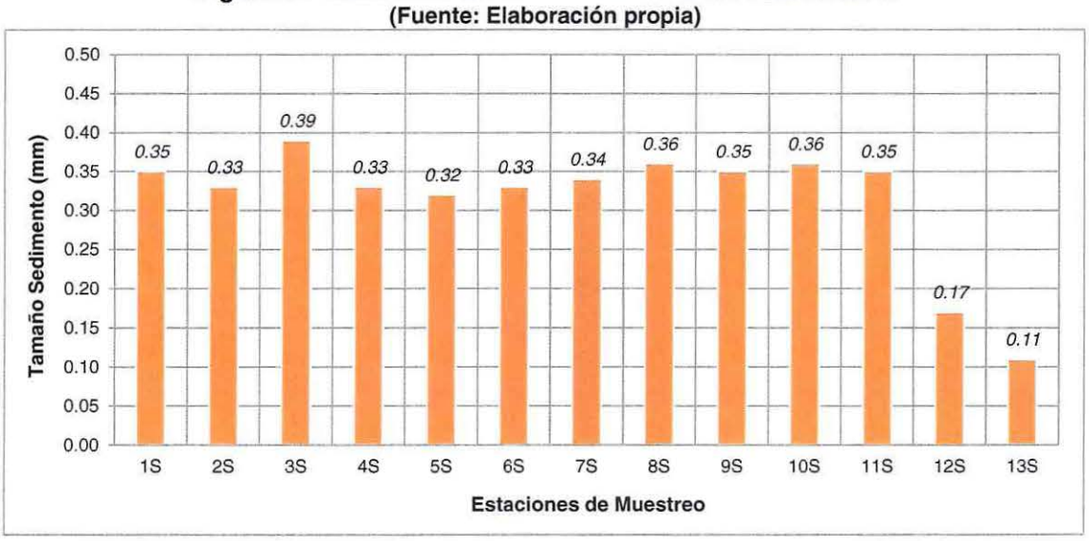
- Resultados de Granulometría

La clasificación del sedimento se realizó según escala de tamaños Wentworth de 1922. De acuerdo a esta escala, los sedimentos intermareales y la mayoría de los submareales, desde las estaciones 1S hasta 11S están compuestos principalmente por arenas medianas, con un diámetro promedio de 0.35 mm. Se detecta además que las estaciones submareales más profundas (12S y 13S) corresponden a arenas finas. Este cambio de la granulometría de las estaciones con la profundidad es típico de las zonas submareales, puesto que a mayor profundidad, dependiendo de la velocidad de las corrientes predominantes, es posible esperar una mayor tasa de sedimentación de material fino, lo que trae consigo la presencia de sedimentos de menor tamaño.

Tabla 13: Resultados de estaciones de muestreo.
(Fuente: Elaboración propia)

Estaciones	Tamaño Promedio (mm)	Tipo Sedimentario (Wentworth)
1S	0.35	Arena Mediana
2S	0.33	Arena Mediana
3S	0.39	Arena Mediana
4S	0.33	Arena Mediana
5S	0.32	Arena Mediana
6S	0.33	Arena Mediana
7S	0.34	Arena Mediana
8S	0.36	Arena Mediana
9S	0.35	Arena Mediana
10S	0.36	Arena Mediana
11S	0.35	Arena Mediana
12S	0.17	Arena Fina
13S	0.11	Arena Muy Fina

Figura 50: Grafico de tamaños medios de los sedimentos.
(Fuente: Elaboración propia)



CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS DE CALIDAD AMBIENTAL DE SEDIMENTOS

6.1 CALIDAD AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS

Con el objeto de determinar la calidad ambiental de las arenas que se encuentran en la playa El Salitre, se analizan los resultados presentados en la Ref.10, donde se tomaron muestras de arenas para realizar una caracterización química de los sedimentos. La ubicación de las muestras de calidad ambiental fue la misma de las estaciones de granulometría (Ver Figura 49).

Debido a que en Chile no existen normativas para determinar criterios de calidad ambiental de los sedimentos marinos, se utiliza la normativa española CEDEX (2004), en la cual se presentan los límites máximos de concentraciones de metales pesados para arenas destinadas a la regeneración de playas.

Figura 51: Limites de concentraciones de metales pesados (CEDEX 2004).
(Fuente: Ref.6)

Elemento	(mg/Kg)
Arsénico (As)	80
Cadmio (Cd)	0.5
Cromo total (Cr)	200
Cobre (Cu)	50
Mercurio (Hg)	0.3
Níquel (Ni)	-
Plomo (Pb)	60
Zinc (Zn)	250

En la siguiente Tabla, se presentan las concentraciones de metales pesados que se obtuvieron en los sedimentos para cada una de las estaciones de muestreo, marcando con color rojo las concentraciones que superaron la normativa CEDEX.

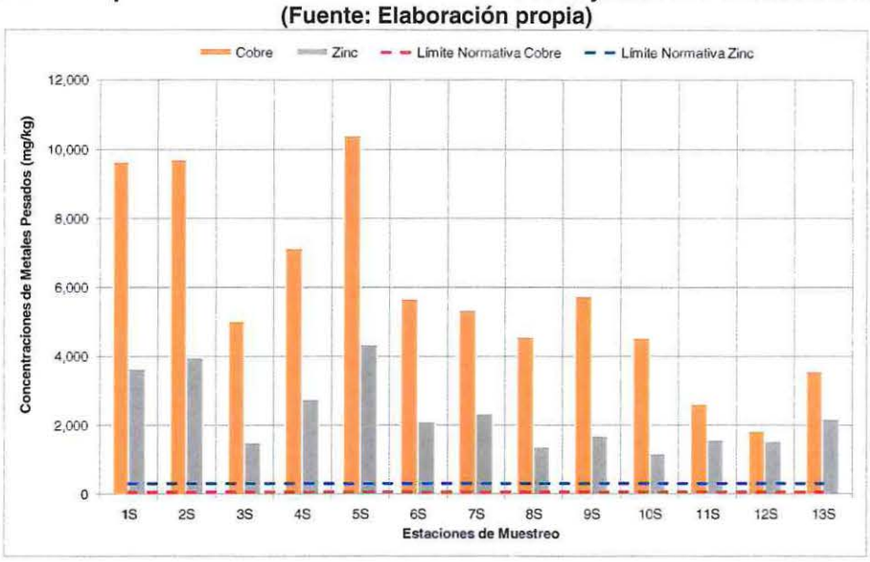
Tabla 14: Concentraciones de metales pesados (mg/kg) encontradas en la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia)

Estación	Concentraciones de Metales Pesados (mg/Kg)								
	Nitrógeno	Fósforo	Arsénico	Cadmio	Cobre	Cromo	Mercurio	Plomo	Zinc
1S	94.1	245.4	2.3	0.2	9,624	21.3	0.1	34.9	3,655
2S	90.7	256.0	1.9	0.4	9,692	23.3	0.1	30.7	3,972
3S	85.2	6.1	2.7	0.2	5,023	21.0	0.1	18.0	1,517
4S	80.5	223.0	2.8	0.4	7,128	8.8	0.1	24.1	2,744
5S	55.2	111.5	3.0	0.5	10,390	10.2	0.1	32.3	4,338
6S	54.5	19.7	3.1	0.3	5,674	21.3	0.1	15.8	2,114
7S	54.7	17.1	2.2	0.2	5,347	25.2	0.1	16.0	2,335
8S	54.0	12.8	2.6	0.3	4,558	19.8	0.2	10.2	1,384
9S	54.0	18.0	2.5	0.3	5,753	20.8	0.2	10.0	1,711
10S	54.5	4.6	2.2	0.4	4,520	17.0	0.2	3.1	1,189
11S	71.1	24.9	2.9	<0.2	2,604	27.5	0.1	16.0	1,580
12S	70.7	29.9	2.8	<0.2	1,823	30.2	0.1	17.3	1,536
13S	67.0	5.4	2.8	0.2	3,557	20.8	0.1	23.0	2,184
Promedio	68.2	75.0	2.6	0.3	5,823	20.6	0.1	19.3	2,328
Máximo	94.1	256.0	3.1	0.5	10,390	30.2	0.2	34.9	4,338
Mínimo	54.0	4.6	1.9	0.2	1,823	8.8	0.1	3.1	1,189

Al comparar los resultados obtenidos con los límites de las concentraciones de metales pesados expuestos en las normativas internacionales, se detecta que las arenas de la playa presentan una concentración significativa de **Cobre** y **Zinc**, superando ampliamente los límites de la normativa.

Es importante mencionar que las concentraciones de los demás metales pesados analizados, fueron menores a las expuestas en la normativa CEDEX, siendo las concentraciones de Cobre y de Zinc las más preocupantes.

Figura 52: Comparación de concentraciones de Cobre y Zinc con normativa CEDEX.
(Fuente: Elaboración propia)



Con el objeto de representar la distribución en planta de las concentraciones de Cobre y Zinc, utilizando el software Global Mapper, se realizó una interpolación de las concentraciones obtenidas en cada una de las estaciones de muestreo. Se observa que las mayores concentraciones de estos metales se presentan en la zona intermareal, disminuyendo hacia las estaciones más profundas (Ver Figura 53 y Figura 54).

Figura 53: Concentración aproximada de Cobre en el área de estudio.
(Fuente: Elaboración propia)

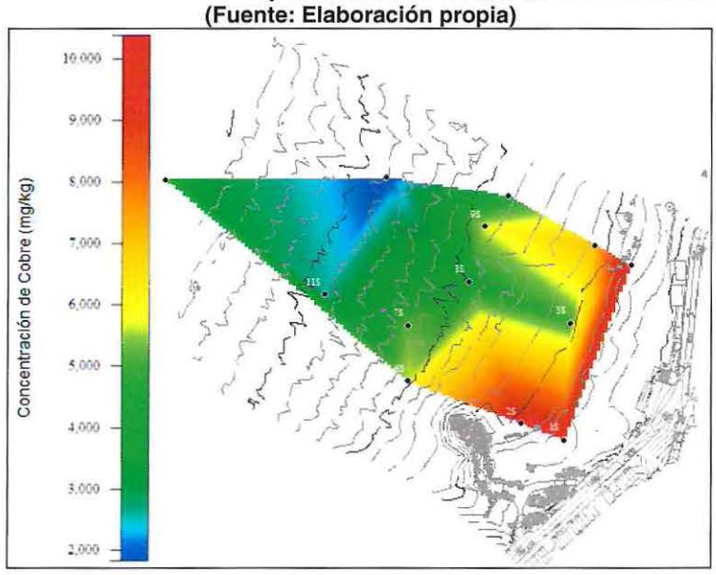
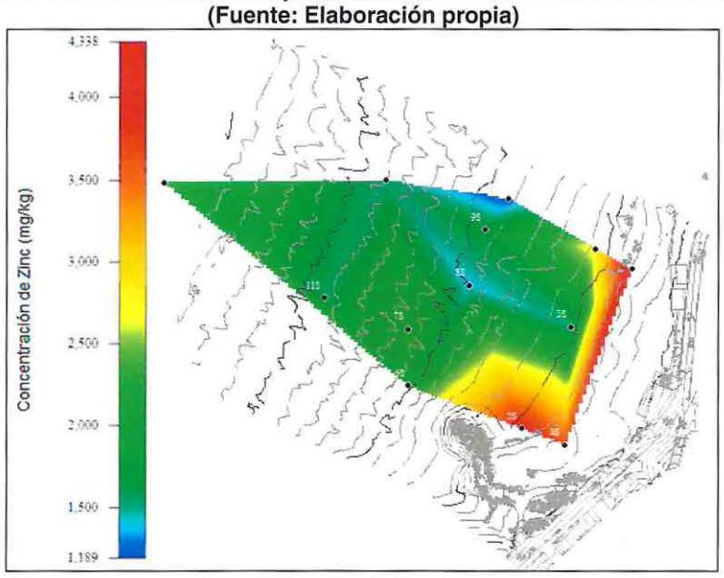


Figura 54: Concentración aproximada de Zinc en el área de estudio.
(Fuente: Elaboración propia)



Es importante mencionar que durante el desarrollo del proyecto de diseño de la playa artificial, se realizaron calicatas exploratorias, las cuales se ubicaron en la berma de la playa. Durante la ejecución de las calicatas, a una profundidad del terreno de 2.50 m, se tomaron muestras de arenas, a las cuales se les realizaron ensayos de concentraciones de metales pesados. Los resultados indicaron que las arenas sub-superficiales poseen concentraciones similares a las arenas de superficie. Por lo tanto se puede concluir que todas las arenas que se encuentran en la playa, tanto las de superficie como las profundas, se encuentran con elevadas concentraciones Cobre y Zinc.

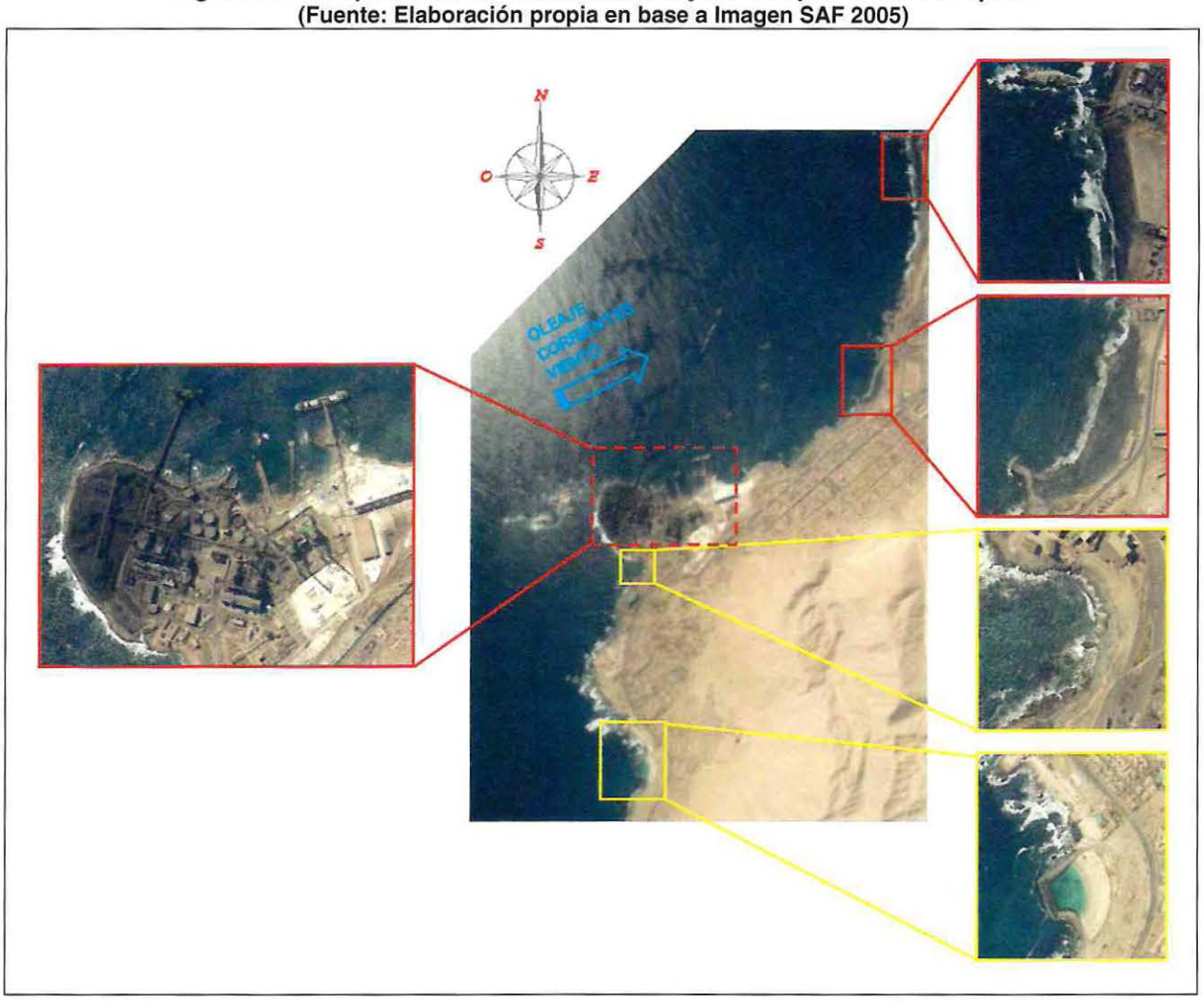
Las altas concentraciones de Cobre y de Zinc que se encontraron en las arenas de la playa, superan ampliamente los límites de la normativa española. Para el caso del Cobre, la normativa es superada en un 11,000% y para el Zinc en un 1,000%. Por lo anterior se puede inferir que las arenas de la playa muestran claras evidencias de haber sido alternadas, al parecer la presencia de estos metales estaría vinculada a las faenas de cobre de la Compañía Minera Tocopilla, posiblemente iniciadas desde el año 1923. Estas faenas se ejecutaron en el sector de puerto, ubicado al sur de la playa, y por las corrientes, el viento y el oleaje que inciden de sur a norte, el material fue trasportado hacia el norte, depositándose en la playa El Salitre.

De acuerdo al documento de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2008) (Ref.1)*...."Los suelos de Tocopilla aún sufren contaminación por grandes cantidades de desechos de faenas mineras abandonados por empresas que ya no operan en la zona. Minera Tocopilla por ejemplo, que en el año 1992 procesaba el cobre sulfurado por el método de flotación a orillas de la playa, frente al centro de la ciudad, vertía desechos químicos y relaves altamente contaminados directamente al mar....".*

Lo anterior explicaría claramente el nivel de alteración de los sedimentos la playa y, en consecuencia, se explicaría el color negro de los mismos debido a la oxidación del cobre.

Revisando la imagen del SAF año 2005 de Tocopilla (Ref.34), se puede detectar que hacia el norte del puerto, en los sectores donde existe presencia de arenas, éstas presentan un color oscuro, mientras que hacia el sector sur del puerto, los sedimentos no poseen este tipo de color, los cuales al parecer no presentarían concentraciones de metales pesados.

Figura 55: Comparación de suelos al norte y sur del puerto de Tocopilla.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



6.2 PELIGROSIDAD DE LAS ARENAS

Teniendo en consideración las elevadas concentraciones de Cobre y Zinc que presentaron las arenas de la playa El Salitre, en el proyecto de diseño de la playa artificial, se desarrolló un estudio de desclasificación de la peligrosidad de las arenas, según lo establecido en del D.S. 148/2005: "Reglamento Sanitario Sobre el Manejo de Residuos Peligrosos".

Los ensayos de desclasificación tuvieron por objetivo descartar la categoría de peligroso a las arenas existentes y por lo tanto, tratarlas como material contaminado sin peligro para la salud.

El estudio fue ejecutado por la empresa CESMEC y fue denominado como Informe de Ensayo SQC-21754 (Ref.8). En la siguiente Figura se muestra la ubicación de los 8 puntos de muestreo.

Figura 56: Puntos de muestreo para ensayo de peligrosidad.
(Fuente: Ref.8)

Para las muestras obtenidas se analizaron parámetros de: Toxicidad Aguda, Toxicidad Crónica, Toxicidad Extrínseca (Constituyentes Orgánicos e Inorgánicos), Corrosividad e Inflamabilidad, señalados en Resolución N° 292 de fecha 31 de Mayo de 2005. Los resultados arrojaron que los valores obtenidos para estos ensayos específicos, se encuentran por debajo de los niveles máximos permitidos (Arts. 12, 13, 14, 15 y 17 del Reglamento). Por lo tanto, las arenas de la playa El Salitre no serían peligrosas, pudiéndose manejar como residuos de normales, no generando restricciones para su extracción.

Este estudio fue ratificado por la SEREMI de Salud de la Región de Antofagasta, mediante Resolución Exenta N°1411 de 05/05/2011 (Ref.33), la cual clasifica como residuos industriales No Peligrosos a las arenas de la playa El Salitre de Tocopilla.

CAPÍTULO VII

7. CONFIGURACIÓN DE PLAYA ARTIFICIAL

Con el objeto de estimar los volúmenes de arenas contaminadas que se intervendrían directamente con el proyecto de playa, en el presente capítulo se propone y analiza la configuración de una playa artificial para el sector de estudio.

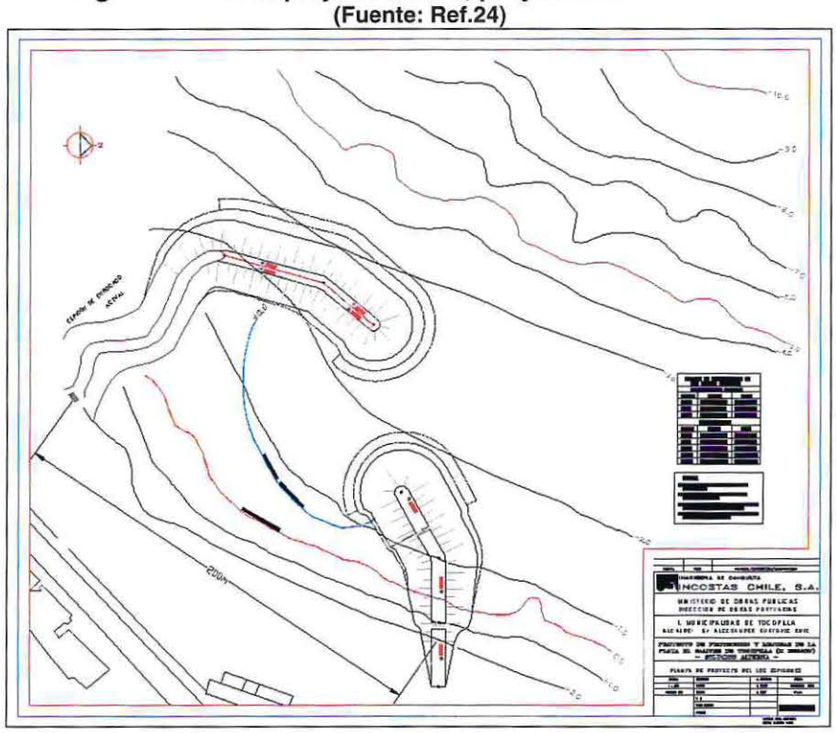
La configuración de playa se basa en la aplicación de la parábola Hsu y Evans (1989), análisis de las playas artificiales que se han construido en la región y tomando como información base un proyecto ejecutado para la playa El Salitre en el año 1998.

7.1 ANÁLISIS DE PLAYA ARTIFICIAL PARA PLAYA EL SALITRE

Como análisis preliminar, se revisa el proyecto desarrollado por la empresa Incostas en el año 1998 (Ref.24), el cual consiste en generar para el sector una playa artificial encajada, compuesta por dos rompeolas en sus costados.

Al tomar como base esta forma de playa, se pretende que las obras de protección, además de permitir condiciones óptimas de oleaje al interior de la poza y de generar la estabilidad de la playa, resguarden a la playa de un posible trasporte de material contaminado que pueda ingresar a la misma.

Figura 57: Planta playa El Salitre, proyecto Incostas 1998.
(Fuente: Ref.24)



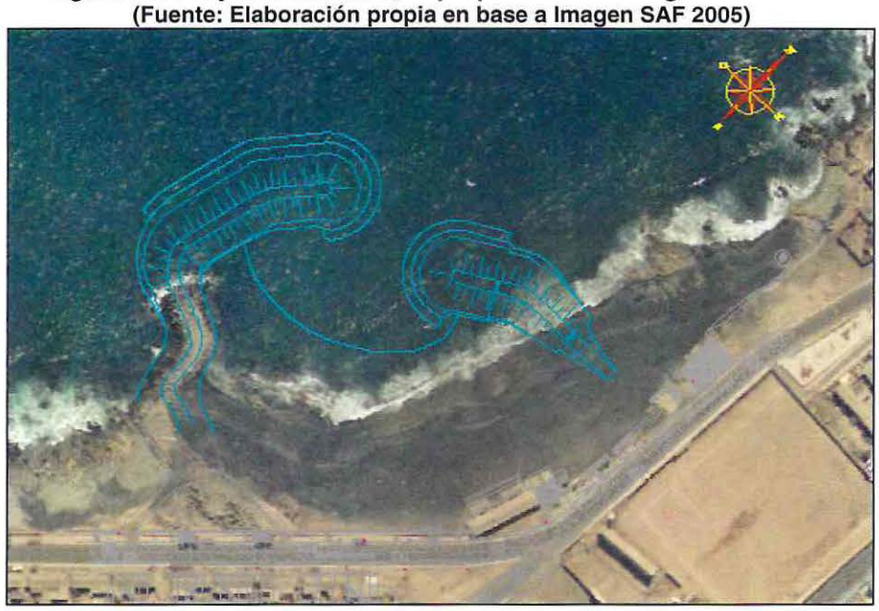
El proyecto de Incostas considera utilizar el rompeolas existente, manteniendo su misma forma. En la configuración propuesta se modificará esta forma, realizando una rectificación de su eje, para que la obra de abrigo se complemente de mejor manera con la playa.

En este proyecto se genera una playa con un ancho aproximado de 95 m. De acuerdo a lo indicado en el documento Temático de Regeneración de Playas (Ref.15): *"Los usuarios clasifican*

como estrecha a una playa de menos de 20-30 m de anchura y excesivamente ancha si tiene más de 75-100 metros", para un correcto uso de la playa, se considera disminuir el ancho de playa del proyecto de Incostas, lo que además permitirá la incorporación de obras terrestres, las cuales tendrán la función de mejorar el paseo costero del sector, brindando áreas verdes y áreas recreacionales, las cuales necesitan un ancho mínimo, y la única posibilidad de incrementar los espacios, es en dirección hacia el mar.

Al superponer el proyecto de Incostas con la imagen del SAF del año 2005 (Ref.34), se observa que el proyecto ocupa aproximadamente un 70% de la superficie total de la playa. La configuración propuesta considerará aumentar la superficie de utilización de playa, para lo cual se desplazará y modificará la orientación del rompeolas norte.

Figura 58: Proyecto Incostas, superpuesto con imagen SAF 2005.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



En resumen para que la configuración de playa armonice y se complemente de mejor manera con el sector y con futuras obras de paseo costero, se realizarán las siguientes modificaciones al proyecto de Incostas:

- Rectificación del espigón del sector sur.
- Modificar orientación del rompeolas norte, con el objetivo de obtener una mayor superficie de utilización de playa y aumentar la superficie de agua abrigada.
- Considerar una disminución del ancho de playa para la proyección de paso costero.

7.2 PLAYAS ARTIFICIALES CONSTRUIDAS EN LA REGIÓN

La segunda región del país ha sido pionera en el desarrollo de proyectos y construcción de playas artificiales, siendo la primera experiencia en Chile en este tipo de obras, las cuales corresponden a playas encajadas conformadas por dos rompeolas de abrigo.

Las playas artificiales que se han construido en la región corresponden a inversión pública, a cargo de la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas. Es importante mencionar que el sector privado de la región, relacionado con la industria minera, ha contribuido

con el desarrollo de proyectos de playas artificiales, los que a la fecha no han sido materializados en obras.

En la ciudad de Antofagasta se han construido tres playas artificiales: Playa El Balneario, Playa Paraíso y Playa Trocadero. Mientras que en la ciudad de Tocopilla se construyó la playa artificial Covadonga.

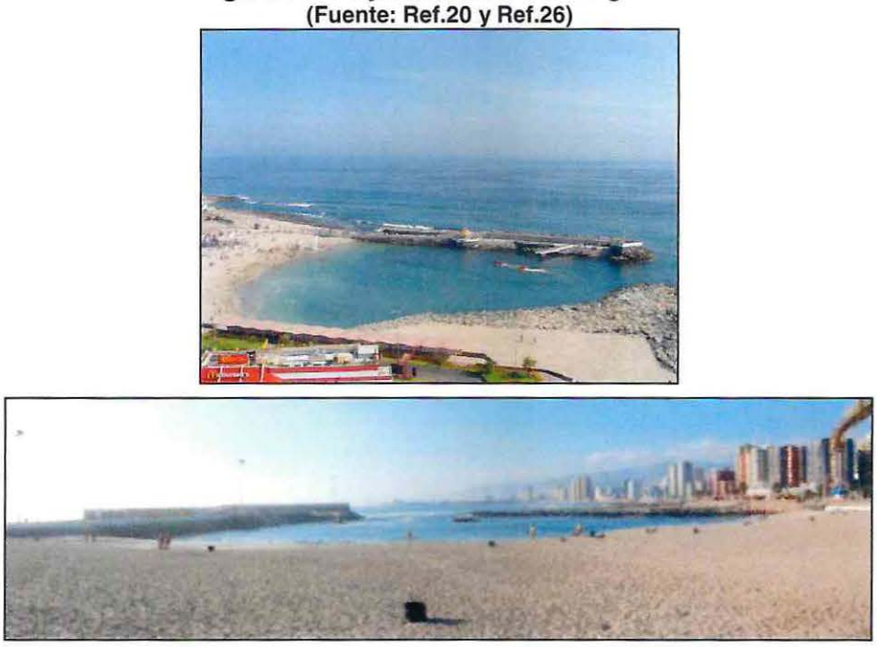
Figura 59: Playas artificiales construidas en la ciudad de Antofagasta.
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 60: Playa artificial construida en la ciudad de Tocopilla.
(Fuente: Elaboración propia)

- Playa Balnerario

Esta playa se encuentra ubicada en sector centro-sur de la ciudad de Antofagasta, y corresponde a la primera playa artificial construida en el país, tiene arenas blancas y una longitud de playa de 130 m y un ancho promedio de berma de 40 m.

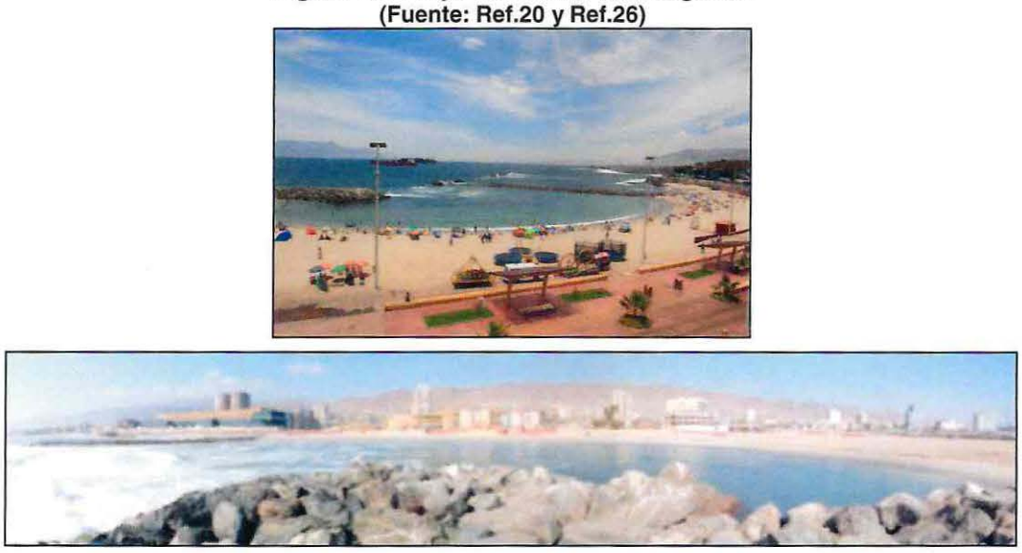
Figura 61: Playa Balneario-Antofagasta.
(Fuente: Ref.20 y Ref.26)



- Playa Paraíso

La playa Paraíso se encuentra en la zona céntrica de la ciudad, carca de la Municipalidad y de Centros Comerciales, en las inmediaciones del barrio histórico. La playa tiene una longitud aproximada de 250 m de frente y un ancho de berma entre 25 a 80 m.

Figura 62: Playa Balneario-Antofagasta.
(Fuente: Ref.20 y Ref.26)



- Playa Trocadero

La playa Trocadero se ubica en el sector norte de la ciudad, inserta en la costanera norte. La playa posee una longitud aproximada de 170 m y 40 m de berma.

Figura 63: Playa Trocadero-Antofagasta.
(Fuente: Ref.20 y Ref.26)

- Playa Covadonga

La ultima playa construida en la región corresponde a la playa Covadonga, ubicada en el sector sur de la ciudad de Tocopilla, corresponde a una playa protegida lateralmente por dos rompeolas más un rompeolas semi-sumergido. Cuenta con una longitud aproximada de playa de 140 m y una berma entre 40 a 60 m.

Figura 64: Playa Covadonga-Tocopilla.
(Fuente: Ref.20)

7.2.1 ESTUDIO DE MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PLAYAS ARTIFICIALES DE LA II REGIÓN

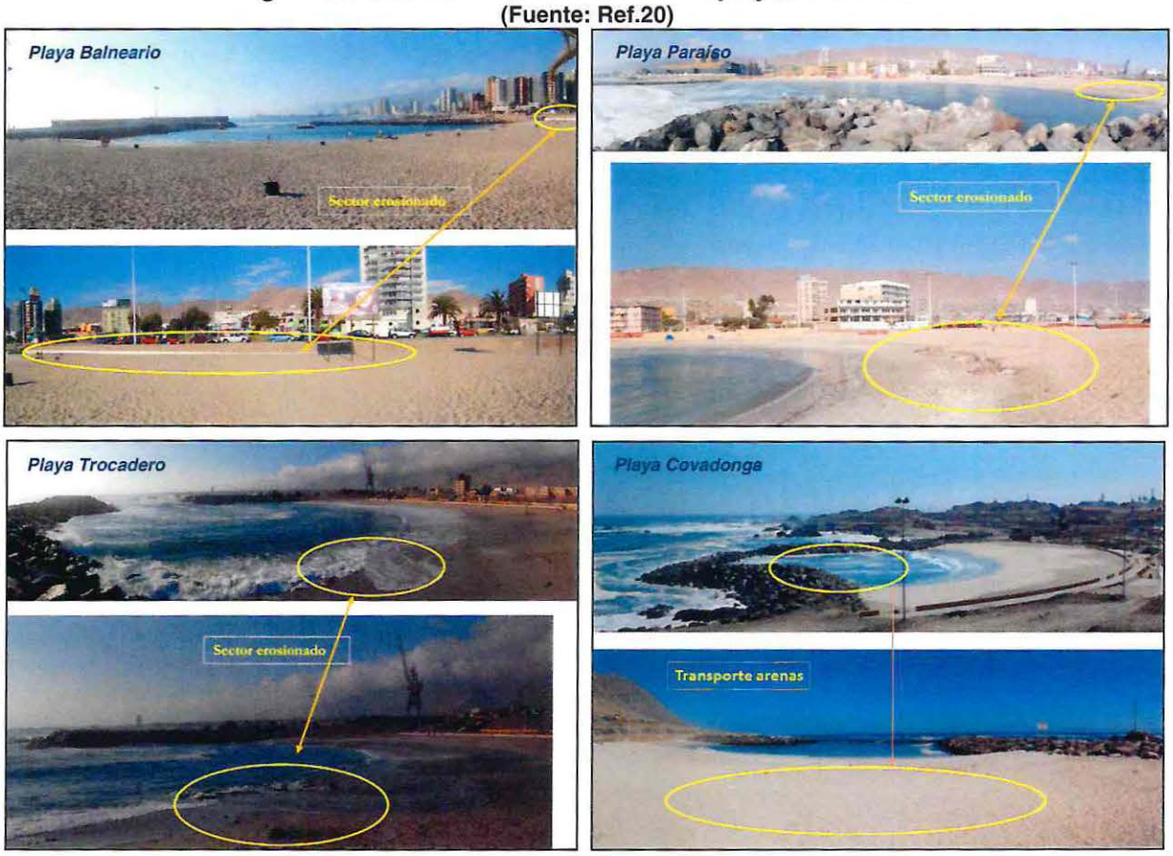
Si bien las playas artificiales han presentado un comportamiento estable desde su construcción, han evidenciado pequeños problemas que motivaron al MOP, a través de la Dirección de Obras Portuarias, a realizar un estudio de monitoreo, el cual fue desarrollado por el Instituto Nacional de Hidráulica entre los años 2007 y 2010.

En este estudio se detectó que las playas presentan una escasez de arena bajo la cota -1.00 mNRS, estimando que ha migrado hacia el frente de la playa. Los sectores más recurrentes de erosión corresponden a los sectores interiores de los rompeolas.

Las erosiones más fuertes detectadas en las playas fueron las siguientes:

- Sector sur en playa Trocadero.
- Sector sur playa Paraíso.
- Lado norte de playa Balneario.
- No se detectó erosión en la playa, sin embargo por marejadas el sedimento se ha trasportado hacia la zona seca de la playa.

Figura 65: Sectores erosionados de las playas artificiales.
(Fuente: Ref.20)



En este estudio se realizaron análisis de equilibrio a largo plazo, concluyendo lo siguiente:

- Las playas han presentado un comportamiento acorde con las condiciones de oleaje y orientación de las obras que las contienen. En los casos donde se han generado problemas erosivos, se destaca que han sido por evolución natural hasta alcanzar la forma en planta de equilibrio.

Figura 66: Plantas de equilibrio playa Balneario y playa Paraíso.
(Fuente: Ref.20)

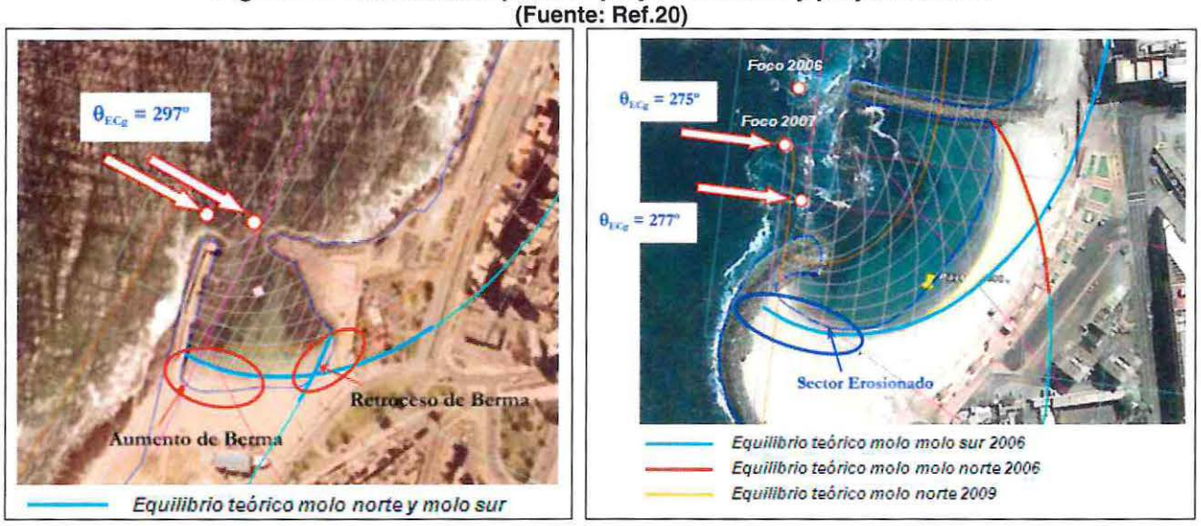
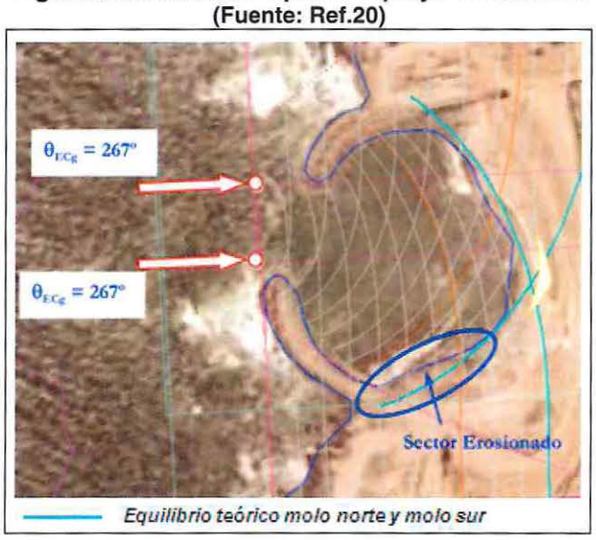


Figura 67: Planta de equilibrio playa Trocadero.
(Fuente: Ref.20)



Respecto a los perfiles, se estimó que las playas donde no existen rompeolas sumergidos o rebalses, presentaron perfiles acorde a su diseño. Respecto a los perfiles de playa con rompeolas sumergidos, las pendientes fueron mayores al ajuste teórico. Lo que se asoció a la presencia de diques sumergidos y rebasable, ya que este tipo de obras refleja parte de la energía del oleaje que ingresa a las playas.

7.3 CRITERIOS DE DISEÑO PARA CONFIGURACIÓN DE PLAYA

7.3.1 ANCHO DE PLAYA

Como se mencionó anteriormente, para definir el ancho de playa de diseño se utilizó el Documento Temático de Regeneración de Playas (Ref.15). Para cumplir con estos requerimientos de anchura, la playa propuesta tendrá un ancho entre 30 a 70 m.

7.3.2 FUNCIONALIDAD DE LA PLAYA

Toda playa cumple en mayor o menor medida con funciones de defensa de la costa, hábitat de flora y fauna y uso lúdico humano.

La generación de la playa artificial El Salitre tiene como objetivo principal mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de Tocopilla, por ende se considera como necesidad que la playa tenga funciones de uso humano.

Las actividades humanas que se realizarán en la playa estarán agrupadas en actividades de baño y actividades terrestres, relacionadas con paseos, deportes, etc.

7.3.3 PASEO COSTERO COMPLEMENTARIO

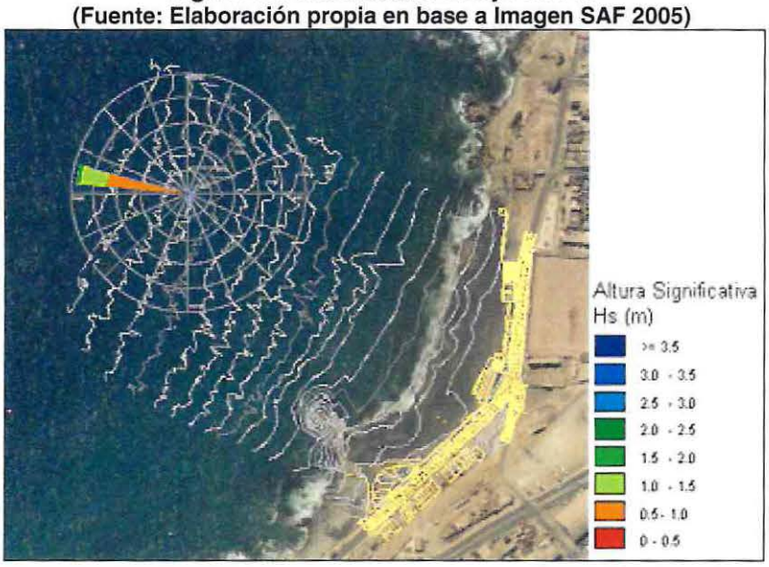
De acuerdo a los requerimientos de obras terrestres, relacionados con el desarrollo de un paseo costero a cargo del MINVU, se considera necesario ensanchar el actual paseo en al menos 20 m.

Figura 68: Proyección de límite de paseo costero.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

7.3.4 OLEAJE

Los resultados del clima de oleaje operacional en el punto P2, indicaron que mayoritariamente el oleaje incide en el sector de estudio con una dirección 280°, donde el 98% de los datos presentan alturas inferiores a 2 m, concentrándose el 71% en alturas inferiores a 1 m.

Figura 69: Rosa altura oleaje en P2.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



7.3.5 GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS

De acuerdo a los resultados del estudio sedimentológico (Ref.10), el tipo de sedimentos que actualmente posee la playa El Salitre mayoritariamente corresponden a arenas medianas, las cuales poseen un tamaño promedio de 0.35 mm. Además en esta referencia se presentan resultados granulométricos de la playa Hornitos, playa ubicada a unos 80 km al sur de Tocopilla, sector que posiblemente sea utilizado como empréstito para las nuevas arenas de la playa artificial. Los resultados indicaron que las arenas presentes en la playa Hornitos poseen un tamaño promedio de aproximadamente 0.45 mm.

7.3.6 NIVELES DE SUPERFICIE AGUA

7.3.6.1 NIVEL MÁXIMO DE LA SUPERFICIE DEL AGUA

El nivel máximo de la superficie del agua está dado por la ocurrencia conjunta de un temporal con una marea alta, ya que cuando ocurre un temporal, la marea astronómica varía por causa de efectos meteorológicos.

- Marea Astronómica

De acuerdo con los planos mareales pronosticados para el área de estudio y analizados en el Cap.5.3, se utiliza como cota de diseño de marea astronómica el promedio de las pleamares mayores, adoptando un valor de +1.55 mNRS.

- Marea Meteorológica

Dada la ubicación geográfica de Tocopilla, zona norte del país, los efectos de las bajas presiones asociadas a temporales no son importantes, ya que la presencia del anticiclón del Pacífico en el sector norte del país impide que los temporales ingresen al sector de estudio. En general las bajas presiones se presentan en los meses de verano, las cuales están asociadas a una vaguada costera y no a temporales locales que puedan implicar un aumento del nivel del mar, este fenómeno sólo se manifiesta en la parte baja de la atmósfera, generando nubes cerca del suelo, denominadas estratos, y en ocasiones nieblas y lloviznas. Sin embargo, de forma conservadora

se considera un margen de seguridad de 0.25 m para cubrir posibles efectos meteorológicos, obteniendo un nivel máximo de la superficie del agua de +1.80 mNRS.

7.3.6.2 NIVEL MÍNIMO DE LA SUPERFICIE DEL AGUA

Se considera como nivel de diseño mínimo la ocurrencia de una baja marea, sin considerar efectos meteorológicos, adoptando como nivel mínimo del agua la cota del Nivel de Reducción de Sondas (0.00 mNRS).

7.3.7 CORONAMIENTO BERMA DE PLAYA

La cota de coronamiento de la berma de playa se estimó en base al Setup del oleaje. Cuando el oleaje rompe en una playa se produce un incremento en la superficie del nivel del mar y consiste en una pendiente ascendente del agua en dirección hacia la tierra.

Considerando los efectos astronómicos, meteorológicos y rompimiento del oleaje, éste podría alcanzar la cota +3.00 mNRS. Considerando que la configuración propuesta corresponde a una playa encajada, al momento de ingresar el oleaje a la poza se generaría un aumento del nivel del agua, de forma conservadora se considera proyectar la berma de la playa a la cota +3.50 mNRS.

7.3.8 FUNCIONALIDAD DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN

Las obras de protección a considerar deberán cumplir las siguientes funciones:

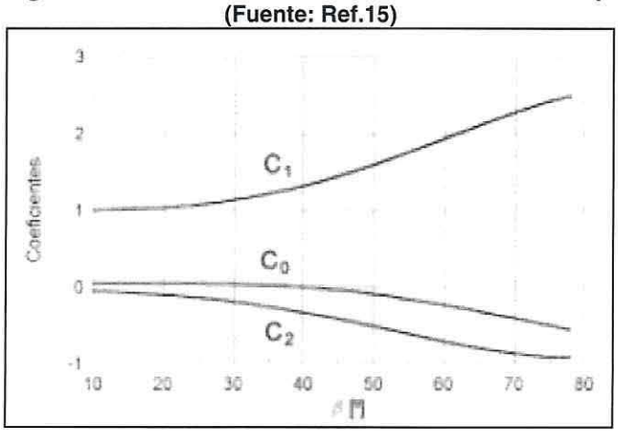
- Generar condiciones óptimas de oleaje al interior de la poza.
- Proteger a la nueva playa del transporte de sedimentos contaminados que actualmente se encuentran en el área de proyecto, depositados en el fondo marino.
- Permitir la estabilidad de la playa en el largo plazo.

7.4 FORMA DE PLAYA

7.4.1 ANÁLISIS DE PLANTA DE PLAYA

Se realizó un análisis para definir la forma en planta a largo plazo que tendría la playa El Salitre, este análisis se realizó mediante la aplicación de la parábola Hsu (1989). La estimación de la parábola Hsu se realiza mediante las expresiones presentadas en la Ecuación 1 y Ecuación 2. Mientras que los coeficientes de la parábola se obtienen de la Figura 70.

Figura 70: Coeficientes C0, C1, C2 en función de β.
(Fuente: Ref.15)



7.4.1.1 DIRECCIÓN FLUJO MEDIO

De acuerdo a lo indicado en la Ref.15, la forma en planta de la playa al largo plazo depende principalmente de la dirección del flujo medio de energía del oleaje que se presenta en el sector de estudio. Las líneas de costa de las playas tienden a formarse perpendicularmente a la dirección del flujo medio.

De los análisis realizados se determinó que el flujo medio de energía incide en la playa El Salitre con una dirección de 292°, incidiendo de forma perpendicular a los veriles batimétricos y la línea de costa.

Figura 71: Dirección de flujo medio de oleaje en playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

7.4.1.2 FORMA EN PLANTA DE PLAYA PROYECTADA

Obtenida la dirección del flujo medio anual del oleaje, se procedió a realizar el trazado de las parábolas que define la forma en planta de la playa proyectada. El trazado de los radios se efectuó con un incremento angular de $\Delta\theta = 5°$.

Tomando como base la configuración de playa del proyecto Incostas 1998, se realizaron mejoras y optimizaciones, donde principalmente se aumentó la superficie de playa y superficie de agua. Para ello se analizaron diferentes emplazamientos, orientaciones y longitudes de los rompeolas norte y sur.

Considerando los objetivos principales de los rompeolas, el rompeolas sur se emplazó en un sector más profundo, más alejado de la costa que el rompeolas norte. Lo anterior permitirá desviar un posible transporte de sedimentos que provenga de la dirección del oleaje reinante (SW).

A continuación se presentan los resultados en tabla y en forma gráfica de la función parabólica para los rompeolas norte y sur.

Tabla 15: Valores de radios para parábolas de rompeolas sur y norte. (Fuente: Elaboración propia)

Rompeolas Sur			Rompeolas Norte		
Radios	Ángulo	Radio (m)	Radios	Ángulo	Radio (m)
R0	43	217.7	R0	40	136.9
R1	48	202.5	R1	45	125.7
R2	53	189.0	R2	50	116.4
R3	58	176.8	R3	55	108.2
R4	63	165.7	R4	60	101.0
R5	68	155.7	R5	65	94.6
R6	73	146.7	R6	70	89.0
R7	78	138.6	R7	75	84.0
R8	83	131.2	R8	80	79.5
R9	88	124.5	R9	85	75.4
R10	93	118.3	R10	90	71.8
R11	98	112.7	R11	95	68.5
R12	103	107.5	R12	100	65.4
R13	108	102.7	R13	105	62.6
R14	113	98.3	R14	110	60.1
R15	118	94.2	R15	115	57.7
R16	123	90.4	R16	120	55.6
R17	128	86.8	R17	125	53.5
R18	133	83.5	R18	130	51.7
R19	138	80.4	R19	135	49.9
R20	143	77.5	R20	140	48.3
R21	148	74.7	R21	145	46.7
R22	153	72.1	R22	150	45.3
R23	158	69.7	R23	155	44.0
R24	163	67.4	R24	160	42.7
R25	168	65.3	R25	165	41.5
R26	173	63.2	R26	170	40.4
R27	178	61.2	R27	175	39.3
R28	183	59.4	R28	180	38.3
R29	188	57.6	R29	185	37.3
R30	193	56.0	R30	190	36.4
R31	198	54.4	R31	195	35.5
R32	203	52.8	R32	200	34.7

Figura 72: Trazado de rayos y forma en planta de playa. (Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

7.4.2 ANÁLISIS DE PERFIL DE PLAYA

7.4.2.1 PERFIL DE EQUILIBRIO

Existen diversas formulaciones empíricas para representar el perfil de equilibrio de una playa, siendo la más utilizada la propuesta por Bruun (1954) y posteriormente por Dean (1977), donde el perfil adopta una forma parabólica.

La forma del perfil de equilibrio está asociada a una profundidad h que depende de la distancia a la costa x y un parámetro de forma A, el cual depende de las características granulométricas del sedimento. La expresión para el cálculo del perfil de equilibrio se presenta en la Ecuación 3.

El parámetro de forma A, ajustado por Dean (1987), se presenta en la Ecuación 4. De modo aproximado y para arenas con densidad ρ = 2.65 T/m^3, la velocidad de caída del grano puede obtenerse como:

Ecuación 6: Velocidad de caída del grano.

$$\omega = 1.1*10^6 D^2 \qquad D < 0.1 \text{ mm}$$
$$\omega = 273\, D^{1.1} \qquad 0.1 < D < 1 \text{ mm}$$
$$\omega = 4.36\, D^{0.5} \qquad D > 0.1 \text{ mm}$$

Con D = Diámetro medio del sedimento expresado en metros.

El sedimento que se encuentra actualmente en la playa El Salitre posee un diámetro promedio de 0.35 mm, mientas que el sedimento de empréstito que se ubica en la playa Hornitos posee un diámetro mayor de aproximadamente 0.45 mm.

En la siguiente Tabla se presentan los parámetros para conformar el perfil de equilibrio:

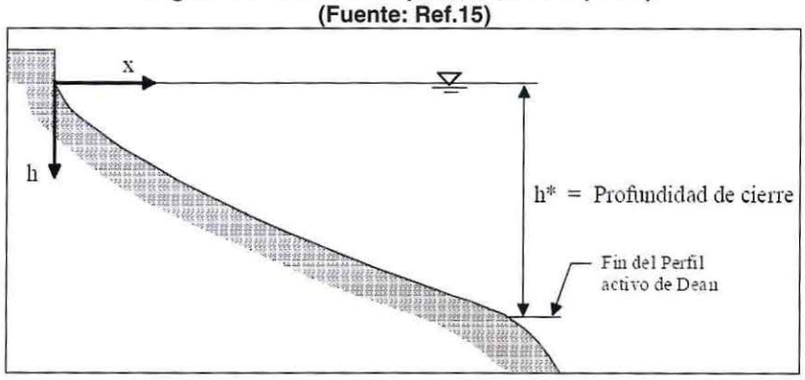
Tabla 16: Parámetros del perfil de equilibrio.
(Fuente: Elaboración propia)

	Arenas Existentes	Arenas Relleno
D (m)	0.00035	0.00045
w (m/s)	0.043	0.057
K	0.51	0.51
A	0.128	0.144

7.4.2.2 PROFUNDIDAD DE CIERRE

El modelo teórico propuesto por Dean sólo es válido dentro de la zona de rotura del oleaje, donde el límite en largo plazo de la aplicación del perfil de equilibrio es la profundidad activa.

Figura 73: Perfil de equilibrio, Dean (1977).
(Fuente: Ref.15)



De acuerdo a la Ref.15, la profundidad de cierre está dada por la fórmula de Hallemeier (1978,1981) modificada por Birkemeier (1985):

Ecuación 7: Profundidad de cierre.

$$d_{cierre} = 1.75 H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{g T_s^2} \right)$$

Donde:

H_{s12}: Altura de ola superada por 12 hrs. en un año.

T_S: Periodo significante del oleaje.

La altura superada 12 horas en un año está asociada a la siguiente probabilidad de excedencia:

Pexc= 12 hr / (365 días x 24 hr/día) x 100 = 0.137 %.

Para la determinación de la altura de oleaje superada 12 horas en un año (*Pexc 0.137%*), se utilizaron los datos de oleaje en la zona cercana al área de estudio, los cuales están asociados a una probabilidad de excedencia.

Del análisis gráfico (Figura 74), se determinó que la altura de ola superada 12 horas al año es de 2.54 m, con un periodo asociado a 17 segundos. Aplicando la formulación antes presentada, se obtiene que la profundidad de cierre es de 4.31 m, referida al nivel medio del mar (NMM). De acuerdo a los antecedentes de marea, el nivel medio del mar que se presenta en el sector es +0.65 mNRS, por lo que la profundidad de cierre se asocia a una cota de -3.66 mNRS, ubicada a una distancia aproximada de 105 m de la costa (Figura 75).

Figura 74: Probabilidad de excedencia de altura de oleaje en zona cercana.
(Fuente: Elaboración propia)

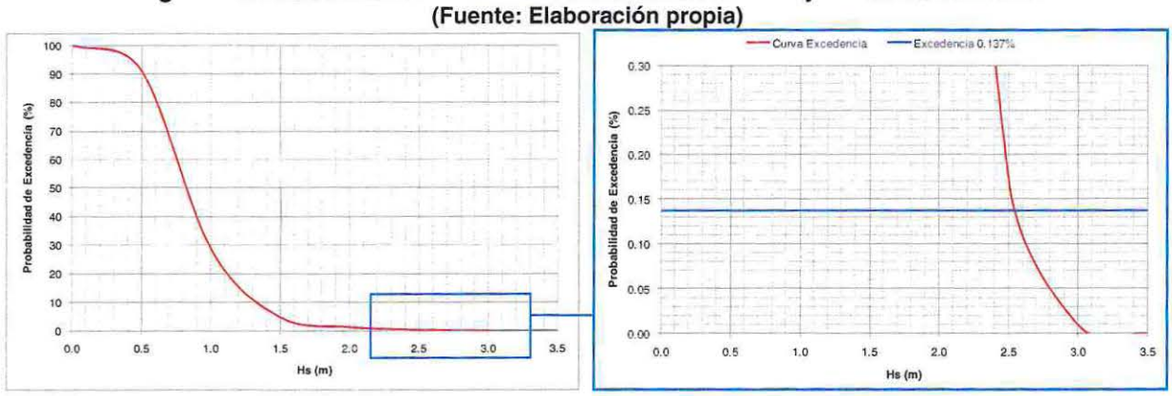
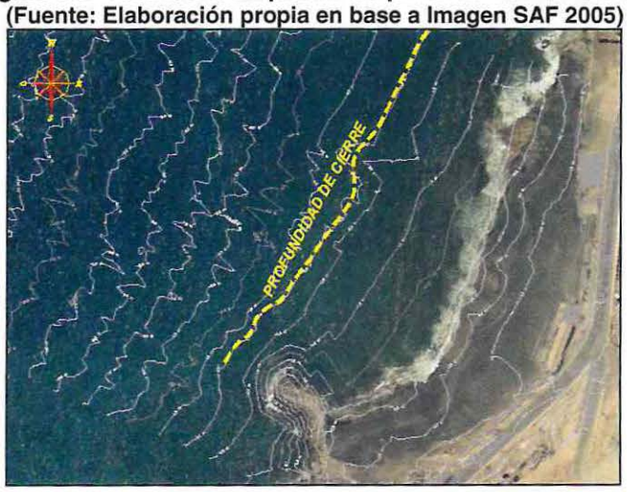


Figura 75: Ubicación en planta de profundidad de cierre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



7.4.2.3 FORMA DEL PERFIL DE EQUILIBRIO ACTUAL

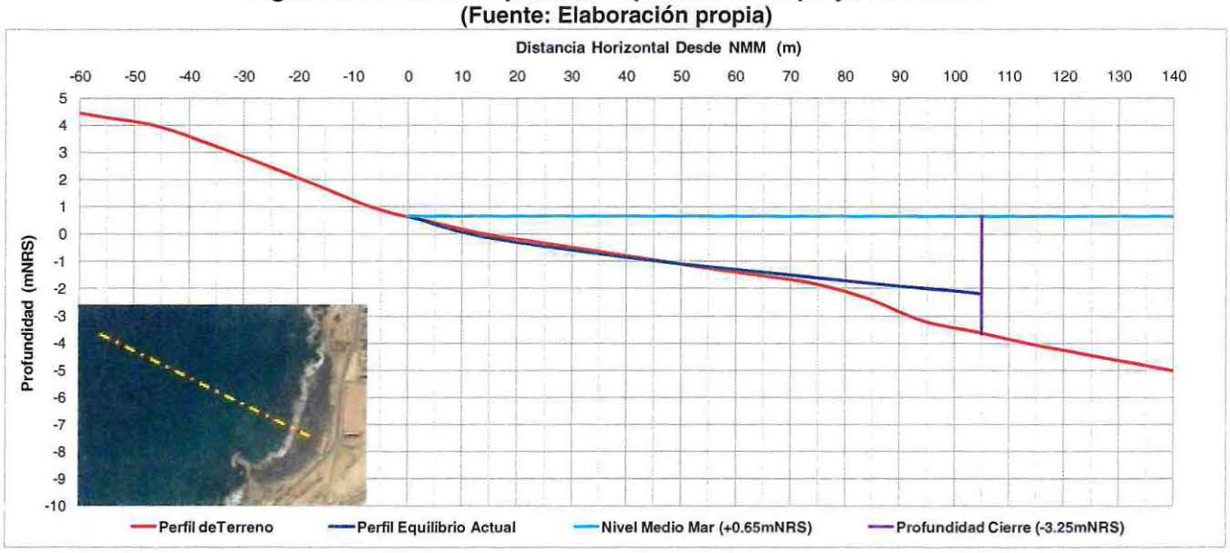
En la siguiente Tabla se presentan las dimensiones del perfil de equilibrio actual, que tendría la playa El Salitre.

Tabla 17: Dimensiones del perfil de equilibrio.
(Fuente: Elaboración propia)

Distancia X (m)	Profundidad h	
	mNMM	mNRS
0	0	0.65
10	-0.59	0.06
20	-0.94	-0.29
30	-1.23	-0.58
40	-1.50	-0.85
50	-1.74	-1.09
60	-1.96	-1.31
70	-2.17	-1.52
80	-2.37	-1.72
90	-2.57	-1.92
100	-2.76	-2.11
105	-2.85	-2.20

Al comparar la forma del perfil de equilibrio propuesto por Dean con el perfil actual de la playa, se detecta que en los primeros 70 m, el perfil teórico representa de forma adecuada la forma la geometría del fondo marino, si bien existen diferencias, éstas son despreciables. Es importante mencionar que en el tramo final (entre los 70 m y la profundidad de cierre), el perfil teórico no se ajusta a las condiciones actuales del fondo marino, lo que puede estar asociado a que la profundidad de cierre podría estar más cercana a la costa (Figura 76).

Figura 76: Forma del perfil de equilibrio de la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia)



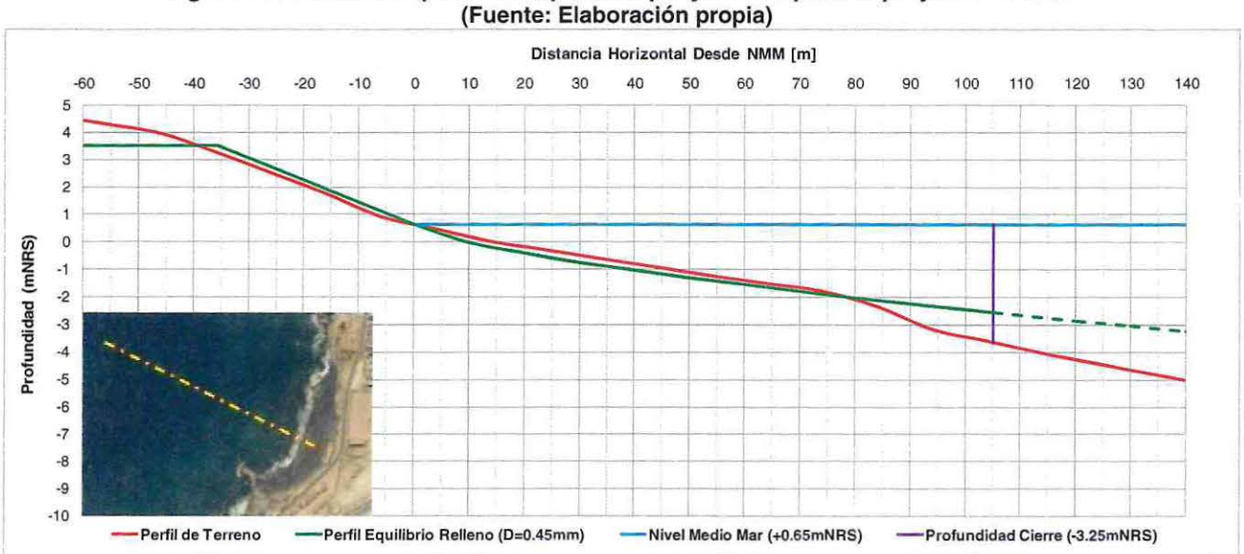
7.4.2.4 FORMA DEL PERFIL DE EQUILIBRIO PROYECTADO

A continuación se presenta la forma y dimensiones del perfil de equilibrio utilizando las arenas limpias, las cuales poseen un diámetro promedio de 0.45 mm.

Tabla 18: Profundidades del perfil de equilibrio proyectado.
(Fuente: Elaboración propia)

Distancia X (m)	Profundidad h	
	(mNMM)	(mNRS)
0	0	0.65
10	-0.67	-0.02
20	-1.06	-0.41
30	-1.39	-0.74
40	-1.69	-1.04
50	-1.96	-1.31
60	-2.21	-1.56
70	-2.45	-1.80
80	-2.68	-2.03
96	-3.03	-2.38
100	-3.11	-2.46
110	-3.32	-2.67
120	-3.51	-2.86
130	-3.71	-3.06
140	-3.89	-3.24

Figura 77: Forma del perfil de equilibrio proyectado para la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia)



Se observa que el perfil de equilibrio generado con las arenas limpias, adoptaría una forma similar al perfil de fondo marino existente. Sin embargo, en el tramo final, el perfil teórico no se apoya en el fondo marino, por lo que sería recomendable considerar una obra sumergida para permitir la estabilidad de la nueva playa. Para evitar posibles fugas de sedimentos, se recomienda incluir al interior del rompeolas sumergido un geotextil para contener los sedimentos.

7.5 CONFIGURACIÓN PROPUESTA

La configuración de playa propuesta tendría una superficie total de 21,085 m^2, donde 10,356 m^2 corresponden a superficie de agua y 16,729 m^2 a superficie seca. Respeto a las dimensiones, la playa tendría un largo aproximado de 250 m y un ancho máximo en el sector central de 62 m, alcanzando en este sector una profundidad máxima de 2.0 m en baja marea.

Es importante mencionar que la configuración propuesta modifica la orientación actual de la playa, generando en el sector sur un espacio mayor de playa, el cual se aprovecha para ampliar las obras terrestres del proyecto de borde costero del MINVU.

En la siguiente Figura se muestra la configuración de playa propuesta, incluyendo el borde del proyecto de obras terrestres:

Figura 78: Configuración de playa propuesta.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

CAPÍTULO VIII

8. VOLÚMENES DE ARENAS A MANEJAR

En el presente capítulo se realiza una estimación de los volúmenes de arenas contaminadas que se podrían manejar en la playa El Salitre, ya sea al considerar la extracción de todas las arenas que se encuentran actualmente en la playa, o bien al considerar sólo la extracción de las arenas que se intervienen con el proyecto de playa artificial. Además para la situación con proyecto, se analizan alternativas de extracción parcial de arenas.

8.1 VOLUMEN TOTAL DE ARENAS A EXTRAER EN LA PLAYA

La determinación del volumen total de arenas que se encuentran en la playa, se realiza en base a los resultados de estudios de las lanzas de agua (Ref.10) y calicatas (Ref.22), los cuales fueron ejecutados durante el desarrollo del proyecto de diseño de la playa artificial. En la presente memoria estos estudios se consideraron como complementarios, ya que con sus resultados se podrá estimar el espesor de la capa de arena que se encuentra depositada en el sitio de estudio.

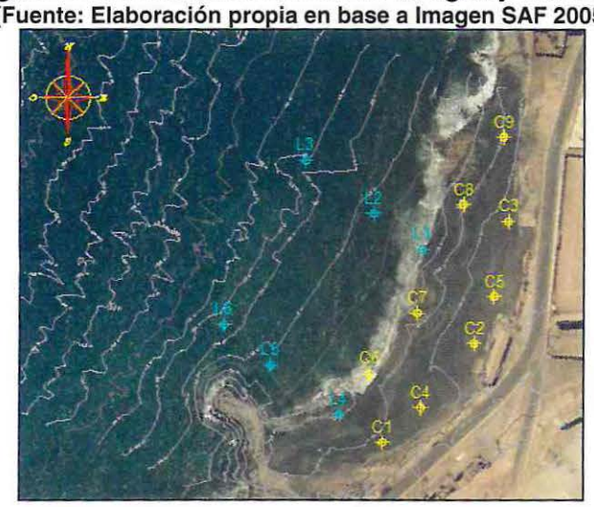
8.1.1 RESULTADOS DE ESTUDIOS COMPLEMENTRIOS

Durante la ejecución del proyecto de diseño, se realizaron seis lanzas de agua y nueve calicatas exploratorias, tres de ellas tenían como propósito la caracterización del suelo de fundación para el diseño de las obras terrestres, mientras que las restantes se efectuaron con el objeto de determinar el espesor de la capa de arena existente, y así complementar los resultados de las lanzas de agua.

En la Figura 79 se presenta la ubicación de las calicatas y lanzas de agua.

- L1, L2, L3, L4, L5 y L6: Lanzas de agua.
- C1, C2 y C3: Calicatas para caracterizar el suelo de fundación.
- C4, C5, C6, C7, C8, C9: Calicatas para determinar la profundidad de la roca.

Figura 79: Ubicación de las lanzas de agua y calicatas.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



Como se mencionó anteriormente, en las calicatas complementarias se tomaron muestras de arenas con el objeto analizar la calidad ambiental de los sedimentos profundos, cuyos resultados arrojaron similares concentraciones de metales pesados que las arenas superficiales.

Tabla 19: Coordenadas de ubicación de lanzas de agua y calicatas (UTM).
(Fuente: Elaboración propia)

	Este	Norte
L-1	376,401.42	7,557,008.46
L-2	376,367.69	7,557,034.03
L-3	376,320.39	7,557,071.48
L-4	376,344.15	7,556,892.99
L-5	376,296.30	7,556,927.36
L-6	376,263.98	7,556,955.71
C-1	376,374.10	7,556,873.20
C-2	376,437.40	7,556,942.50
C-3	376,460.80	7,557,028.50
C-4	376,400.60	7,556,897.70
C-5	376,451.20	7,556,975.50
C-6	376,364.90	7,556,921.30
C-7	376,397.90	7,556,963.80
C-8	376,429.70	7,557,040.50
C-9	376,457.40	7,557,088.10

En la siguiente Tabla se presentan los resultados de estratos obtenidos de las lanzas de agua y de la estratigráfica de cada calicata, obteniendo la profundidad a la roca en cada estación:

Tabla 20: Profundidad a la roca obtenida en las lanzas de agua y calicatas.
(Fuente: Elaboración propia)

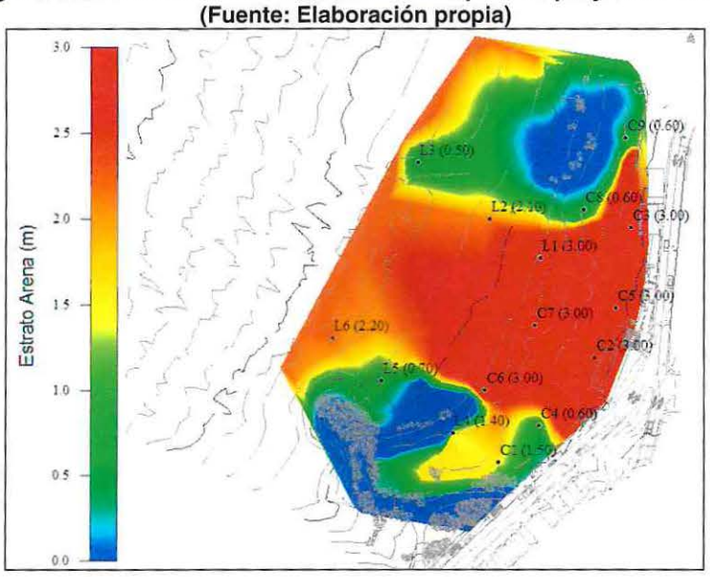
	Cota Terreno (mNRS)	Cota Roca (mNRS)	Estrato Arena (m)
L-1	1.30	-1.70	3.00
L-2	-0.55	-2.65	2.10
L-3	-2.75	-3.25	0.50
L-4	1.80	0.40	1.40
L-5	-1.00	-1.70	0.70
L-6	-2.50	-4.70	2.20
C-1	3.30	1.80	1.50
C-2*	4.40	1.40	3.00
C-3*	4.50	1.50	3.00
C-4	3.70	3.10	0.60
C-5*	4.30	1.30	3.00
C-6	2.00	-1.00	3.00
C-7	2.40	-0.60	3.00
C-8	3.00	2.40	0.60
C-9	3.00	2.40	0.60

(*) Para las calicatas C2, C3 y C5, se asume el máximo estrato de arena encontrado (3.0 m), ya que a los 2.5 m, profundidad de las calicatas, no se llegó a la roca.

En base a los resultados de los estratos de arenas y la información de ubicación de los afloramientos rocosos, extraídos de la imagen SAF 2005 de Tocopilla, se realizó una interpolación con el software Global Mapper para estimar la distribución en planta de los estratos de arenas.

En la Figura 80, se observa que los mayores estratos de arenas se presentan en la berma de la playa, alcanzando los 3.0 m de espesor, disminuyendo hacia el mar y en los sectores donde se encuentran los afloramientos rocosos.

Figura 80: Estratos de arenas estimados para la playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia)



8.1.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE ARENAS

Definida la distribución en planta de los estratos de arena, la estimación del volumen total de arenas que se encuentra en la playa, se realiza multiplicando la superficie del estrato por su respectivo espesor.

Figura 81: Superficies de estratos de arena de playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

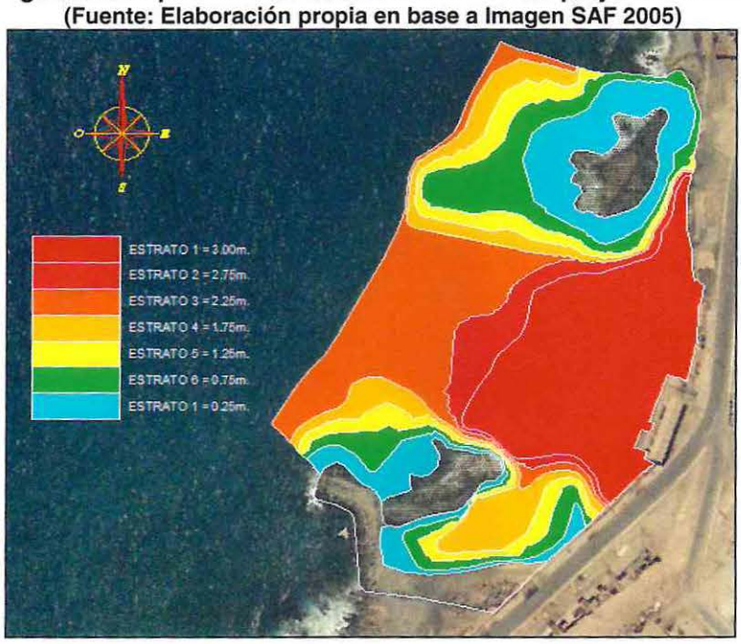


Tabla 21: Superficies y volúmenes de estratos de arenas.
(Fuente: Elaboración propia)

Estrato	Espesor (m)	Superficie (m^2)	Volumen (m^3)
E1	3.00	11,733	35,199
E2	2.75	2,649	7,285
E3	2.25	8,615	19,384
E4	1.75	4,864	8,512
E5	1.25	3,852	4,815
E6	0.75	5,586	4,190
E7	0.25	6,301	1,575
		Total	***80,959***

De acuerdo a los cálculos efectuados, se estima que la playa El Salitre posee un volumen total de de 80,959 m^3 de arenas contaminadas, repartidos en una superficie total de 47,303 m^2.

8.2 VOLUMEN TOTAL DE ARENAS A EXTRAER CON PROYECTO

El volumen total de las arenas que se intervienen y que se deberían extraer en el proyecto de playa artificial, se determina mediante la superposición de los estratos de arenas, determinados en el capítulo anterior, con la configuración de playa artificial analizada.

Se determinó que el volumen total de arenas que se deberían extraer en el proyecto de playa artificial sería de 57,711 m^3.

Figura 82: Estimación en planta de estratos de arena con proyecto.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

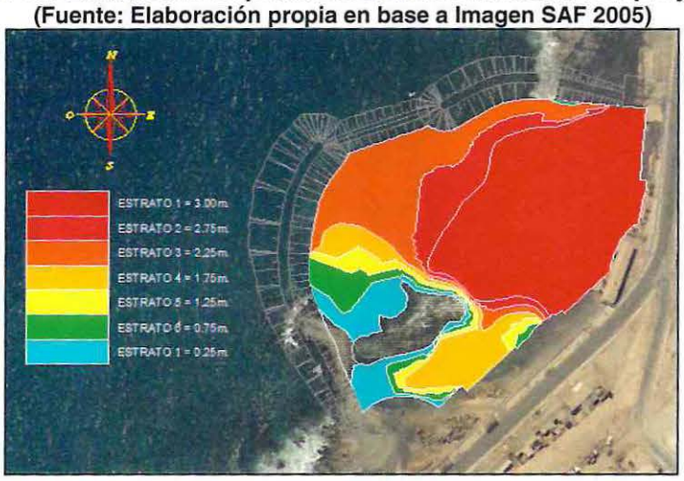


Tabla 22: Superficies y volúmenes de estratos de arenas con proyecto.
(Fuente: Elaboración propia)

Estrato	Espesor (m)	Superficie (m^2)	Volumen (m^3)
E1	3.00	10,931	32,793
E2	2.75	2,347	6,454
E3	2.25	5,076	11,421
E4	1.75	2,475	4,331
E5	1.25	978	1,223
E6	0.75	1,341	1,006
E7	0.25	1,931	483
		Total	***57,711***

8.3 ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN PARCIAL DE ARENAS

Los elevados volúmenes de arenas contaminadas que se obtuvieron para la extracción de todas las arenas de la playa e incluso sólo al considerar la extracción de las arenas que se intervendrían con el proyecto de playa artificial, puede generar que el proyecto de resulte ambiental y económicamente inviable.

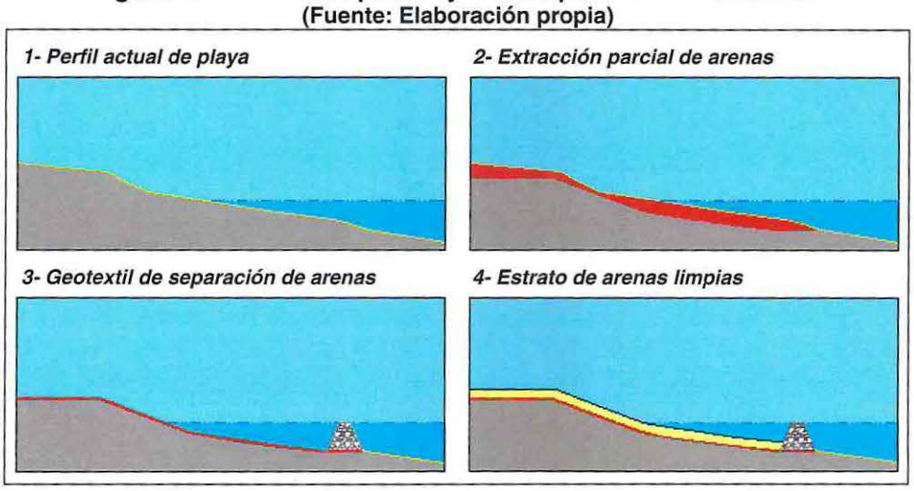
Con el objeto de revertir lo anteriormente expuesto, se analizan alternativas de extracción parcial de arenas, las cuales buscan básicamente disminuir el volumen de arenas a extraer y a manejar. Estas alternativas consisten en extraer una parte de los sedimentos que se encuentran en la playa, para luego colocar sobre éstos un estrato de arenas limpias, las que se depositarán y distribuirán en toda la superficie de la playa artificial.

Considerando que los estratos de arenas limpias se depositan sobre la arena existente, al momento de realizar la extracción parcial de arenas, previo al depósito de las arenas limpias, se recomienda colocar un material que aísle las arenas existentes de las depositadas. Para ello se considera utilizar un geotextil de separación de arenas, que sea capaz de contener y confinar las arenas existentes, evitando que se mezclen las arenas limpias con las existentes y que los usuarios tengan contacto directo con las arenas contaminadas.

A continuación se presenta la secuencia de tareas a considerar para ejecutar las alternativas de extracción parcial:

1. Determinar el perfil de playa actual al momento de realizar la extracción de arenas.
2. Conocido el perfil de la playa, se procede a realizar la extracción parcial de arenas. El volumen de arenas a extraer dependerá directamente del estrato de arenas limpias a generar, ya que a medida que aumenta el espesor del estrato de las nuevas arenas, mayor será el volumen de arenas a extraer.
3. Extraído el sedimento requerido y nivelada la playa, se debe realizar la colocación del geotextil de separación de arenas.
4. Finalmente, sobre el geotextil de separación se procede a depositar la capa o estrato de arenas limpias.

Figura 83: Extracción parcial y relleno por estrato de arenas.
(Fuente: Elaboración propia)



8.3.1 VOLÚMENES DE ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN PARCIAL DE ARENAS

En el presente capítulo se determinan los volúmenes de extracción de arenas para cada alternativa de generación de estrato de arena. La estimación de los volúmenes de extracción se realiza utilizando el software AutoCad Civil 3D, el cual se construye en base al levantamiento topo-batimétrico y las curvas de extracción de cada alternativa analizada. En la siguiente Figura se muestran las superficies y volúmenes de extracción obtenidos de los modelos Civil para cada alternativa de extracción parcial.

Figura 84: Superficies y volúmenes de extracción para alternativas de extracción parcial.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

a) Extracción para estrato 2.0 m **b) Extracción para estrato 1.5 m** **c) Extracción para estrato 1.0 m**

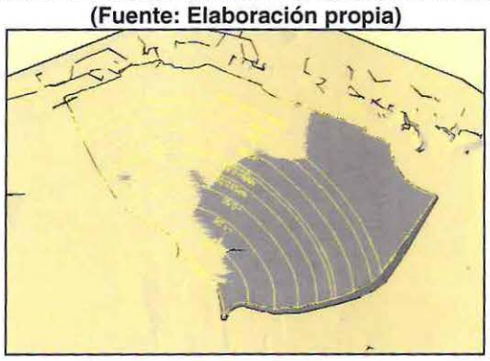
Tabla 23: Volúmenes de extracción parcial de arenas.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN (m^3)
Extracción Estrato 2.0 m	53,587
Extracción Estrato 1.5 m	41,175
Extracción Estrato 1.0 m	29,928

8.4 VOLUMEN DE ARENAS LIMPIAS DE RELLENO

Es importante tener presente que además de extraer los sedimentos totales o parciales que se intervienen con el proyecto de playa, se debe considerar el depósito de arenas limpias de relleno requeridas para el desarrollo de la nueva playa artificial. Los volúmenes de las nuevas arenas se determinan con el software AutoCad Civil 3D, y se calculan generando un modelo civil con la situación base de terreno con la situación de arena extraída, ya sea total o parcial, y luego se proyectan los niveles de la playa artificial propuesta.

Figura 85: Modelo civil 3D de arenas de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)



Es importante mencionar que el cálculo de los volúmenes de relleno requeridos en las alternativas de extracción parcial de arenas, se realiza en base a dos componentes.

- Volumen de relleno por nivelación: Una vez extraída la capa de arena requerida, por la orientación de la playa artificial, en el sector sur de la playa se genera un sector a rellenar para nivelar la playa.
- Volumen de relleno: Corresponde al volumen de arenas a depositar una vez que la playa se encuentre nivelada, hasta alcanzar los niveles de la playa proyectada.

En la siguiente Tabla se muestran los volúmenes de arenas de relleno requeridos para cada alternativa de extracción:

Tabla 24: Volúmenes de extracción parcial de arenas.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN	VOLUMEN DE RELLENO POR NIVELACIÓN (m^3)	VOLUMEN DE RELLENO PLAYA (m^3)	RELLENO TOTAL (m^3)
Extracción Total	0	92,972	92,972
Extracción Total Proyecto	0	69,724	69,724
Extracción Estrato 2.0 m	3,818	57,618	61,436
Extracción Estrato 1.5 m	6,356	43,049	49,405
Extracción Estrato 1.0 m	10,088	29,168	39,256

8.5 RESUMEN DE VOLÚMENES DE ARENAS A MANEJAR

En la siguiente Tabla se presenta el resumen de los volúmenes estimados de arenas a manejar, tanto de extracción de arenas como de arenas limpias de relleno requeridas para la generación de la playa artificial.

Tabla 25: Resumen de volúmenes de arenas a manejar.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN ARENAS (m^3)	VOLUMEN DE ARENAS DE RELLENO (m^3)
Extracción Total	80,959	92,972
Extracción Total Proyecto	57,711	69,724
Extracción Estrato 2.0 m	53,587	61,436
Extracción Estrato 1.5 m	41,175	49,405
Extracción Estrato 1.0 m	29,928	39,256

CAPÍTULO IX

9. MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS

9.1 ALTERNATIVAS DE MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS

Las elevadas concentraciones de metales pesados y los altos volúmenes de arenas que se encontraron en la playa El Salitre, generan una problemática ambiental compleja, teniendo que definir cuál sería el destino final o sector donde se deberán depositar las arenas contaminadas de la playa. Además de la problemática ambiental, se deben considerar los elevados costos que significaría el manejo de las arenas contaminadas (costos de extracción, traslado y depósito), teniendo presente que se deben incorporar los costos asociados por la colocación de las arenas limpias, lo que generaría que, sólo por concepto de arenas, el proyecto de playa artificial sea económicamente inviable.

Con el objeto de revertir lo anteriormente expuesto y a su vez contribuir al diseño de la playa artificial, en el presente capítulo se analizan alternativas de manejo de las arenas contaminadas, los que ayudará a solucionar, de alguna manera, los problemas ambientales que han afectado a la playa.

Se analizan tres alternativas de manejo para las arenas contaminadas: traslado de las arenas a una planta de tratamiento, vertido de las arenas en el mar y reutilización de las mismas en obras del proyecto de playa artificial y obras terrestres complementarias. Además se determinan los costos económicos que significaría su ejecución.

9.1.1 TRASLADO DE LAS ARENAS A UNA PLANTA DE TRATAMIENTO

Esta alternativa está relacionada con trasladar los sedimentos contaminados a un botadero autorizado en tierra, que cumpla con las normas ambientales vigentes, que sea seguro y que además tenga la capacidad de albergar los altos volúmenes de arenas detectados. Por lo anterior se considera como botadero autorizado una planta de tratamiento de residuos industriales.

En la región existen varias plantas de este tipo, entre las cuales destaca Hidronor Chile, ubicada en la ciudad de Antofagasta, la cual corresponde a una planta de tratamiento de residuos sólidos que provienen principalmente de la minería.

Figura 86: Planta de tratamiento Hidronor Chile.
(Fuente: Ref.18)

El tratamiento y disposición de las arenas contaminadas en una planta de tratamiento, genera ventajas ambientales importantes para el proyecto de playa artificial, ya que se evita contaminar un nuevo sector para habilitarlo como botadero.

De acuerdo a información presentada en la página web de Hidronor Chile (www.hidronor.cl), todas las Instalaciones de Hidronor Chile han sido sometidas al Sistema de evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y cuentan con las correspondientes Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) aprobadas.

La planta utiliza una técnica denominada estabilización-solidificación, que ha tenido un fuerte auge en los países industrializados por considerarse un tratamiento indispensable previo al confinamiento de los residuos tóxicos en un depósito de seguridad. Este proceso, conocido también bajo el nombre de Inertización, consiste en mezclar el residuo con diversos reactivos con el propósito de disminuir la superficie a través de la cual pueda tener lugar la transferencia o pérdida de los contaminantes; minimizar la velocidad de migración; limitar la solubilidad y reducir la toxicidad del residuo. El resultado es un sólido en cuya estructura cristalina quedan atrapados los contaminantes, lográndose de esta forma la transformación del residuo en una sustancia terrosa, física y químicamente estable e inerte, y no perjudicial para el medioambiente.

De acuerdo a lo indicado por Hidronor Chile, se debe tener presente que el trasporte del material debe cumplir estrictamente lo indicado en el Decreto Supremo 298/95, relacionado con el traslado de residuos.

Figura 87: Vehículos de Hidronor para el transporte de residuos.
(Fuente: Ref.19)

9.1.2 VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR

En este capítulo se analiza la alternativa de extraer las arenas de la playa y verterlas en el mar, a través de un procedo de dragado de sedimentos.

Actualmente existe una variedad de equipos de dragados, agrupados en dos grandes grupos, las dragas mecánicas y las dragas de succión, extrayendo el material en forma estacionaria o en marcha. Considerando que el proyecto de playa Artificial corresponde a una iniciativa pública, para el análisis de dragado y vertido del material se considerará la utilización de la draga Ernesto Pinto perteneciente a la Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas, cuya construcción nacional data del año 1975.

La draga Ernesto Pinto es una draga de succión, que extrae el material en marcha o de forma estacionaria, es autopropulsada, con cántara y provista de una grúa con pala almeja.

Figura 88: Draga Ernesto Pinto.
(Fuente: MOP-DOP)

A continuación se presentan las características generales de la draga Ernesto Pinto:

Tabla 26: Características generales draga Ernesto Pinto.
(Fuente: MOP-DOP)

Tipo	*Draga de succión en marcha y estacionaria.*
Año de Construcción	*1975 en Valdivia*
Dimensiones	*Eslora 51,1 m* *Manga 12,0 m* *Puntal 4,6 m* *Calado máximo 4,0 m*
Propulsión	*Dos motores diesel Caterpillar de 565 HP a 1.500 RPM*
Planta de Energía	*Dos generadores principales de 150 KVA cada uno. Un generador auxiliar o de puerto de 50 KVA.*
Acomodaciones	*Completas para 20 personas*
Dotación de Trabajo	*17 oficiales y tripulantes*
Puerto Base	*Valdivia*

Tabla 27: Componentes del sistema de dragado de draga Ernesto Pinto.
(Fuente: MOP-DOP)

Bomba de Succión	*Centrífuga, marca IHC, modelo 500 S, con gasto de 3.000 m3/hr*
Motor de Accionamiento	*Diesel Caterpillar de 565 HP a 1.500 RPM*
Succión del Material	*Tubo de succión de 500 mm de diámetro, con cabezal IHC estándar.*
Descarga del Material	*A cántara propia de 640 m3 de capacidad o por tubería flotante de 500 mm de diámetro, hasta 500 m de distancia al botadero*
Grúa Hidráulica	*Capacidad máxima 11 ton*
Radio Máximo de Giro	*14 m*
Capacidad de Cuchara Almeja	*3,1 m3*

9.1.2.1 CLASIFICACION DE ARENAS PARA VERTIDO EN EL MAR

De acuerdo a las recomendaciones para la gestión del material dragado en los puertos españoles (*CEDEX* 1994), descritas en Cap.3.2.3.2, en la siguiente Tabla se muestran los rangos de concentraciones de metales pesados para cada categoría definidas en estas recomendaciones.

Tabla 28: Rangos de clasificación de material dragado (*CEDEX* 1994).
(Fuente: Elaboración propia)

CEDEX 1994 (España)	Concentraciones (mg/Kg)						
	Arsénico	Cadmio	Cobre	Zinc	Mercurio	Plomo	Cromo
Categoría I	< 80	< 1	< 100	< 500	< 0.6	< 120	< 200
Categoría II	80 - 200	1 - 5	100 - 400	500 - 3000	0.6 - 3	120 - 600	200 - 1000
Categoría III a	200 - 1600	5 - 40	400 - 3200	3000 - 24000	3 - 24	600 - 4800	1000 - 8000
Categoría III b	> 1600	> 40	> 3200	> 24000	> 24	> 4800	> 8000

Para cada categoría en que se clasifica el material dragado, estas recomendaciones presentan las siguientes acciones a seguir:

- Categoría I: Los materiales de esta categoría podrán verterse libremente en el mar.
- Categoría II: Se podrán verter de al mar de forma contralada según los términos previstos en las recomendaciones.
- Categoría III: Si el vertido al mar es la opción más desfavorable, se recomienda realizar el vertido en tierra. Caso contrario, se deberán realizar estudios ambientales y solicitar una autorización especial para el vertido.

En base a las concentraciones máximas y medias de metales pesados obtenidos en la playa, en la Tabla 29 se muestra la clasificación de categoría para cada metal pesado.

Tabla 29: Rangos de clasificación de material dragado (*CEDEX* 1994).
(Fuente: Elaboración propia)

	Concentraciones de Metales Pesados (mg/Kg)						
	Arsénico	Cadmio	Cobre	Zinc	Mercurio	Plomo	Cromo
Concentraciones Medias	2.6	0.3	5,823	2,328	0.1	19.3	20.6
Concentraciones Máximas	3.1	0.5	10,390	4,338	0.2	34.9	30.2
	Categoría de las Arenas Según Concentraciones Medias						
Categoría I	SI	SI	-	-	SI	SI	SI
Categoría II	-	-	-	SI	-	-	-
Categoría IIIa	-	-	-	-	-	-	-
Categoría IIIb	-	-	SI	-	-	-	-
	Categoría de las Arenas Según Concentraciones Máximas						
Categoría I	SI	SI	-	-	SI	SI	SI
Categoría II	-	-	-	-	-	-	-
Categoría IIIa	-	-	-	SI	-	-	-
Categoría IIIb	-	-	SI	-	-	-	-

De la Tabla anterior se puede inferir que por las elevadas concentraciones de Cobre y Zinc, las arenas de la playa El Salitre se clasificarían en la Categoría IIIa y IIIb. Es importante mencionar y destacar que las concentraciones de los demás metales pesados, las arenas se clasificarían en la Categoría I.

En la Figura 89 se observa que en la mayoría de las estaciones de muestro, las concentraciones de Cobre clasifican a las arenas en la Categoría IIIb, con excepción de las estaciones 11 y 12, estaciones que se ubican en el fondo marino, alejadas de la playa. Respecto a las concentraciones de Zinc (Figura 90), en tres estaciones muestreo las arenas se clasifican en la categoría IIIb y en el resto de las estaciones las arenas se clasifican en la categoría II.

Figura 89: Clasificación del material dragado en base a concentraciones de Cobre.
(Fuente: Elaboración propia)

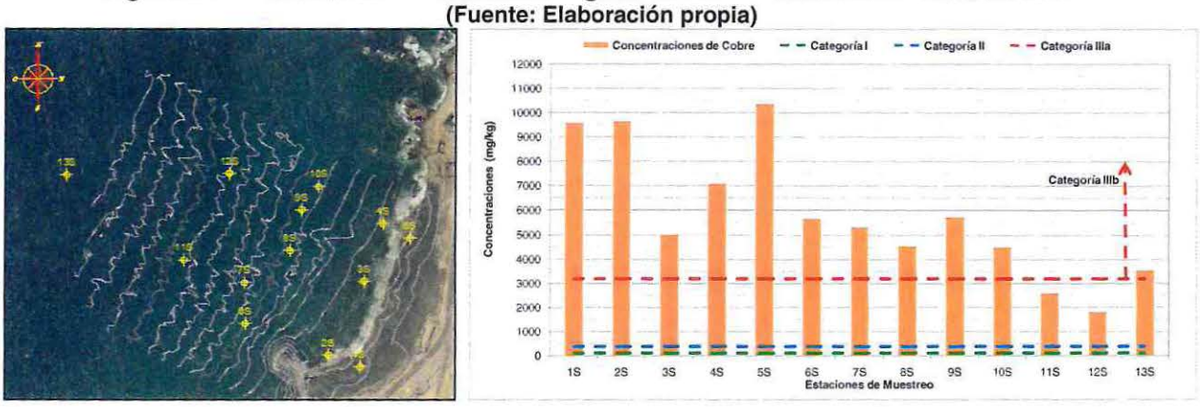
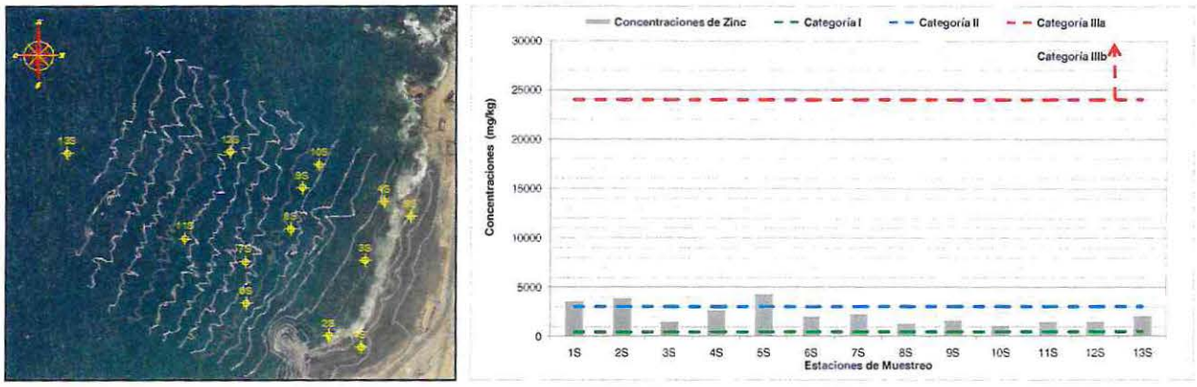


Figura 90: Clasificación del material dragado en base a concentraciones de Zinc.
(Fuente: Elaboración propia)



De acuerdo a lo indicado en las recomendaciones españolas (*CEDEX* 1994), por las elevadas concentraciones de Cobre y Zinc, no sería recomendable verter las arenas de la playa en el mar, ya que sería la opción más desfavorable, teniendo que realizar el vertido en tierra. En el caso de que la opción de verter las arenas en tierra sea más desfavorable, es recomendable realizar estudios ambientales y planes de vigilancia para poder realizar el vertido en el mar.

9.1.3 REUTILIZACIÓN DE LAS ARENAS

En el presente capítulo se analizan alternativas para reutilizar las arenas contaminadas en obras del proyecto de playa artificial y en las obras terrestres del paseo costero (Ref.14). Al reutilizar las arenas en obras del mismo proyecto, se genera una ventaja económica y principalmente se obtiene una ventaja ambiental importante, evitando contaminar otro sector para depositar las arenas.

A continuación se describen y analizan técnicamente las alternativas para reutilizar las arenas contaminadas:

9.1.3.1 REUTILIZACIÓN DE ARENAS EN NIVELACIÓN DE LA PLAYA

Con la nueva orientación propuesta para la playa El Salitre, en las alternativas de extracción parcial, las arenas a extraer se ubican en el sector norte, generándose en el sector sur una zona que puede ser rellenada y nivelada con las arenas de la misma playa.

La configuración de playa artificial modifica la orientación actual de la playa en aproximadamente 40° hacia el norte, y como se mencionó anteriormente, en el sector sur se genera una zona que puede ser rellenada con las arenas existentes, nivelando la playa para posteriormente depositar las arenas limpias.

Para cada alternativa de extracción parcial de arenas, la zona de nivelación o de depósito, se modifica tanto en superficie como en volumen, lo que depende directamente de la cantidad de arenas a extraer, a medida que aumenta el volumen de arenas a extraer, disminuye el volumen de arenas a depositar en esta zona.

La zona para depositar las arenas se obtiene mediante la intersección de las curvas de extracción con las curvas topo-batimétricas actuales de la playa. La superficie y los volúmenes de relleno a depositar en la zona, se obtienen mediante la utilización del software AutoCad Civil 3D.

A continuación se presenta de forma gráfica los sectores y superficies a rellenar para cada alternativa de extracción parcial de arenas.

Figura 91: Nivelación playa para alternativas de extracción.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

a) Nivelación para estrato 2.0 m **b) Nivelación para estrato 1.5 m** **c) Nivelación para estrato 1.0 m**

En la siguiente Tabla se presentan los volúmenes requeridos para realizar el relleno y nivelación de la playa.

Figura 92: Superficies y volúmenes de nivelación para alternativas de extracción parcial.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	SUPERFICIE NIVELACION (m^2)	VOLUMEN NIVELACIÓN (m^3)
Extracción Estrato 2.0 m	3,841	3,818
Extracción Estrato 1.5 m	5,422	6,356
Extracción Estrato 1.0 m	7,978	10,088

Como se mencionó con anterioridad, al momento de realizar la nivelación de la playa, previo al depósito de las arenas limpias, se recomienda colocar un material que aísle las arenas existentes de las arenas de relleno. Para ello se considera utilizar un geotextil de separación, el cual cubrirá las arenas niveladas, lo que evitará que se mezclen las arenas nuevas con las existentes y que los usuarios tengan contacto directo con las arenas contaminadas.

Figura 93: Superficie de playa a cubrir con geotextil de separación.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

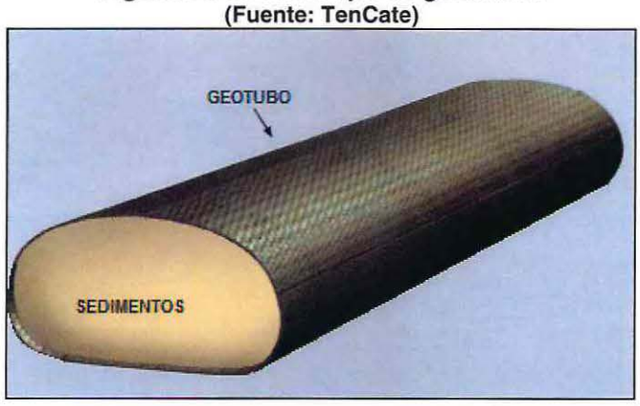
9.1.3.2 REUTILIZACIÓN DE ARENAS EN ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE GEOTUBOS

La mayoría de los rompeolas en talud se configuran con un núcleo compuesto por rocas de desmonte o desecho de cantera. Considerando la cantidad de material que se podría reutilizar, se analiza la alternativa de generar los rompeolas de la playa artificial con un núcleo conformado por geotubos rellenos con arenas (Ref.14).

9.1.3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS GEOTUBOS

Los geotubos corresponden a mangas circulares que se rellenan con sedimentos, en este caso se rellenarían con las arenas existentes en la playa, ya que una de las mayores aplicaciones de los geotubos es el confinamiento y consolidación de sedimentos contaminados en su interior. Lo que ayudará además a disminuir los costos de traslado de las arenas a un botadero.

Figura 94: Sección tipo de geotubos.
(Fuente: TenCate)



La información general, las características técnicas y geométricas de los geotubos a considerar en los núcleos de los rompeolas, fue proporcionada por la empresa TenCate, empresa que desarrolla la tecnología de confinamiento y consolidaciones de sedimentos a través de geotubos. De acuerdo a información presentada por la empresa TenCate, es importante destacar lo siguiente:

"El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos específica que actualmente el uso de los geotubos es la mejor practica para el manejo y drenaje de materiales marinos contaminados".

"Cientos de miles de metros cúbicos se sedimentos contaminados han sido dragados, confinados y drenados con éxito en instalaciones de muelles, puertos y fondos de ríos durante la última década".

9.1.3.2.1.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS GEOTUBOS

- Confinamiento: Los geotubos pueden ser llenados con sedimentos de grano fino, suelos contaminados o descargas de dragados. El tejido único y la fabricación del geotextil crean pequeños poros, los cuales permiten que pase sólo el agua por sus paredes, sin embargo retienen adecuadamente el material de llenado.
- Drenaje: El exceso de agua se drena fuera del geotubo a través de los poros pequeños del geotextil, resultando un drenaje efectivo y una reducción del volumen contenido, lo que permite que el geotubo sea llenado varias veces.
- Consolidación: Después del ciclo final del llenado y drenaje, los materiales finos contenidos continúan su consolidación por desecación, pues el vapor de agua residual sale a través del geotextil.

Figura 95: Funcionamiento de los geotubos.
(Fuente: TenCate)

El proceso de llenado de los geotubos se puede realizar dragando el material mediante medios hidráulicos o mecánicos, para luego ser bombeado a los geotubos para su posterior consolidación.

Figura 96: Extracción y llenado de geotubos con sedimentos contaminados.
(Fuente: TenCate)

9.1.3.2.1.2 MATERIALIDAD DE LOS GEOTUBOS

Los geotubos son fabricados a partir de un textil especialmente diseñado para aplicaciones marítimas, para ello en la fabricación la tela está diseñada para:

- Retención del material de llenado.
- Resistencia de las presiones de llenado.
- Resistencia a las fuerzas de abrasión durante las operaciones de llenado.
- Sobrevivir a los procesos de instalación.
- Resistencia al punzonamiento y al rasgado.
- Resistencia a la luz ultravioleta.

El geotextil utilizado para la fabricación de los geotubos se compone de fibras monofilamento de polipropileno de alta tenacidad, las cuales están tejidas en una red estable, de manera que mantengan su posición relativa. El material es inerte a la degradación biológica y resistente al ataque de productos químicos, sales solubles y ácidos que están normalmente presentes en el medio ambiente.

A continuación se presentan las características técnicas del geotextil que se utiliza para la fabricación de los geotubos:

Tabla 30: Características técnicas del geotextil utilizado para los geotubos. (Fuente: TenCate)

Propiedades Mecánicas	Prueba de Ensayo	Unidad	Valor Promedio Mínimo por Rollo	
			MD	CD
Método de Tira Ancha – Resist. a la Tensión (Última)	ASTM D 4595	kN/m (lbs/in)	175 (1000)	175 (1000)
Método de Tira Ancha - Elongación	ASTM D 4595	%	20 (max.)	20 (max.)
Resistencia a la Costura de Fábrica	ASTM D 4884	kN/m (lbs/in)	87.6 (500)	
Tamaño de Abertura Aparente (AOS)	ASTM D 4751	mm (U.S. Sieve)	0.600 (30)	
Rata de Flujo de Agua	ASTM D 4491	l/min/m^2 (gal/min/ft^2)	813 (20)	
Masa/Unidad de Area	ASTM D 5261	g/m2 (oz/yd2)	1117 (33) (Valor Típico)	
Resistencia UV (Resistencia Retenida a 500hrs)	ASTM D 4355*	%	85	

** Gran duración aun en condiciones extremas de exposición a los rayos UV, 85 % del valor retenido de las propiedades físicas y mecánicas del geotextil después de la exposición acelerada al UV de 500 horas según ASTM 4355.*

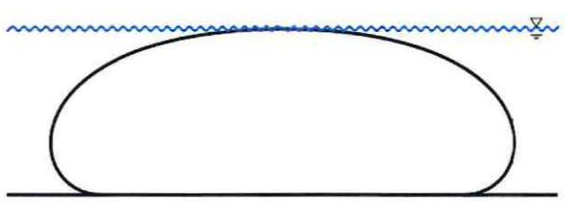
9.1.3.2.1.3 ESTABILIDAD DE LOS GEOTUBOS

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, para garantizar la estabilidad de los geotubos, la relación entre la altura y la base debe ser menor a 0.50.

El diseño y cálculo de los geotubos que se utilizaron para los rompeolas de la playa artificial, fue realizado por la empresa TenCate, atreves de su software *Geotube® Simulator™*, el cual se utiliza para el diseño geométrico de los geotubos y para calcular los esfuerzos a los que estará sometida la estructura durante el llenado e instalación.

Tabla 31: Sofware TenCate para cálculo de geotubos. (Fuente: TenCate)

Geotube® Simulator
Cross Section



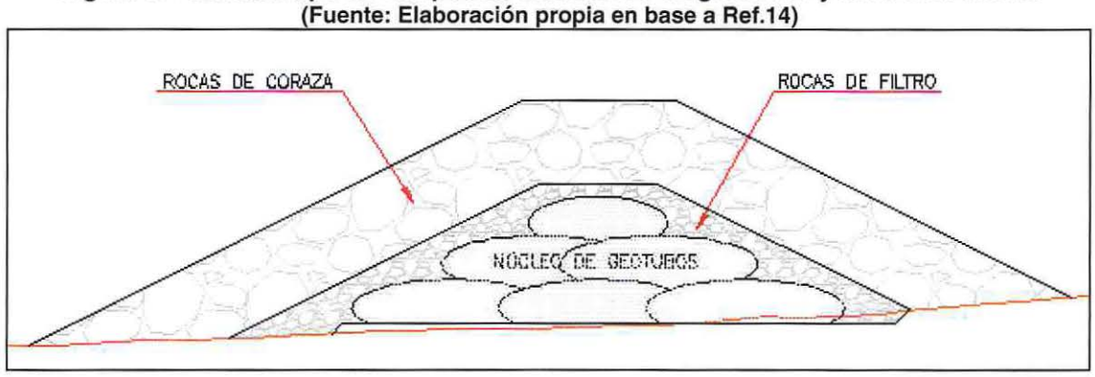
Units:	Metric		Maximum Tensile Force (T) =	4,83	kN/m
Water Level:	Submerged		Geotube® Base Contact Width (B) =	3,01	m
Geotube® Height (H) =	1,45	m	Geotube® Filled Width (W) =	3,82	m
Geotube® Circumference (C) =	9,1	m	Geotube® Cross Section Area (A) =	4,74	sq m
Specific Gravity of Fill Material (SGinf) =	1,8	sg	Geotube® Volume Per Unit of Length (V) =	4,74	cu m/m
Geotube® Fabric Type:	GT1000M		Factor of Safety =	18,1	FS

9.1.3.2.2 SECCIÓN TIPO ROMPEOLAS PROPUESTO

Además de las capacidades resistivas del material con que se fabrican los geotubos, sobre éstos se considera colocar rocas de filtro y de coraza, asegurando que los geotubos no queden expuestos a las condiciones ambientales ni humanas, evitando que sufran daños y se filtre el material contaminado hacia el exterior. Además sobre los geotubos se coloca un geotextil grueso que los cubrirá y los protegerá de las rocas de filtro y coraza.

El enrocado de filtro tiene por objeto mejorar la estabilidad global del rompeolas, principalmente la estabilidad de los elementos de coraza, el cual permitirá tener un mayor roce entre los enrocados.

Figura 97: Sección tipo de rompeolas con núcleo de geotubos y coraza de rocas.
(Fuente: Elaboración propia en base a Ref.14)



La solución de generar las obras de abrigo con un núcleo de geotubos y con coraza de rocas, fue aplicada en el proyecto de la Marina Stella Maris, Ecuador 2003.

Figura 98: Construcción rompeolas con núcleo de geotubos y coraza de rocas.
(Fuente: TenCate)

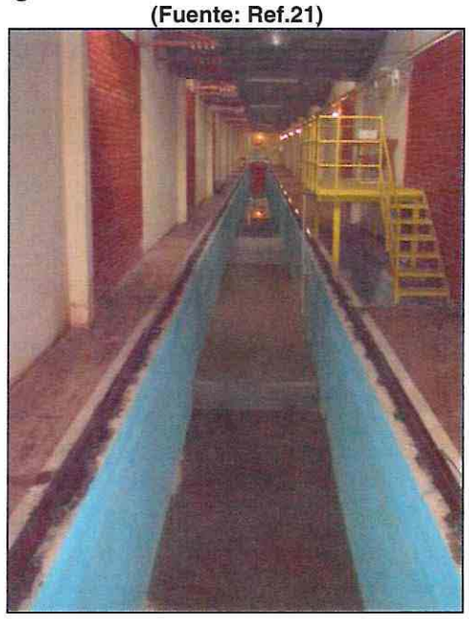
Figura 99: Marina Stella Maris.
(Fuente: TenCate)

9.1.3.2.3 MODELACIÓN FÍSICA DE SECCIÓN DE ROMPEOLAS

Con el objeto de evaluar la estabilidad de las obras de abrigo, en el proyecto de diseño de la playa artificial El Salitre, se encargó al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) efectuar modelaciones físicas bidimensionales (Ref.21), estudiando la estabilidad de la sección trasversal de los rompeolas, verificando el peso de los elementos, taludes, cotas y anchos de coronamiento.

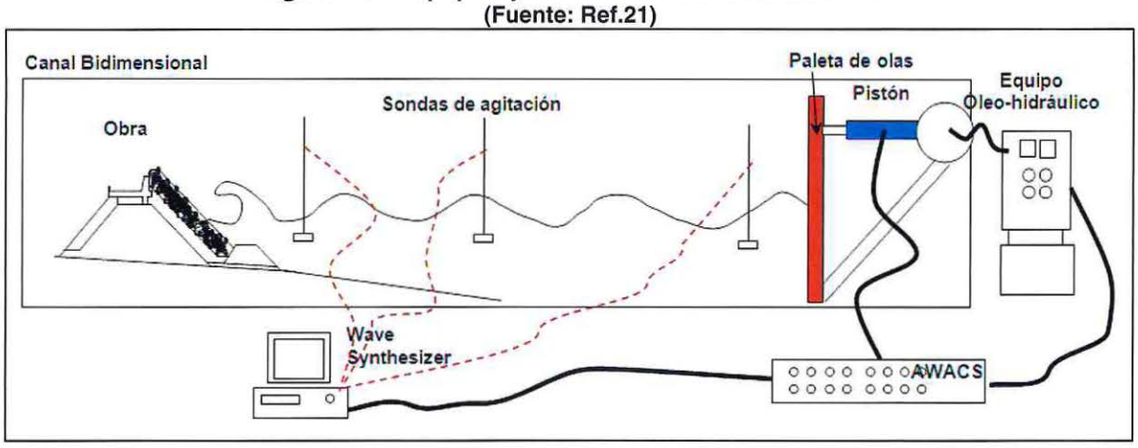
Las modelaciones físicas se efectuaron en el canal bidimensional del INH, el cual es de una estructura de Hormigón armado de sección cuadrada, con dimensiones de 1.55 m x 1.55 m. El largo total útil del canal es de 70 m y en un extremo se ubica la paleta generadora de oleaje, cuyo desplazamiento es horizontal, permitiendo la generación de olas en aguas someras.

Figura 100: Canal bidimensional del INH.
(Fuente: Ref.21)



El canal tiene un equipo de generación de oleaje para aguas someras, capaz de absorber el oleaje reflejado desde la obras hacia la paleta de olas. La paleta de olas es propulsada por un sistema óleo-hidráulico. La agitación al interior del canal es registrada mediante sondas y datos, los cuales son procesados por un sistema que entrega los parámetros del oleaje y los espectros de energía.

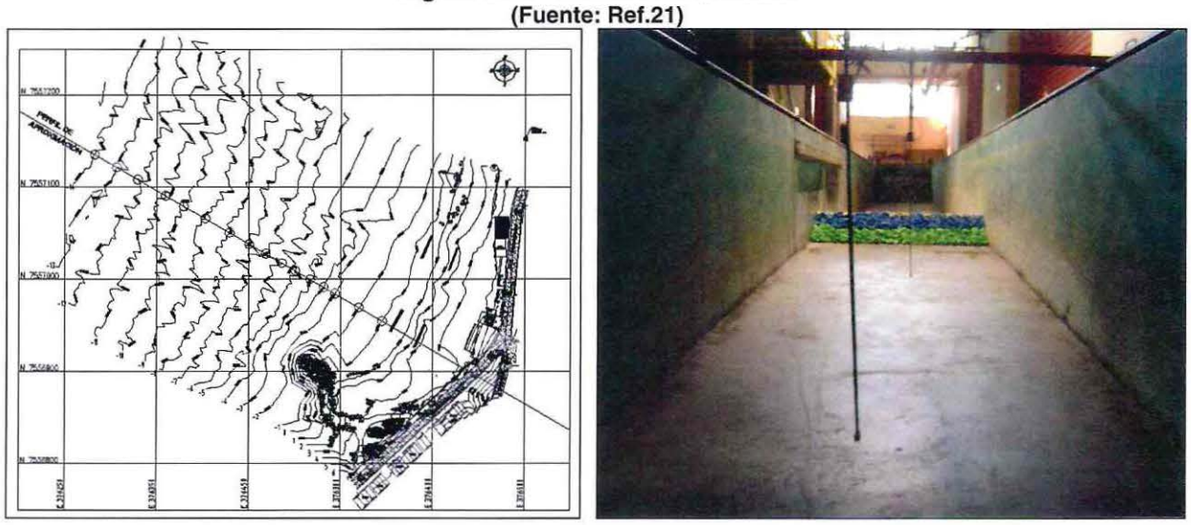
Figura 101: Equipos y Canal Bidimensional del INH.
(Fuente: Ref.21)



9.1.3.2.3.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En el modelo el perfil del fondo marino fue definido como un fondo fijo y fue materializado con hormigón. Este perfil corresponde a la sección más desfavorable de los rompeolas, ya que se encuentra en la zona de mayores profundidades y de mayor exposición al oleaje, por ende mayores son las solicitaciones a los enrocados de protección.

Figura 102: Perfil de modelación.
(Fuente: Ref.21)



9.1.3.2.3.2 CONDICIONES DE ENSAYO

Los ensayos se realizaron para una condición de marea de +1.45 mNRS y baja marea de +0.17 mNRS.

En el ensayo se consideró una tormenta de diseño con una ola significante de tamaño máximo de 4.0 m, con un periodo de 16 segundos, la cual está asociada al periodo de retorno de la obra. Para asegurar la estabilidad de los enrocados, la obra fue sometida a un total de 3,250 olas de tormenta y un total de 7,179 olas.

Tabla 32: Tormenta de diseño.
(Fuente: Ref.21)

Ensayo	Hs (*)		Tp (s)	Duración		N° de Olas
	Prototipo (m)	Modelo (m)		Prototipo (h)	Modelo (h)	
E1	1.0	2.9	12	2.96	0.5	887
E2	2.0	5.7	14	8.87	1.5	2282
E3	3.0	8.6	17	5.92	1.0	1253
E4	4.0	11.4	16	2.96	0.5	666
E5	3.0	8.6	16	5.92	1.0	1331
E6	2.0	5.7	14	2.96	0.5	761
						7179

(*) Altura significativa Hs en veril -11 mNRS.

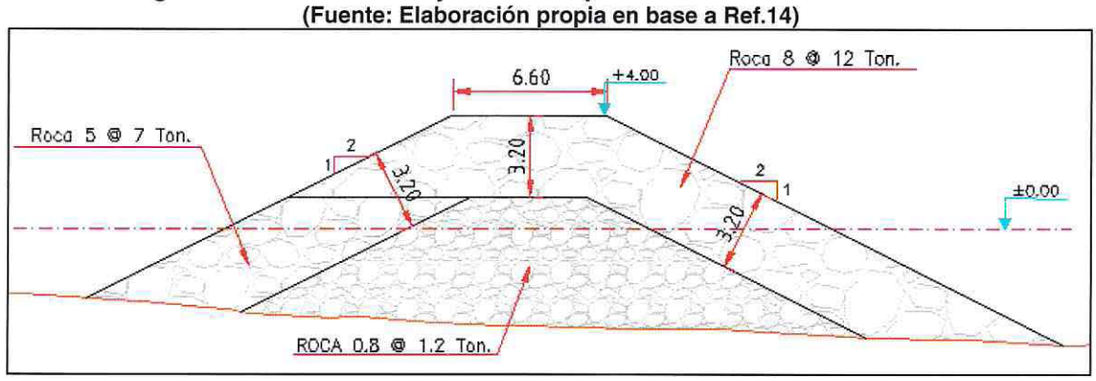
9.1.3.2.3.3 ENSAYOS

En el presente capítulo se analizan los resultados de los ensayos físicos del rompeolas sur, ya que este fue el único rompeolas que se ensayó con un núcleo de rocas y con un núcleo de geotubos, por ende se pueden efectuar comparaciones entre ambos ensayos.

- Ensayo Rompeolas Sur con Núcleo de Rocas

Las características de la sección ensayada se presentan en la siguiente Figura:

Figura 103: Sección ensayada de rompeolas sur con núcleo de rocas.
(Fuente: Elaboración propia en base a Ref.14)



A continuación se muestra el estado inicial y final del ensayo del rompeolas sur con núcleo de rocas:

Figura 104: Estado inicial rompeolas sur con núcleo de rocas.
(Fuente: Ref.21)

Figura 105: Estado final rompeolas sur con núcleo de rocas.
(Fuente: Ref.21)

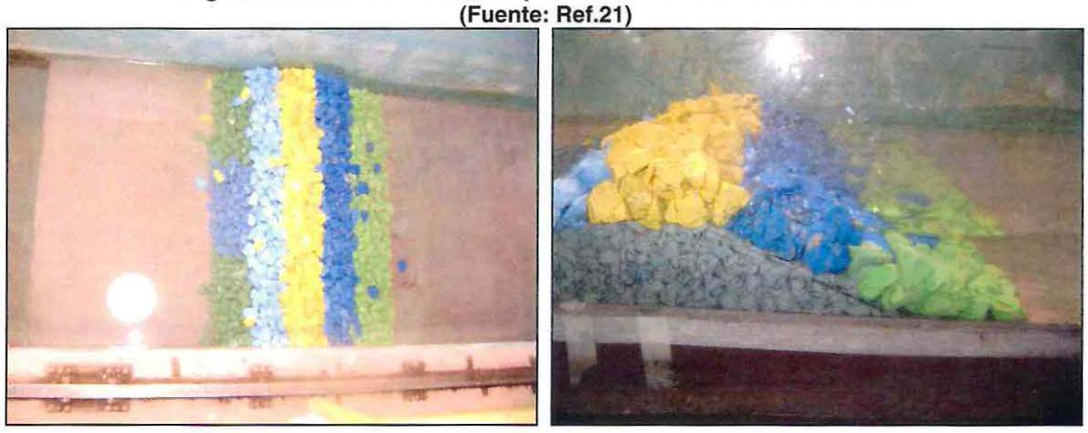


Tabla 33: Resultados ensayo rompeolas sur con núcleo de rocas.
(Fuente: Elaboración propia)

Ensayo	Talud Trasero				Coronamiento		Talud Delantero			
	Talud Trasero Inferior		Talud Trasero Superior		Coronamiento		Talud Delantero Superior		Talud Delantero Inferior	
	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%
E1	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
E2	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	2	0.41%	0	0.00%
E3	2	0.37%	0	0.00%	2	0.72%	7	1.45%	1	0.21%
E4	1	0.19%	1	0.19%	5	1.81%	0	0.00%	0	0.00%
E5	0	0.00%	1	0.19%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
E6	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
E7	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
Total	***3***	***0.56%***	***2***	***0.37%***	***7***	***2.53%***	***9***	***1.86%***	***1***	***0.21%***

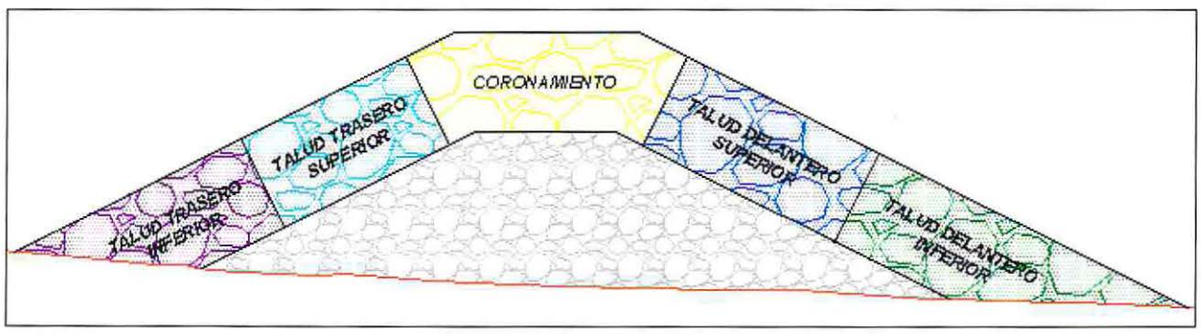
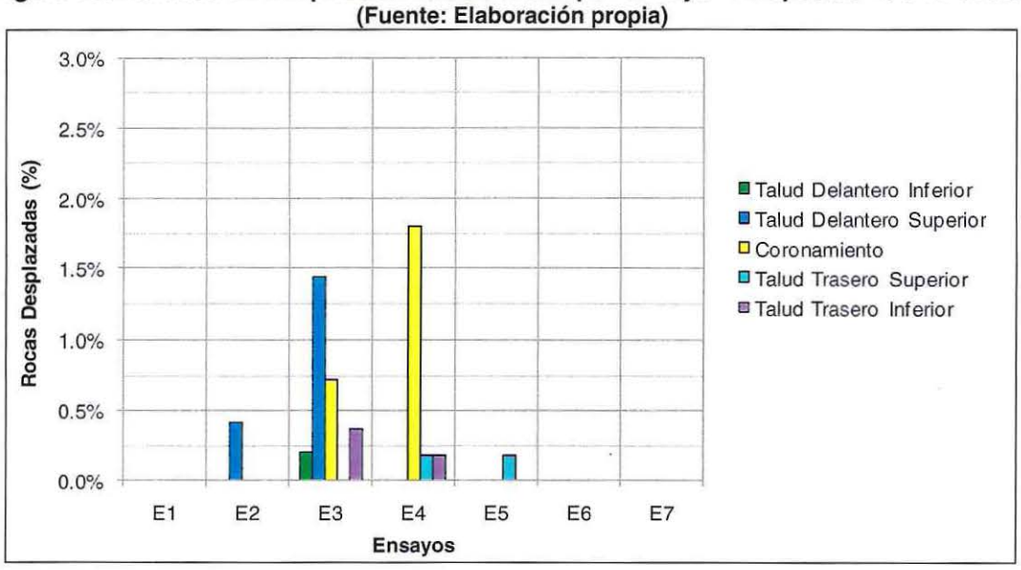
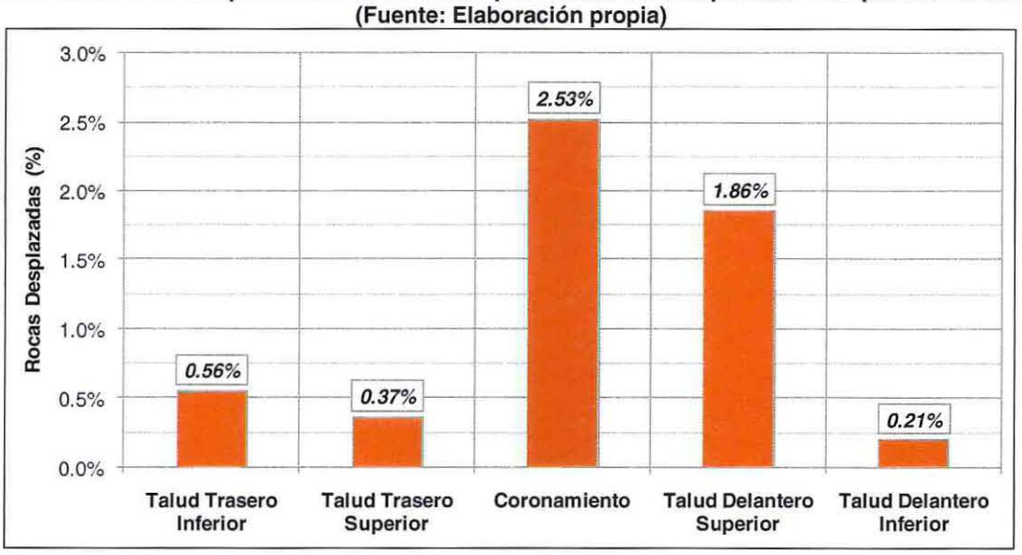


Figura 106: Gráfico de desplazamiento de rocas por ensayo - rompeolas núcleo rocas.
(Fuente: Elaboración propia)



De la Figura anterior se infiere que el talud delantero inicia sus daños con el ensayo E2, aumentando y terminando con el ensayo E3. A medida que se intensifica la tormenta, ensayos E3 y E4, los daños comienzan a generarse en el coronamiento del rompeolas.

Figura 107: Gráfico de desplazamiento de rocas por sector de rompeolas - rompeolas núcleo rocas.
(Fuente: Elaboración propia)



En la Figura anterior se detecta que los mayores movimientos de rocas se generaron en el coronamiento con un 2.53%. Las rocas del talud delantero tuvieron un movimiento total de un 2.07%, donde el mayor daño se generó en el sector superior del rompeolas. El enrocado del sector trasero presentó un movimiento total de un 0.93%, con porcentajes similares en la roca inferior y superior.

- Ensayo Rompeolas Sur con Núcleo de Geotubos

Con el objeto de analizar la factibilidad de utilizar los geotubos como núcleo de las obras de abrigo (Ref.14), se evaluó la estabilidad global de la sección del rompeolas. Además se aprovechó de efectuar algunas modificaciones a la alternativa ensayada con núcleo de rocas. Es importante mencionar que de acuerdo requerimientos geométricos de los rompeolas, con el objeto de no aumentar la cota de coronamiento, ni disminuir el espacio para los geotubos, en la modelación se disminuyó el peso de los elementos del filtro, ensayando rocas entre 300 a 500 kg.

Figura 108: Sección ensayada de rompeolas sur con núcleo de geotubos.
(Fuente: Elaboración propia en base a Ref.14)

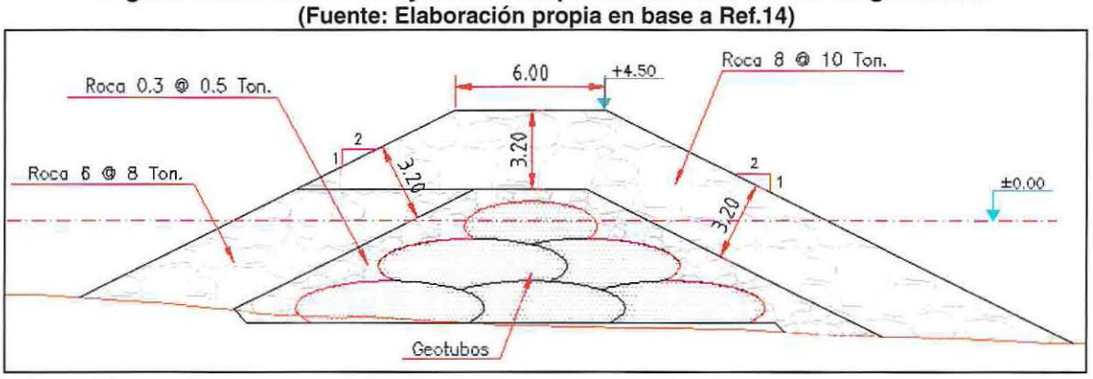


Figura 109: Preparación de ensayo de rompeolas con núcleo de geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

El estado inicial y final del ensayo del rompeolas sur con núcleo de geotubos se muestra en las siguientes Figuras:

Figura 110: Estado inicial rompeolas sur con núcleo de geotubos.
(Fuente: Ref.21)

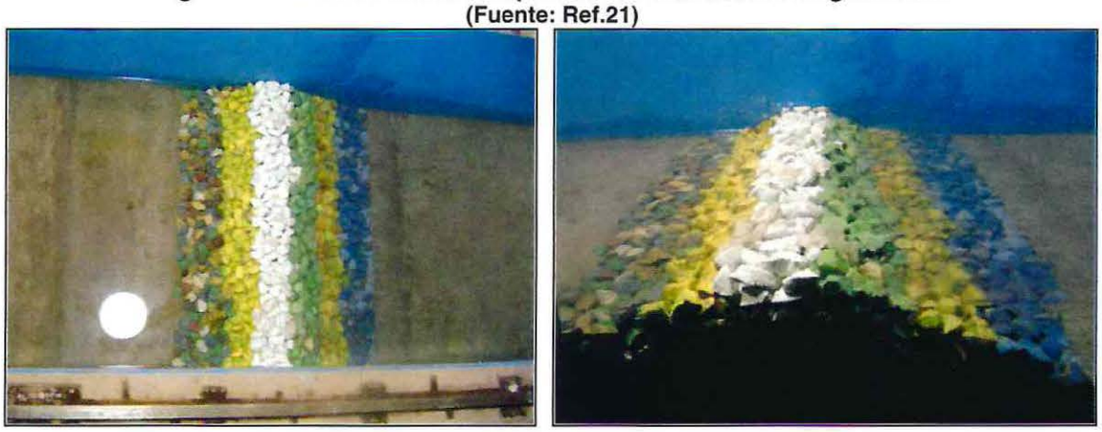


Figura 111: Estado final rompeolas sur con núcleo de geotubos.
(Fuente: Ref.21)

Tabla 34: Resultados ensayo rompeolas sur con núcleo de geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

Ensayo	Talud Trasero				Coronamiento		Talud Delantero			
	Talud Trasero Inferior		Talud Trasero Superior		Coronamiento		Talud Delantero Superior		Talud Delantero Inferior	
	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%	N° Rocas	%
E1	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
E2	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	1	0.18%	0	0.00%
E3	0	0.00%	0	0.00%	1	0.51%	3	0.55%	0	0.00%
E4	0	0.00%	3	0.57%	2	1.01%	3	0.55%	0	0.00%
E5	0	0.00%	0	0.00%	1	0.51%	2	0.37%	0	0.00%
E6	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
E7	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
Total	***0***	***0.00%***	***3***	***0.57%***	***4***	***2.02%***	***9***	***1.66%***	***0***	***0.00%***

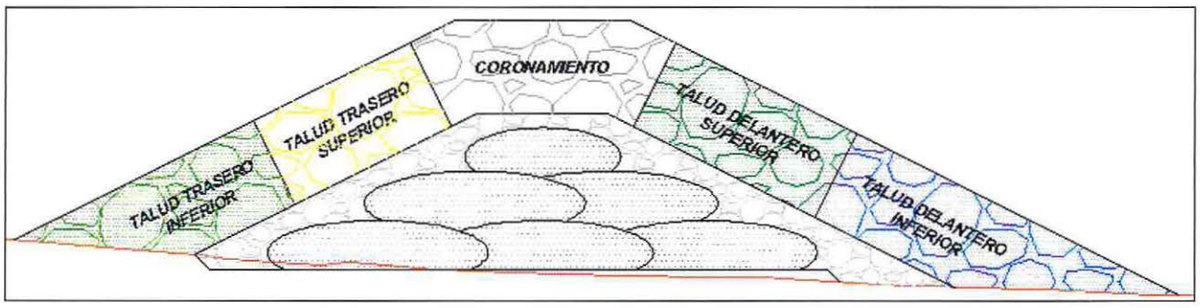
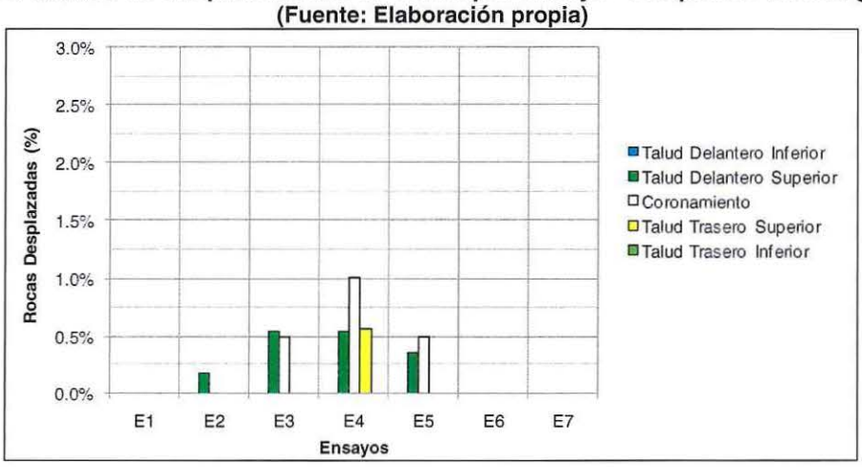
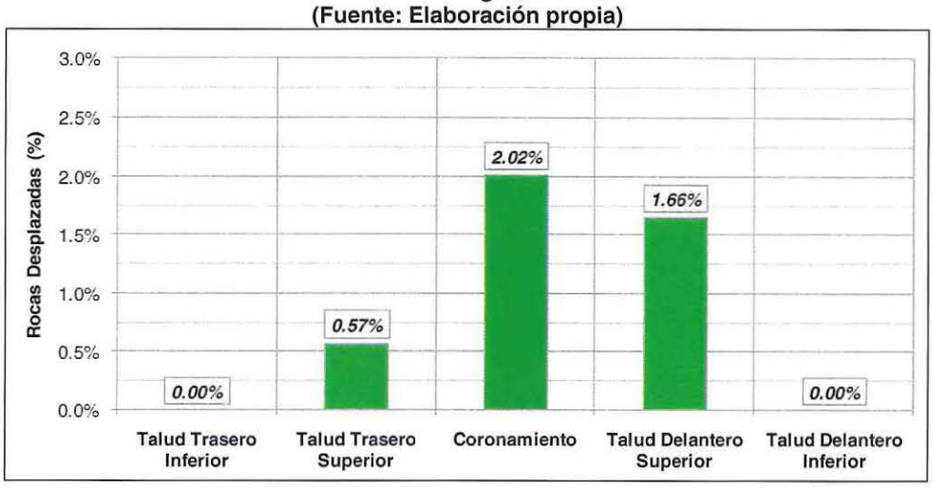


Figura 112: Gráfico de desplazamiento de rocas por ensayo - rompeolas núcleo geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)



En la Figura 112 se observa que las rocas del talud delantero superior se movieron desde el ensayo E2, aumentando cuando se intensificó la tormenta (ensayos E3 y E4), disminuyendo posteriormente en el ensayo E5. Respecto al coronamiento, el movimiento de las rocas fue proporcional a la intensidad de la tormenta, presentándose el mayor daño en el ensayo E4. El talud trasero superior, solo sufrió daños con el peak de la tormenta (Ensayo E4).

Figura 113: Gráfico de desplazamiento de rocas por sector de rompeolas - rompeolas núcleo geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

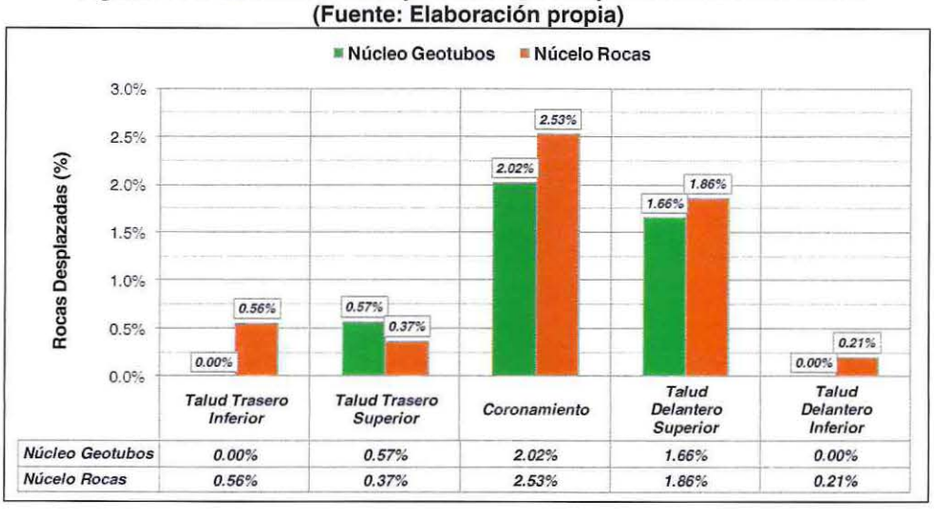


Al igual que el rompeolas con núcleo de rocas, en el presente ensayo los mayores movimientos de rocas se produjeron en el coronamiento con un 2.02% y en el sector superior del talud delantero con un 1.66%. El enrocado del sector superior del talud trasero, presentó un movimiento de un 0.57%. Es importante mencionar que los taludes inferiores, tanto el delantero como el trasero, no sufrieron daños.

9.1.3.2.3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En general el desplazamiento de las rocas disminuyó con la alternativa de rompeolas con núcleo de geotubos. En total el daño en el talud delantero bajo un 0.41%, coronamiento un 0.50% y el talud trasero un 0.36%.

Figura 114: Gráfico de comparación de desplazamiento de rocas.
(Fuente: Elaboración propia)



	Talud Trasero Inferior	Talud Trasero Superior	Coronamiento	Talud Delantero Superior	Talud Delantero Inferior
Núcleo Geotubos	0.00%	0.57%	2.02%	1.66%	0.00%
Núcelo Rocas	0.56%	0.37%	2.53%	1.86%	0.21%

El aumento de la cota de coronamiento del rompeolas con geotubos en 50 cm, ayudó también a disminuir los daños, ya que en este sector el desplazamiento de rocas disminuyó de forma considerable.

Los sectores del pie del rompeolas, tanto en el talud delantero como en el trasero, con la alternativa de núcleo de geotubos, no se generaron desplazamiento de rocas.

Gran parte de la disminución de los daños del rompeolas pudo haber estado asociado a la consideración de una capa de filtro entre la coraza y el núcleo de geotubos, lo que ayudó a mejorar la estabilidad del enrocado de coraza, ya que en la primera alternativa el enrocado de coraza se apoyaba directamente sobre el núcleo de rocas.

De acuerdo a las modelaciones físicas efectuadas para ambas alternativas de núcleo, se concluye que la generación de rompeolas con núcleo de geotubos no presentaría problemas de estabilidad, resultando técnicamente factible su utilización, incluso se disminuyeron los daños asociados al desplazamiento de rocas.

9.1.3.2.4 VOLUMEN DE ARENAS A REUTILIZAR EN LOS GEOTUBOS

De acuerdo a las características de los geotubos considerados para el proyecto de playa artificial, se realizó una estimación de la cantidad de arena requerida para el relleno de los geotubos.

Se determinó que en los rompeolas de la playa artificial se podrían reutilizar un total de 9,381 m^3 de arenas contaminadas, de los cuales 1,397 m^3 corresponderán al relleno de los geotubos del rompeolas norte y 7,984 m^3 del rompeolas sur.

Tabla 35: Estimación de volumen de arenas a reutilizar en geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

Rompeolas Norte	Cantidad	Longitud (m)	Volumen (m^3/m)	Volumen Arenas (m^3)
Geotubo GT1000, C 10.70m, L=20 m	1	20	5.93	119
Geotubo GT1000, C 10.70m, L=22 m	2	22	5.93	261
Geotubo GT1000, C 10.70m, L=25 m	2	25	3.00	150
Geotubo GT1000, C 10.70m, L=25 m	4	25	5.93	593
Geotubo GT1000, C 13.70m, L=25 m	1	25	10.97	274
Volumen Total de Arenas - Rompeolas Norte				**1,397**

Rompeolas Sur	Cantidad	Longitud (m)	Volumen (m^3/m)	Volumen Arenas (m^3)
Geotubo Gt1000, C 15.20m, L=20 m	1	20	10.86	217
Geotubo Gt1000, C 15.20m, L=25 m	1	25	10.86	272
Geotubo Gt1000, C 12.20m, L=20 m	11	20	7.05	1,551
Geotubo Gt1000, C 12.20m, L=25 m	5	25	7.05	881
Geotubo Gt1000, C 16.8m, L=20 m	10	20	11.48	2,296
Geotubo Gt1000, C 16.8m, L=25 m	5	25	11.48	1,435
Geotubo Gt1000, C 16.8m, L=22 m	2	22	11.48	505
Geotubo Gt1000, C 16.8m, L=24 m	3	24	11.48	827
Volumen Total de Arenas - Rompeolas Sur				**7,984**

9.1.3.3 REUTILIZACIÓN DE ARENAS EN RELLENO DE OBRAS TERRESTRES

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) desarrolló un proyecto arquitectónico de mejoramiento del borde costero de Tocopilla (Ref.30). La primera etapa del proyecto consiste básicamente en desarrollar obras complementarias al proyecto de la playa artificial El Salitre, tales como accesos, paseo, paisajismo, restaurantes, baños, miradores etc.

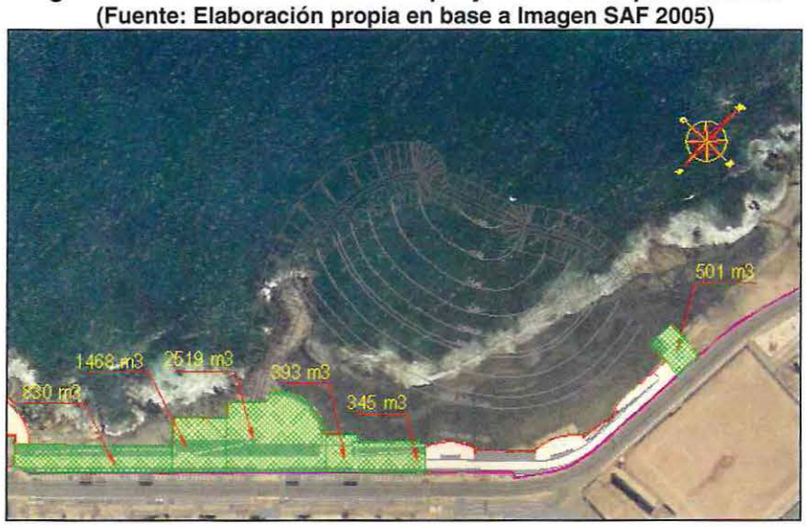
La tercera alternativa de reutilización de arenas consiste en utilizar las arenas existentes en la playa como material de relleno de las obras terrestres del proyecto del MINVU.

Figura 115: Imagen referencial de proyecto MINVU para playa El Salitre.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

9.1.3.3.1 VOLUMEN FACTIBLE PARA RELLENAR PROYECTO MINVU

Analizando los niveles de diseño y requerimientos de las obras del proyecto arquitectónico del MINVU, se detecta que en el sector sur y centro del paseo y una parte final del sector norte, se generan espacios factibles para rellenar las obras con las arenas de la playa. Mediante el análisis de secciones trasversales del paseo, se determinó que en estos sectores se podrían depositar aproximadamente 6,056 m^3 de arenas contaminadas. A continuación se presenta una imagen con la ubicación de los sectores y los volúmenes de arenas que podría albergar el proyecto MINVU:

Figura 116: Sectores factibles de proyecto MINVU para relleno.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



Con el objeto de aislar las arenas depositadas de las obras proyectadas, al igual que en la nivelación de la playa, se recomienda considerar un geotextil de separación, el cual encapsulará el relleno de arenas y lo mantendrá en nulo contacto con la superficie del paseo.

Figura 117: Sección tipo de relleno para proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia)

Al utilizar las arenas contaminadas como material de relleno en las obras terrestres, se genera una ventaja económica para el proyecto del MINVU, ya que sólo se estaría considerando un costo asociado a la extracción y depósito del material, ahorrando los costos de cantera y traslado del material de relleno.

Además de los costos, otro aspecto a analizar en la reutilización de las arenas, está relacionado con el diseño de los muros de contención, ya que la estabilidad de estas obras está relacionada directamente con las características geotécnicas del suelo de relleno. Las arenas como material de relleno presentan una desventaja sobre un relleno granular, ya que poseen características geotécnicas inferiores, generándose mayores solicitaciones, y para asegurar la estabilidad de los muros, éstos podrían tener un mayor dimensionamiento que con un relleno con granular, lo que se traduciría directamente en un aumento del costo de estas obras.

Con el objeto de analizar lo anteriormente expuesto, en el siguiente capítulo se estudia la estabilidad del muro de contención presentado en la Figura 117, con un relleno granular y con las arenas existentes en la playa.

9.1.3.3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MURO DE CONTENCIÓN

Como se mencionó anteriormente la estabilidad de las obras de contención está relacionada directamente con las características geotécnicas del suelo de relleno, específicamente con el ángulo de roce interno, el peso unitario y la cohesión del material. En este caso se analizarán suelos granulares sin cohesión.

En general las arenas presentan un menor ángulo de roce interno y un menor peso específico que un relleno granular, lo que genera mayores solicitaciones en los muros de contención.

Considerando que el muro de borde de las obras terrestres se ubica sobre la línea de alta marea, no estando en contacto directo con el oleaje, no se analiza el empuje de aguas residuales generadas tras el muro por el efecto de la marea. De acuerdo a lo anterior, la estabilidad del muro de borde se estudió siguiendo la metodología expuesta en la Ref.25. El detalle de esta metodología se muestra en el Anexo 12.2 del presente documento.

En las siguientes Tablas se presentan los resultados de los análisis realizados para la estabilidad del muro de contención para ambos suelos de rellenos:

Tabla 36: Resultados de estabilidad del muro con relleno de arenas.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso Estático	Factor de Seguridad Requerido	Factor de Seguridad Obtenido
Desplazamiento	1.50	3.66
Volcamiento	1.50	7.64

Caso Sísmico	Factor de Seguridad Requerido	Factor de Seguridad Obtenido
Desplazamiento	1.10	1.52
Volcamiento	1.75	2.58

Tabla 37: Resultados de estabilidad del muro con relleno granular.
(Fuente: Elaboración propia)

Caso Estático	Factor de Seguridad Requerido	Factor de Seguridad Obtenido
Desplazamiento	1.50	5.69
Volcamiento	1.50	12.21

Caso Sísmico	Factor de Seguridad Requerido	Factor de Seguridad Obtenido
Desplazamiento	1.10	1.74
Volcamiento	2.00	2.87

De acuerdo a la geometría analizada para el muro de contención, se determina que para ambas alternativas de relleno, se cumple con los factores de seguridad para el desplazamiento y para el volcamiento en ambos casos analizados (caso sísmico y caso estático).

En resumen, para ambas alternativas de relleno, la geometría del muro de contención analizada resulta ser válida, por ende no sería necesario modificar la geometría del muro al utilizar las arenas de la playa como material de relleno, lo que se traduce directamente en mantener los costos asociados a la construcción de dicho muro.

9.1.3.3.3 AMPLIACIÓN DE OBRAS EN PROYECTO MINVU

Con el objeto de aumentar la capacidad de depósito de arenas de relleno en las obras terrestres, se analizan dos alternativas de ampliación de obras del proyecto de borde costero del MINVU, lo que generaría un aumento de los volúmenes de las arenas a reutilizar.

Del análisis realizado al proyecto de borde costero, se detectan dos posibles sectores de ampliación de obras, uno ubicado en el extremo norte y otro ubicado en el extremo sur del proyecto.

Figura 118: Alternativas de ampliación del proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

9.1.3.3.3.1 ALTERNATIVA AMPLIACIÓN DEL SECTOR SUR DEL PROYECTO MINVU

Esta alternativa considera ampliar las obras en el sector sur del paseo. En este sector se presentan condiciones favorables para el depósito del material, ya que con un adelanto de pocos metros de la línea de edificación, se genera un espacio considerable para albergar material.

La alternativa propuesta considera incorporar una zona no utilizada en el proyecto del MINVU, donde se propone generar una explanada de rellenos, obteniendo un frente continuo de obras.

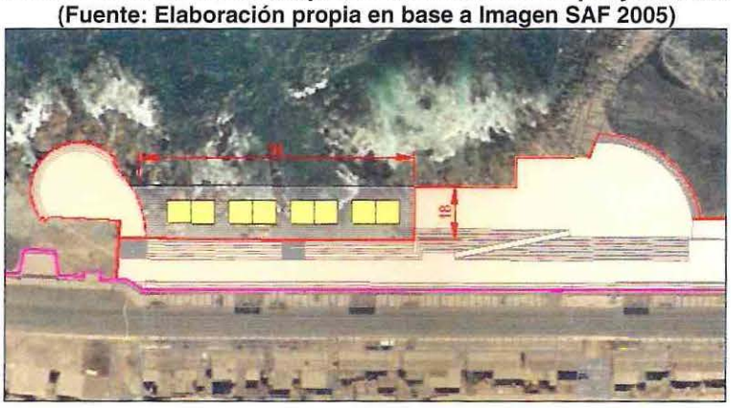
La desventaja de generar obras en este sector, es que estarán en contacto directo con el oleaje, lo generaría una inseguridad para los peatones, situación que se mitiga con la construcción de mayores obras de protección, lo que se trasmite de forma directa en elevar su costo de construcción.

La ampliación de obras abarca una superficie aproximada de 1,683 m^2, desarrolladas en un frente de 94 m de longitud y un ancho de 18 m.

De acuerdo a las cubicaciones efectuadas, en este sector se podrían depositar un total de 3,589 m^3 de arenas contaminadas.

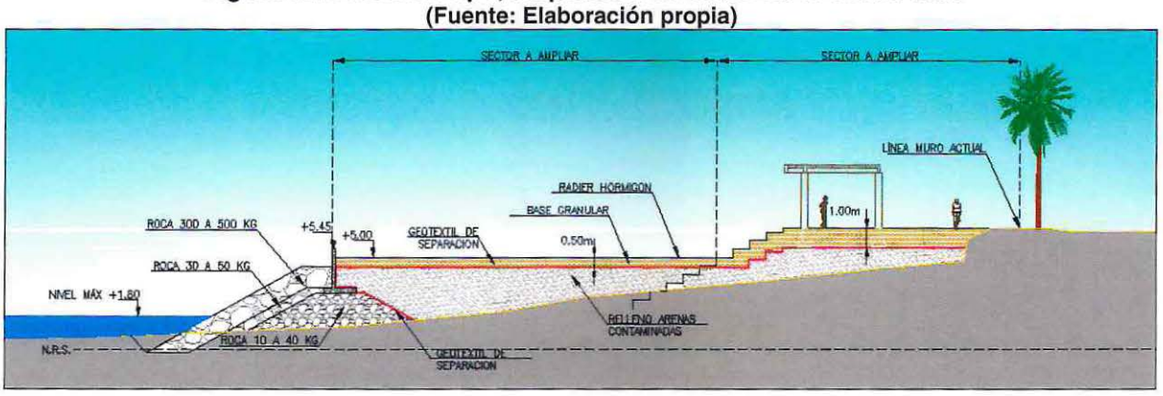
La ampliación de la explanada podría considerar obras de uso recreativo asociado al deporte, para ello se proyectan canchas de arena para la práctica del voleibol playa.

Figura 119: Alternativa de ampliación sector sur de proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



A continuación se muestra la sección tipo de las obras requeridas para una ampliación del paseo en el sector sur.

Figura 120: Sección tipo, ampliación de obras en el sector sur.
(Fuente: Elaboración propia)



9.1.3.3.3.2 ALTERNATIVA AMPLIACIÓN DEL SECTOR NORTE DEL PROYECTO MINVU

Esta alternativa considera la ampliación de obras en el sector norte del proyecto MINVU, sector que actualmente corresponde a una zona de playa, presenta bajas profundidades, y para el depósito de mayores volúmenes de arenas se requiere de un adelantamiento significativo de la línea de obra.

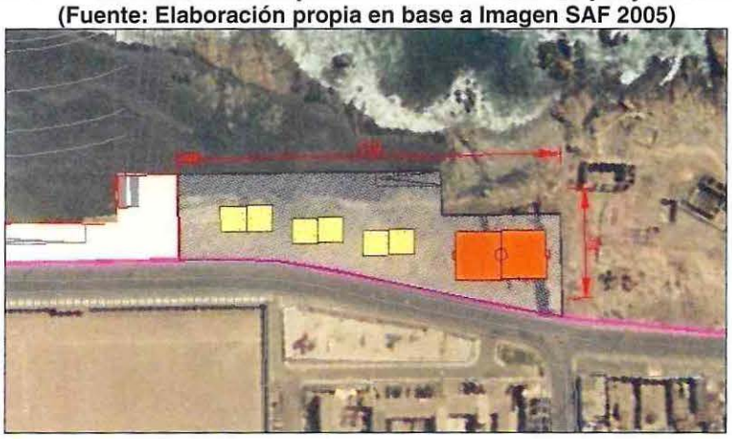
Las ampliación de las obras en este sector, tiene la ventaja de estar en un mínimo contacto con el oleaje, ya que el terreno presenta cotas superiores a +3.00 mNRS.

La ampliación propuesta tendrá una longitud de 119 m y un ancho aproximado de 34 m. Se genera una superficie aproximada de 3,530 m^2 cuadrados de obra adicional, el doble de la superficie proyectada en el sector sur.

De acuerdo a las cubicaciones efectuadas, en este sector se podrían depositar un total de 2,130 m^3 de arenas contaminadas.

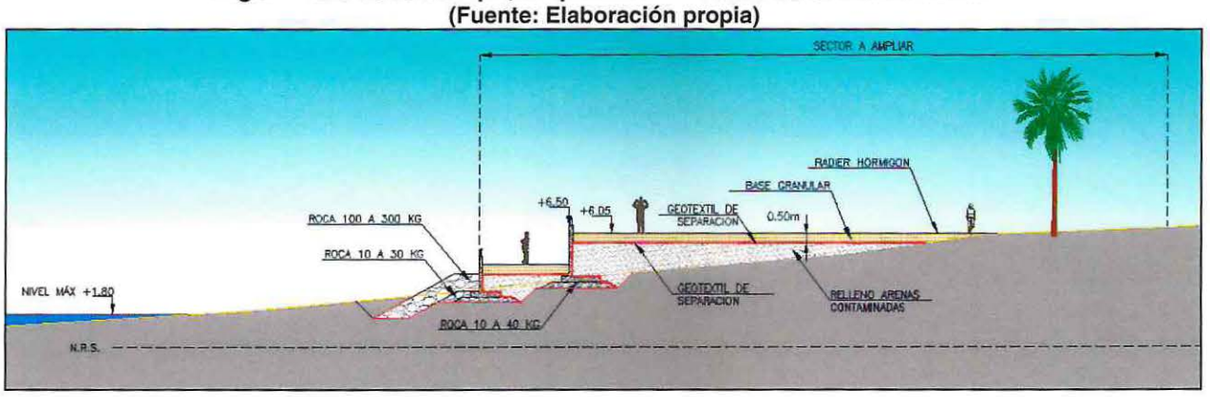
Al igual que el sector sur, en la ampliación para este sector se proyecta una explanada con obras de uso recreativo asociado al deporte, para ello se proyectan tres canchas de arena para voleibol playa y una cancha para la práctica de futbol playa.

Figura 121: Alternativa de ampliación sector norte de proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



A continuación se muestra la sección tipo de las obras requeridas para una ampliación del paseo en el sector norte.

Figura 122: Sección tipo, ampliación de obras en el sector norte.
(Fuente: Elaboración propia)



9.2 COSTOS ECONÓMICOS DE ALTERNATIVAS DE MANEJO

9.2.1 COSTOS TRASLADO DE LAS ARENAS A UNA PLANTA DE TRATAMIENTO

En el presente capítulo se evalúan los costos que significarían el traslado y tratamiento de las arenas contaminadas en la planta Hidronor Chile – Antofagasta. Durante el desarrollo del proyecto de playa artificial, se solicitó una cotización a la planta de tratamiento Hidronor, entregando un presupuesto para la disposición y tratamiento (Ref.18) y para el transporte de las arenas a la planta (Ref.19).

9.2.1.1 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LAS ARENAS

De acuerdo a la Ref.18 el costo para tratar y disponer las arenas en la planta asciende a 3.0 UF/ton. El peso específico de las arenas existentes en la playa es de 1.8 ton/m^3, con lo que se obtiene un costo aproximado por m^3 de $ 118,800.

9.2.1.2 TRANSPORTE DE LAS ARENAS

De acuerdo a la Ref.19, el transporte de las arenas desde Tocopilla hasta la planta Hidronor en Antofagasta, tendría un costo por viaje de $ 340,000. De acuerdo a los requerimientos, los camiones tienen una capacidad de carga máxima permitida de 20 m^3 y el peso bruto vehicular máximo permitido es de 45 toneladas, por lo que la carga máxima no debe superar las 25 toneladas. Considerando el peso específico de las arenas, el volumen máximo a cargar en cada camión debiese ser de aproximadamente 13.5 m^3. Por lo tanto el costo por m^3 de traslado de arenas es de $ 25,185.

9.2.1.3 COSTOS TOTALES

Al costo de tratamiento y traslado del material se le debe incorporar el costo por la extracción de las arenas, el cual es obtenido de la base de precios unitarios de la Ref.12. De acuerdo a los análisis realizados, el costo por trasladar 1 m^3 de arenas a la planta de tratamiento Hidronor sería de $ 147,221 (ver Tabla 38).

Tabla 38: Costo por tratamiento de 1 m^3 en la planta Hidronor Chile.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN	1	m3	$118,800	$118,800
TRANSPORTE	1	m3	$25,185	$25,185
EXTRACCIÓN	1	m3	$3,236	$3,236
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$147,221**

Considerando los volúmenes de arenas analizados para cada alternativa de extracción, en la siguiente Tabla se presentan los costos que significaría manejar las arenas a través de una planta de tratamiento:

Tabla 39: Costos para traslado de arenas a planta tratamiento.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA	VOL. EXTRACCIÓN (m^3)	COSTO TOTAL
Extracción Total	80,959	**$ 11,918,864,939**
Extracción Total Proyecto	57,711	**$ 8,496,271,131**
Extracción Estrato 2.0 m	53,587	**$ 7,889,131,727**
Extracción Estrato 1.5 m	41,175	**$ 6,061,824,675**
Extracción Estrato 1.0 m	29,928	**$ 4,406,030,088**

9.2.2 COSTOS VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR

Para determinar los costos asociados a la presente alternativa, se realiza un análisis de precios unitarios de las partidas necesarias para ejecutar el dragado y vertido de las arenas en el mar. La estimación detallada de estos precios se presenta en el Anexo 12.3.1.

En la siguiente Tabla se presentan los costos obtenidos para el dragado y vertido de arenas para cada alternativa de extracción:

Tabla 40: Costos por dragado y vertido de arenas para cada alternativa de extracción.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA	VOL. EXTRACCIÓN (m^3)	DURACIÓN (MES)	COSTO TOTAL
Extracción Total	80,959	12	**$ 1,986,740,000**
Extracción Total Proyecto	57,711	9	**$ 1,543,640,000**
Extracción Estrato 2.0 m	53,587	8	**$ 1,395,940,000**
Extracción Estrato 1.5 m	41,175	6	**$ 1,100,540,000**
Extracción Estrato 1.0 m	29,928	5	**$ 952,840,000**

9.2.3 COSTOS REUTILIZACIÓN DE ARENAS

En el presente acápite se estiman los costos de las alternativas de reutilización de arenas, relacionadas con nivelación de la playa, generación de los núcleos de las obras de abrigo y utilizarlas como material de relleno de las obras terrestres del proyecto del MINVU.

9.2.3.1 COSTOS NIVELACIÓN DE LA PLAYA

La estimación detallada de los costos para la nivelación de la playa se presenta en el Anexo 12.3.2.1. En la siguiente Tabla se muestran los costos totales de nivelación de playa para las alternativas de extracción:

Tabla 41: Costos de nivelación de playa para alternativas de extracción.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	VOL. NIVELACIÓN (M^3)	COSTO NIVELACIÓN	COSTO MATERIAL DE SEPARACIÓN	COSTO TOTAL
Extracción Estrato 2.0 m	3,818	$24,817,000	$54,680,000	**$79,497,000**
Extracción Estrato 1.5 m	6,356	$41,180,524	$54,680,000	**$95,860,524**
Extracción Estrato 1.0 m	10,088	$65,360,152	$54,680,000	**$120,040,152**

9.2.3.2 COSTOS DE ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE GEOTUBOS

En el presente capítulo se analizan los costos económicos de los rompeolas compuestos con núcleo de geotubos. Además con el objeto de comparar esta alternativa, se analizan los costos de los rompeolas con un núcleo de rocas. La estimación detallada de los costos se presenta en el Anexo 12.3.2.2.

9.2.3.2.1 COSTOS ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE GEOTUBOS

De acuerdo a los análisis efectuados, se determinó que el costo total de los rompeolas sur y norte con núcleo de geotubos es de $ 2,189.8 MM, donde el costo del núcleo de geotubos es de $ 578 MM, y representa un 26% de costo total de los rompeolas.

Tabla 42: Resumen de costos de rompeolas con núcleo de geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	PRECIO TOTAL
ROMPEOLAS NORTE	
Núcleo	$115,266,700
Coraza	$419,935,000
Subtotal	$535,201,700
ROMPEOLAS SUR	
Núcleo	$463,196,600
Coraza	$1,191,378,000
Subtotal	$1,654,574,600
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)	$2,189,776,300

9.2.3.2.2 COSTOS ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE ROCAS

El costo total de los rompeolas con núcleo de rocas es de aproximadamente $ 2,189.8 MM, donde el costo del núcleo de rocas es de $ 577 MM, que representa aproximadamente el 26% del costo total de los rompeolas.

Tabla 43: Presupuesto Rompeolas con núcleo de rocas.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	PRECIO TOTAL
ROMPEOLAS NORTE	
Núcleo	$99,640,000
Coraza	$419,935,000
Subtotal	$519,575,000
ROMPEOLAS SUR	
Núcleo	$477,614,000
Coraza	$1,191,378,000
Subtotal	$1,668,992,000
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)	$2,188,567,000

9.2.3.2.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE ALTERNATIVAS DE NÚCLEOS

De acuerdo a los análisis efectuados, para ambas alternativas analizadas se obtuvieron costos similares, donde el costo de la alternativa de núcleo con geotubos es levemente superior a la alternativa con rocas en un 0.06%. Esta diferencia resulta marginal para los costos totales de los rompeolas, por lo que se considera que para ambas alternativas de rompeolas los costos son iguales. Por lo anterior se determina que, para este caso, la alternativa de generar rompeolas con núcleo de geotubos resulta económicamente factible.

Es importante mencionar que en el caso de no reutilizar las arenas en las obras de abrigo, a la alternativa de núcleo con rocas, se le debe incorporar el costo por el manejo de las arenas no reutilizadas.

9.2.3.3 COSTOS DE RELLENO DE OBRAS TERRESTRES

En el presente capítulo se analizan los costos que significaría realizar el relleno de las obras terrestres en los sectores detectados del proyecto del MINVU, incorporando los costos de las obras de ampliación propuestas. La estimación detallada de estos costos se presenta en el Anexo 12.3.2.3.

9.2.3.3.1 COSTOS DE RELLENO PROYECTO MINVU

En la siguiente Tabla se presentan los costos por reutilizar 6,056 m^3 de arenas como material de relleno y los costos considerando un relleno granular.

Tabla 44: Costo total por utilizar las arenas existentes como material de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)
Relleno Obras Terrestres con Arenas Existentes	$41,672,000
Relleno Obras Terrestres con Relleno Granular	$56,320,800

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que al utilizar las arenas como material de relleno, los costos se disminuyen un 26% respecto a un relleno granular.

9.2.3.3.2 COSTOS AMPLIACIÓN SUR PROYECTO MINVU

Se determinó que el costo aproximado para la generación de obras de ampliación en el sector sur del proyecto MINVU es de $ 119,888,500, donde se pueden albergar 3,589 m^3 de arenas contaminadas.

La ampliación de obras en el sector sur del proyecto MINVU, resulta más económico que el manejo de los 3,589 m^3 de arenas que se estarían reutilizando, ya que trasladar este volumen a una planta de tratamiento tendría un costo de $ 528 MM y verterlas en el mar el costo sería de $ 259 MM.

9.2.3.3.3 COSTOS AMPLIACIÓN NORTE PROYECTO MINVU

Se estimó que la generación de obras en el sector norte tendría un costo aproximado de $ 202,700,219, pudiendo depositar un total de 2,130 m^3 de arenas contaminadas.

Al igual que en el sector sur, la ampliación de obras en el sector norte resulta más económico que el manejo de los 2,130 m^3 de arenas que se estarían reutilizando, ya que trasladar este volumen a una planta de tratamiento tendría un costo de $ 314 MM y verterlas en el mar el costo sería de $ 299 MM.

9.2.4 COSTOS DEPÓSITO DE ARENAS LIMPIAS DE RELLENO

El volumen de cada alternativa de extracción, está relacionado directamente con el volumen de arenas limpias de relleno a depositar, ya que a medida que aumenta la cantidad a extraer, aumenta el volumen de las arenas de relleno, misma relación para el costo.

En el presente capítulo se analiza el costo que significaría el depósito de las arenas limpias, tanto para las alternativas de extracción como para las alternativas de nivelación de playa, estás ultimas relacionadas con la reutilización de las arenas.

En la siguiente Tabla se presenta un resumen de los costos del depósito de las arenas limpias de relleno para cada alternativa de extracción:

Tabla 45: Costos depósito de arenas limpias de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	VOL. ARENAS LIMPIAS (m^3)	COSTO TOTAL
Extracción Total	92,972	**$ 1,306,711,600**
Extracción Total Proyecto	69,724	**$ 982,009,200**
Extracción Estrato 2.0 m	61,436	**$ 871,778,800**
Extracción Estrato 1.5 m	49,405	**$ 711,766,500**
Extracción Estrato 1.0 m	39,256	**$ 576,784,800**

Como se mencionó con anterioridad, otro costo a analizar por concepto de depósito de arenas, está relacionado con las alternativas de nivelación de la playa, ya que posterior a la nivelación y colocación del material de separación, se deben depositar las arenas limpias.

Tabla 46: Costos depósito de arenas limpias para nivelación de playa.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	VOL. ARENAS LIMPIAS CON NIVELACIÓN (m^3)	COSTO ARENAS LIMPIAS CON NIVELACIÓN
Extracción Estrato 2.0 m	57,618	$ 766,319,400
Extracción Estrato 1.5 m	43,049	$ 572,551,700
Extracción Estrato 1.0 m	29,168	$ 387,934,400

Es importante mencionar que los costos presentados en la Tabla 46, no consideran el costo del geotextil de separación, ya que este costo se incorpora en los costos de las alternativas de nivelación de playa (Capítulo 9.2.3.1).

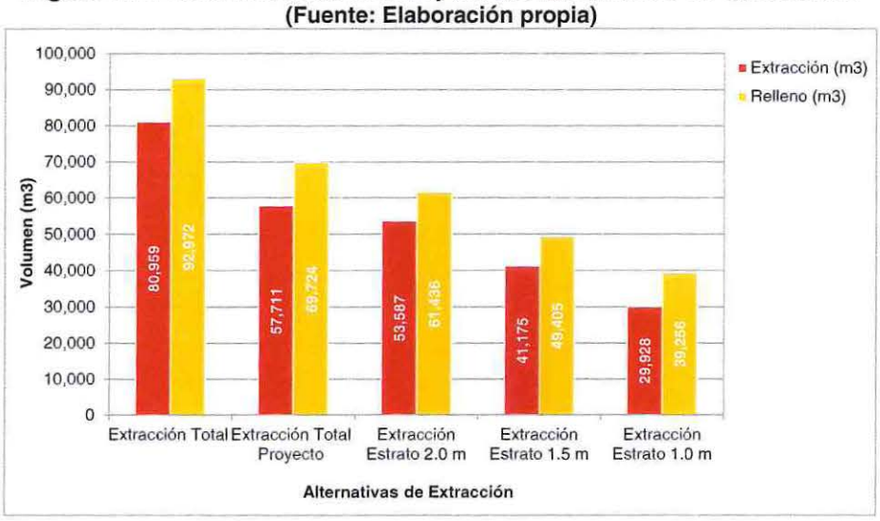
9.3 COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MANEJO

- Alternativas de Extracción de Arenas

En el caso que la ejecución del proyecto de playa artificial resulte ambiental y económicamente inviable, ya sea por la extracción de todas las arenas que se encuentran en la playa o bien por la extracción de sólo las arenas que se intervienen con el proyecto, se puede considerar la extracción de una parcialidad de éstas. Para ello se analizaron alternativas de extracción parcial de arenas, las cuales buscan disminuir el volumen de arenas a manejar y consisten básicamente en generar estratos de arenas limpias.

En la siguiente Figura se muestra de forma gráfica los volúmenes de extracción y de relleno de arenas obtenidos para cada alternativa de extracción analizada.

Figura 123: Volúmenes de arenas para las alternativas de extracción.
(Fuente: Elaboración propia)



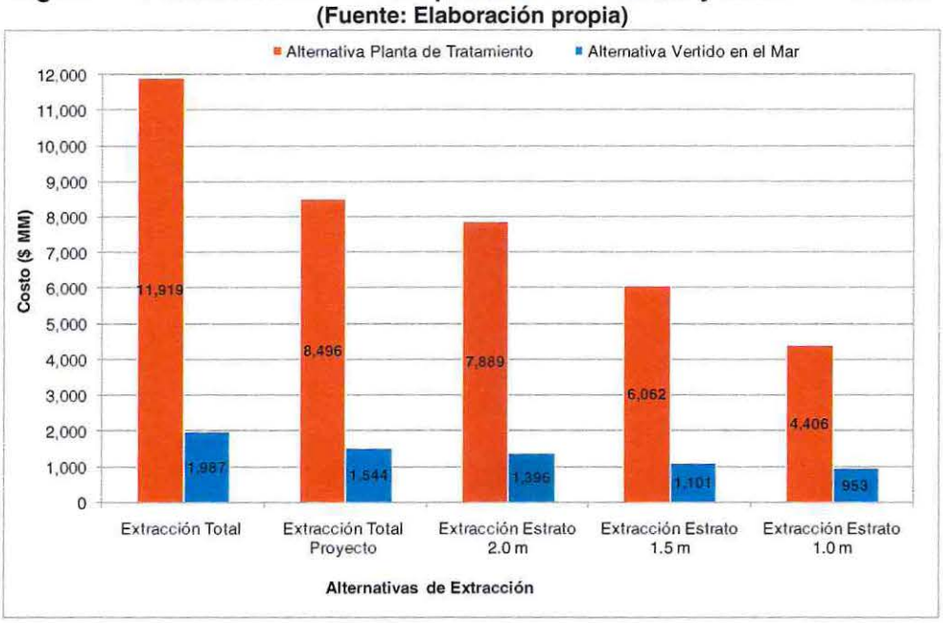
- Alternativas de Manejo: Planta de Tratamiento y Vertido de Arenas en el Mar

De acuerdo a los análisis realizados, técnicamente sería factible ejecutar ambas alternativas. La alternativa de trasladar las arenas a una planta de tratamiento de residuos mineros, presenta una ventaja ambiental importante sobre la alternativa de verter las arenas en el mar, ya que con la

planta de tratamiento no se interviene ni se contamina el medio marino depositar las arenas contaminadas. Para el caso de la alternativa de extraer y verter las arenas en el mar mediante un proceso de dragado, considerando los criterios internacionales, específicamente la normativa española, no sería recomendable realizar el vertido de las arenas en el mar, ya que por las elevadas concentraciones de Cobre y Zinc, se generaría un mayor daño en el medio marino que en el medio terrestre, recomendándose realizar el vertido en tierra.

Respecto a los costos económicos, con la alternativa de trasladar las arenas a una planta de tratamiento se obtienen los mayores costos, generando que el proyecto de playa artificial sea económicamente inviable, ya que incluso sólo el tratamiento de la extracción mínima de arenas (29,928 m^3), supera los costos directos considerados para todas las obras del proyecto. Con la alternativa de extraer y verter las arenas en el mar se obtienen costos considerablemente menores que trasladar las arenas a una planta de tratamiento (82% menores), sin embargo éstos representan un porcentaje importante de las obras del proyecto de playa artificial (ver Figura 124).

Figura 124: Costos de alternativas planta de tratamiento y vertido en el mar.
(Fuente: Elaboración propia)



- Alternativa de Reutilización de Arenas

Efectuando una comparación de las alternativas de manejo, la alternativa de reutilizar las arenas contaminadas en obras del proyecto de playa artificial y de borde costero, presenta las mayores ventajas económicas y ambientales, ya que al reutilizar una parte importante del material que se encuentra contaminado en la playa, se obtienen menores costos por el manejo de las arenas y además no sería necesario trasladar las arenas a un botadero, evitando contaminar e intervenir un sector para albergar estas arenas.

Al reutilizar las arenas como material de relleno de las obras terrestres, no sólo se disminuyen los costos de manejo, sino que también los costos por concepto de relleno de las obras del proyecto de borde costero de MINVU. Además si se requiere aumentar el volumen de arenas a reutilizar, resulta más económico ampliar las obras del paseo costero, que manejar las arenas en una planta de tratamiento o verterlas en el mar.

En la reutilización de arenas mediante el relleno de las obras terrestres y nivelación de la playa, se considera encapsular y aislar las arenas contaminadas con un geotextil de separación, evitando el contacto con las personas e impidiendo que se mezclen con las arenas limpias.

Finalmente la alternativa de reutilizar las arenas en las obras de protección de la playa artificial, mediante la utilización de geotubos, corresponde una solución innovadora a nivel nacional, y de acuerdo a los análisis realizados, sería técnica y económicamente factible utilizar estos elementos para generar los núcleos de los rompeolas.

En la siguiente figura se muestra la distribución de las arenas reutilizadas para las alternativas de extracción analizadas, presentando los respectivos volúmenes de extracción y de reutilización.

Figura 125: Distribución general de arenas reutilizadas.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

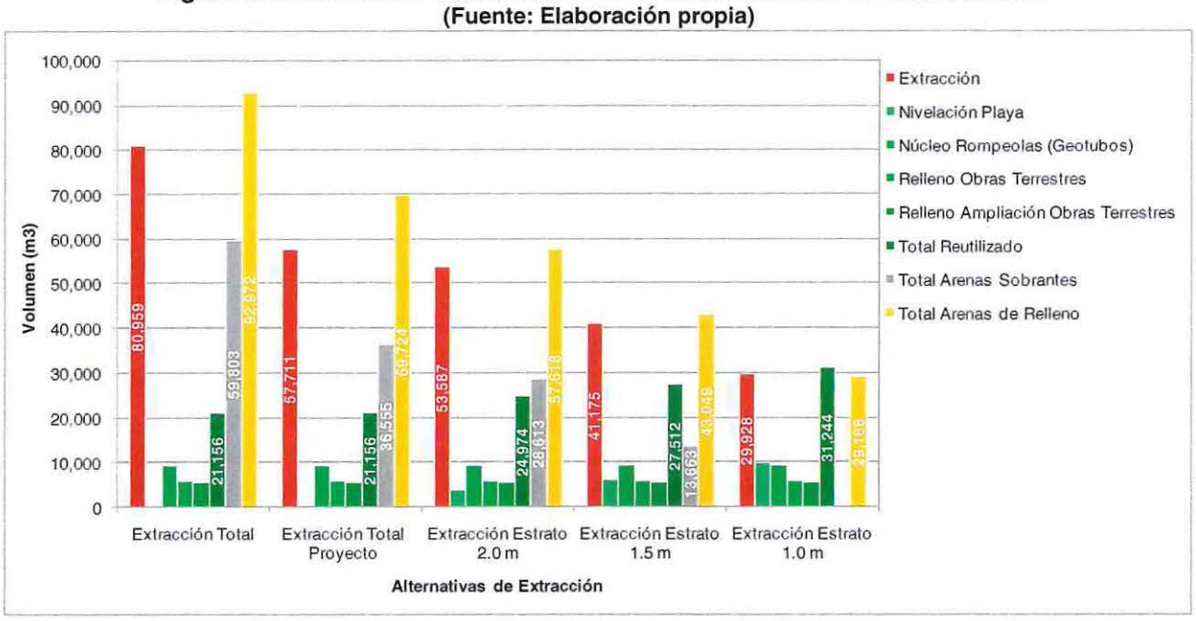
De acuerdo a los volúmenes de arenas que se pueden reutilizar, en cada alternativa de extracción se obtienen diferentes cantidades de material a manejar, para el caso de la alternativa de generar un estrato de 1.00 m de arenas limpias, se podrían reutilizar todas las arenas que se extraerían, y de acuerdo a las necesidades de reutilización, faltarían incluso por extraer 1,326 m^3. Mientras que para las demás alternativas analizadas, los volúmenes de reutilización son inferiores a los volúmenes de extracción, generándose un material sobrante por manejar.

En la siguiente Tabla y Figura se muestran las cantidades totales de las arenas a manejar con las alternativas de reutilización, incorporando los volúmenes sobrantes por manejar y los volúmenes de las arenas limpias de relleno.

Tabla 47: Volúmenes totales de alternativas de reutilización.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	EXTRACCIÓN (M3)	ALTERNATIVAS DE REUTIIZACIÓN (M3)				TOTAL ARENAS REUTILIZADAS (M3)	TOTAL ARENAS SOBRANTES (M3)	TOTAL ARENAS DE RELLENO (M3)
		NIVELACIÓN PLAYA	NÚCLEO ROMPEOLAS (GEOTUBOS)	RELLENO OBRAS TERRESTRES	RELLENO AMPLIACIÓN OBRAS TERRESTRES			
Extracción Total	**80,959**	0	9,381	6,056	5,719	**21,156**	**59,803**	**92,972**
Extracción Total Proyecto	**57,711**	0	9,381	6,056	5,719	**21,156**	**36,555**	**69,724**
Extracción Estrato 2.0 m	**53,587**	3,818	9,381	6,056	5,719	**24,974**	**28,613**	**57,618**
Extracción Estrato 1.5 m	**41,175**	6,356	9,381	6,056	5,719	**27,512**	**13,663**	**43,049**
Extracción Estrato 1.0 m	**29,928**	10,088	9,381	6,056	5,719	**31,244**	**-1,316**	**29,168**

Figura 126: Gráfico de volúmenes totales de alternativas de reutilización.
(Fuente: Elaboración propia)

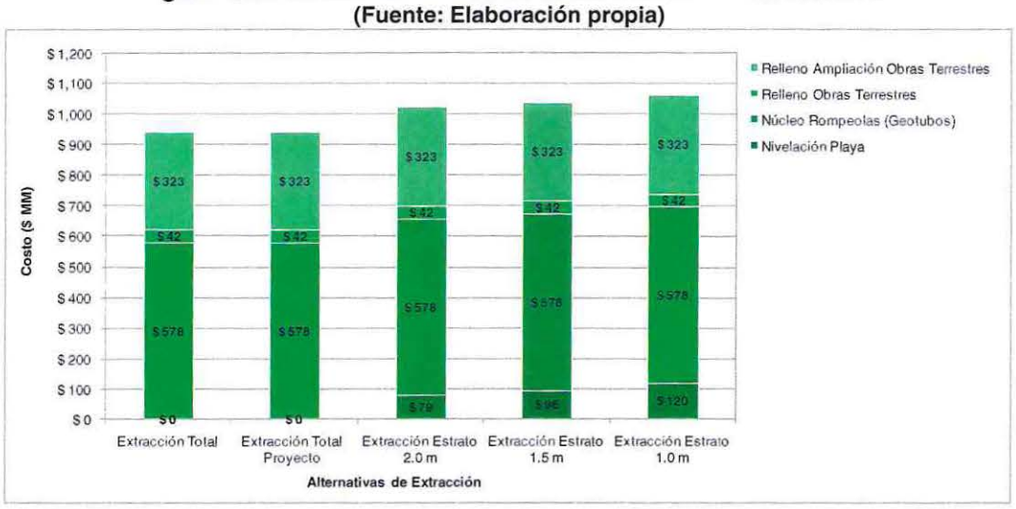


De acuerdo a los análisis de costos realizados, en la Tabla 48 y Figura 127 se resumen los costos totales que significaría el manejo de las arenas contaminadas a través de su reutilización.

Tabla 48: Costos de alternativas de reutilización.
(Fuente: Elaboración propia)

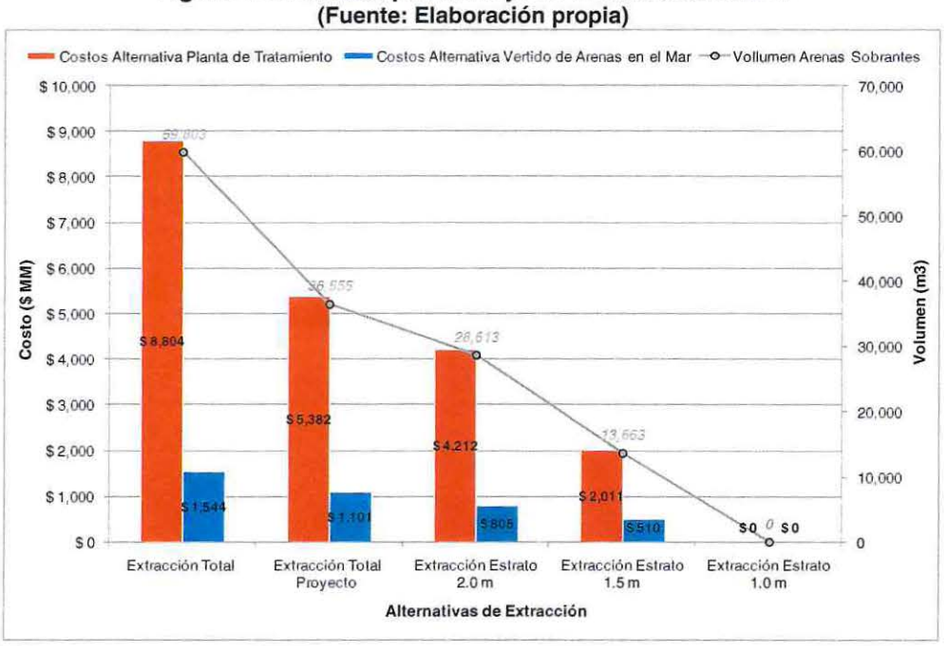
ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	TOTAL ARENAS REUTILIZADAS (M3)	COSTOS DE ALTERNATIVAS DE REUTIIZACIÓN				COSTO TOTAL REUTILIZADO
		NIVELACIÓN PLAYA	NÚCLEO ROMPEOLAS (GEOTUBOS)	RELLENO OBRAS TERRESTRES	RELLENO AMPLIACIÓN OBRAS TERRESTRES	
Extracción Total	21,156	$ 0	$ 578,463,300	$ 41,672,000	$ 322,588,719	**$ 942,724,019**
Extracción Total Proyecto	21,156	$ 0	$ 578,463,300	$ 41,672,000	$ 322,588,719	**$ 942,724,019**
Extracción Estrato 2.0 m	24,974	$ 79,497,000	$ 578,463,300	$ 41,672,000	$ 322,588,719	**$ 1,022,221,019**
Extracción Estrato 1.5 m	27,512	$ 95,860,524	$ 578,463,300	$ 41,672,000	$ 322,588,719	**$ 1,038,584,543**
Extracción Estrato 1.0 m	31,244	$ 120,040,152	$ 578,463,300	$ 41,672,000	$ 322,588,719	**$ 1,062,764,171**

Figura 127: Gráfico de costos de alternativas de reutilización.
(Fuente: Elaboración propia)



Como se mencionó anteriormente, en la mayoría de alternativas de extracción analizadas, se generará material sobrante por manejar. En la siguiente Figura se presentan los volúmenes y costos que significaría el manejo de las arenas sobrantes a través de las alternativas de planta de tratamiento y vertido en el mar.

Figura 128: Costos por manejo de arenas sobrantes.
(Fuente: Elaboración propia)



Con el objeto de poder comparar los costos de las alternativas de reutilización con las alternativas de planta de tratamiento y vertido en el mar, para éstas últimas se incorporan los costos relacionados con la no reutilización de arenas. Para el caso de las alternativas de reutilización, se incorporan los costos relacionados con el manejo de las arenas sobrantes mediante una planta de tratamiento y vertido de arenas en el mar. Es importante mencionar que para las tres alternativas de manejo, se incorporan los costos por el depósito de las arenas limpias de relleno requeridas para generar la playa artificial.

Figura 129: Costos totales de alternativa planta de tratamiento con manejo de arenas no reutilizadas.
(Fuente: Elaboración propia)

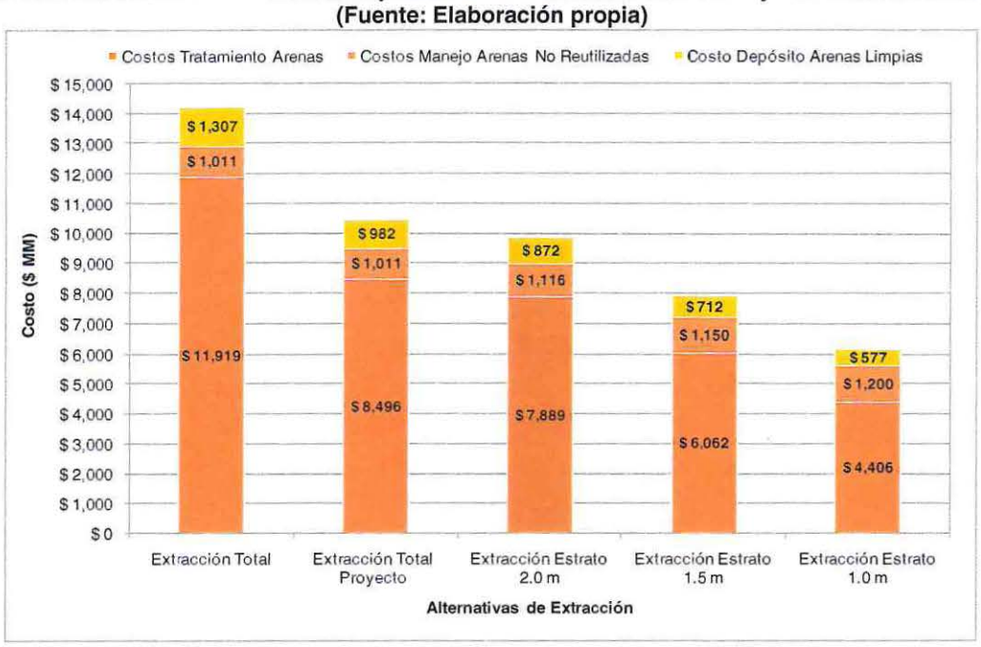
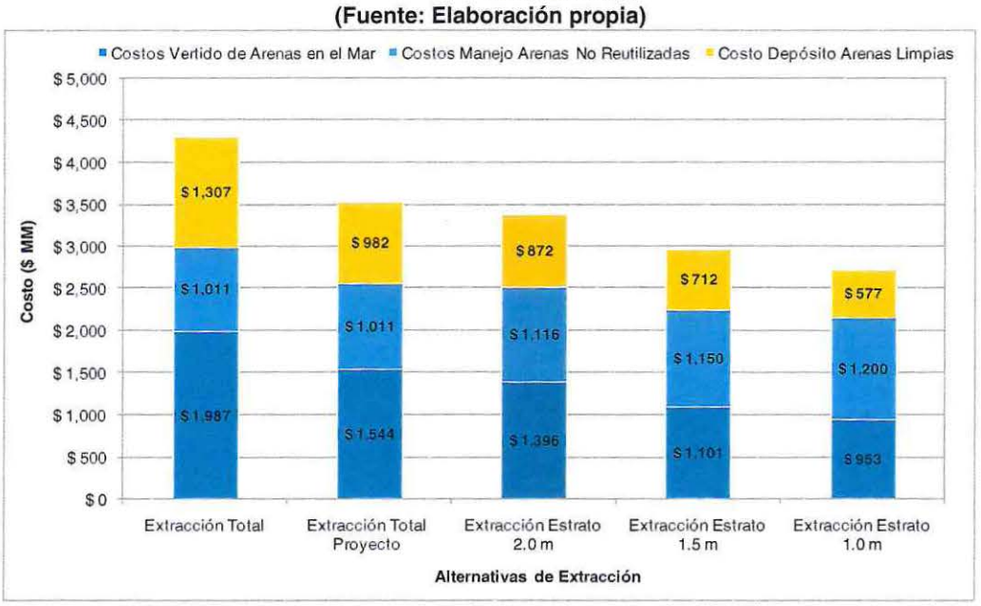


Figura 130: Costos totales de alternativa vertido de arenas en el mar con manejo de arenas no reutilizadas.
(Fuente: Elaboración propia)



En Figura 131 y Figura 132 se presentan los costos totales de las alternativas de reutilización, incorporando el manejo de las arenas sobrantes con una planta de tratamiento y vertido en el mar.

Figura 131: Costos totales de alternativa reutilización de arenas con manejo de arenas sobrantes mediante una planta tratamiento.
(Fuente: Elaboración propia)

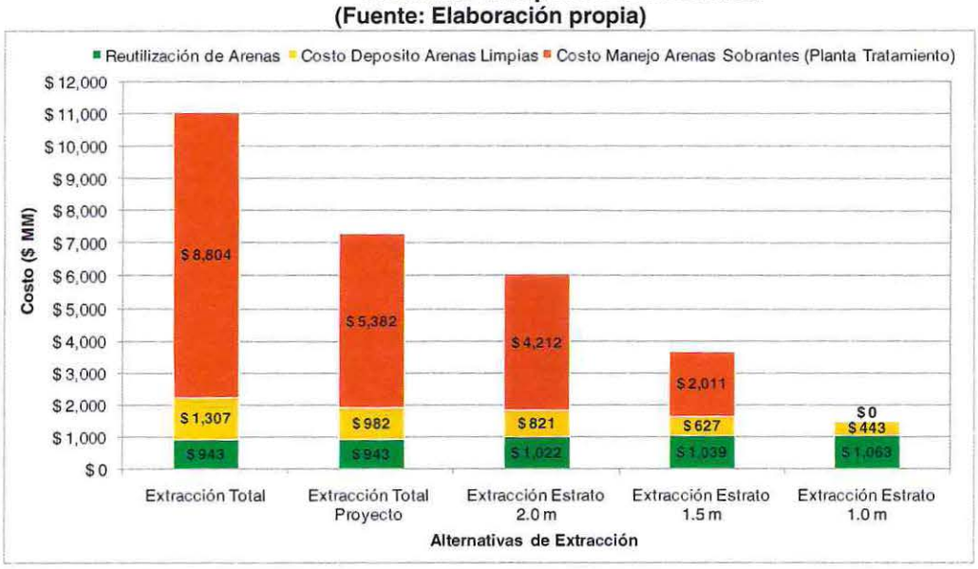
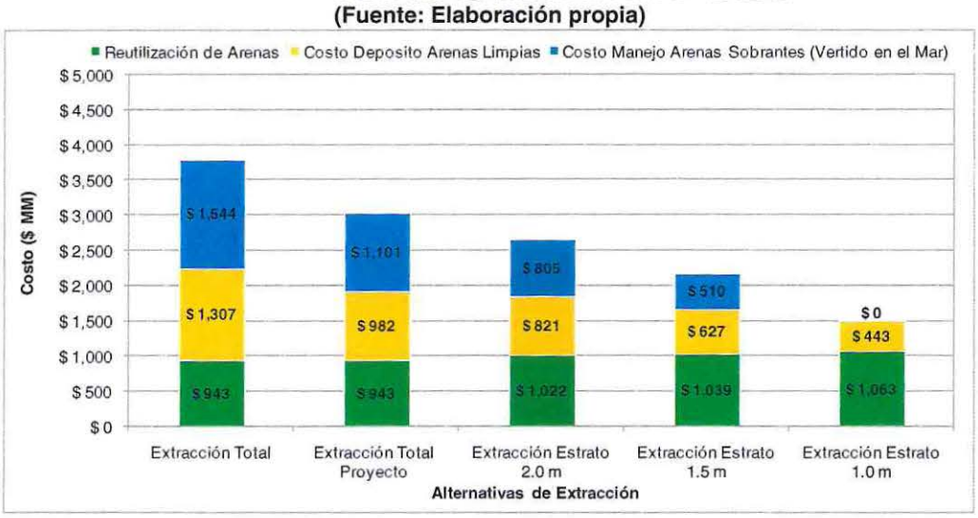


Figura 132: Costos totales de alternativa reutilización de arenas con manejo de arenas sobrantes mediante vertido de arenas en el mar.
(Fuente: Elaboración propia)



Al comparar los costos totales de las alternativas de manejo, se detecta que los menores costos se obtienen con la alternativa de reutilización de arenas, complementada con la alternativa de vertido de arenas en el mar para el manejo de las arenas sobrantes.

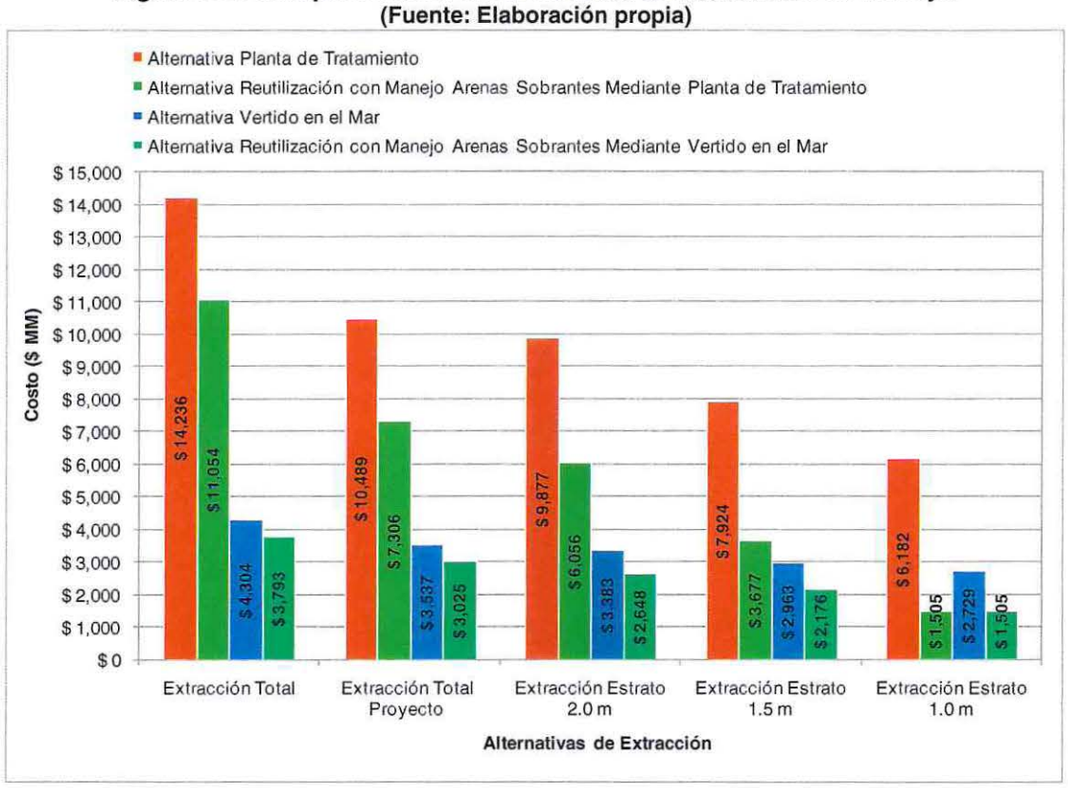
Los mayores costos para el manejo de arenas se obtienen con la alternativa de planta de tratamiento. Si bien los costos disminuyen al considerar la reutilización de arenas, éstos continúan siendo elevados para el desarrollo del proyecto de playa artificial, generando que la ejecución del proyecto sea económicamente inviable.

De acuerdo al costo directo considerado para el proyecto de playa artificial (aproximadamente $3,500 MM), se detecta que sólo para la alternativa de extraer todas las arenas de la playa, con las alternativas de manejo analizadas, se supera el costo considerado para todas las obras del proyecto. Si bien para el resto de las alternativas de extracción los costos son inferiores a los del

proyecto, a medida que disminuye el volumen de extracción, aumenta el presupuesto para la construcción de obras requeridas para la playa (Ver Figura 133).

Como se mencionó anteriormente, sólo con la alternativa de generar un estrato de 1.0 m de arenas limpias, se puede reutilizar un 100% de las arenas a extraer, obteniendo para esta alternativa el menor costo para el manejo de arenas y mayor margen para la construcción de obras, ya que al no generarse material sobrante, el manejo sólo se realiza con las alternativas de reutilización, permitiendo que el desarrollo del proyecto de playa artificial sea económicamente factible (Ver Figura 133).

Figura 133: Comparación de costos totales de alternativas de manejo.
(Fuente: Elaboración propia)



Por lo tanto, en base a los análisis realizados (técnicos y económicos), para el manejo de las arenas contaminadas que se encuentran en la playa El Salitre, se recomienda considerar las alternativas de reutilizar las arenas de la playa, solucionando los problemas ambientales de manera limpia e innovadora, generando que el proyecto de playa artificial sea ambiental y económicamente ejecutable por parte del MOP.

Para el manejo de las arenas sobrantes, arenas que serán extraídas y que no se podrán reutilizar en obras de ambos proyectos, se deberá considerar la alternativa que mejor cumpla con los requerimientos ambientales del proyecto, teniendo presente que por las elevadas concentraciones de metales pesados, no sería recomendable verter las arenas en el mar, teniendo que realizar el vertido en tierra, aumentando de forma considerable los costos para el manejo de arenas.

Otro punto importante a analizar, será la definición y selección de la alternativa de extracción a considerar, ya sea la extracción total de las arenas de la playa, sólo de las arenas que se intervienen con el proyecto, o bien extraer una parte de éstas, generando para esta última alternativa diferentes estratos de arenas limpias de relleno.

CAPÍTULO X

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se muestran las conclusiones y resultados relevantes de este estudio, incluyendo además recomendaciones generales relacionadas con el manejo más adecuado para las arenas contaminadas que se encuentran actualmente en la playa El Salitre.

10.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA PLAYA

Actualmente la playa presenta una problemática ambiental en la calidad de sus arenas, las cuales se encuentran contaminadas con elevadas concentraciones de metales pesados. Además posee una infraestructura deficiente, precaria y en total abandono. Como aspectos positivos se destaca su ubicación estratégica, ya que permite una accesibilidad y conexión del borde costero con la ciudad, además posee una geometría adecuada con espacio suficiente para habilitar una nueva playa para el sector.

10.2 CONDICIONES NATURALES

De acuerdo a la revisión de condiciones naturales del sector de estudio, se puede concluir que éstas no son perjudiciales para el desarrollo de un proyecto de playa artificial. El oleaje reinante no genera condiciones inseguras para el baño, corrientes de bajas intensidades, no presentándose corrientes de retorno que sean perjudiciales para los bañistas. El fondo marino se observa medianamente parejo, solo sectores con afloramientos que podrían ser peligrosos para los usuarios, siempre y cuando éstos no sean cubiertos y/o removidos en el proyecto de playa artificial.

10.3 CALIDAD AMBIENTAL DE SEDIMENTOS

En base a los análisis de calidad ambiental de los sedimentos de la playa El Salitre, se concluye que éstos presentan elevadas concentraciones de metales pesados. Al comparar estas concentraciones con normas internacionales, se detecta que las arenas tienen concentraciones elevadas de Cobre y Zinc, superando ampliamente los límites de estas normas. Se detecta además que las máximas concentraciones se encuentran en la zona seca de la playa, disminuyendo hacia el fondo marino. En base a la revisión bibliográfica e imágenes satelitales de la ciudad, se detecta que los bordes costeros del sector centro y norte de la ciudad también han sido alterados con metales pesados. Al parecer la presencia de estos metales estaría vinculada a faenas de cobre de la Compañía Minera Tocopilla, posiblemente iniciadas desde el año 1923 y de acuerdo a la Ref.1, hasta el año 1992 se continuaba vertiendo desechos químicos y relaves altamente contaminados directamente al mar.

Pese a que las arenas de la playa presentaron elevadas concentraciones de Cobre y Zinc, los resultados de los ensayos de desclasificación arrojaron que éstas no serían peligrosas, pudiéndose manejar como residuos industriales normales, no generando restricciones para su extracción.

10.4 VOLUMEN DE ARENAS CONTAMINADAS

Se estimó que el volumen total de arenas contaminadas que se encuentran actualmente en la playa es de aproximadamente 81,000 m^3.

Con el objeto de estimar el volumen de arenas contaminadas que se intervendrían directamente con el proyecto de playa artificial, se analizó una configuración de playa artificial, que responde a las necesidades de superficie y requerimientos de obras terrestres, basada en el proyecto base para el sector y en la aplicación de formulaciones empíricas para su equilibrio.

Considerando los elevados volúmenes de arenas contaminadas a manejar, se analizaron alternativas de extracción parcial de arenas, las cuales forman estratos de arenas limpias, permitiendo disminuir los volúmenes y costos por el manejo de las mismas.

10.5 ALTERNATIVAS DE MANEJO DE ARENAS CONTAMINADAS

Con el objeto de aminorar la problemática ambiental del sector y permitir que el proyecto de playa artificial sea económicamente ejecutable, se analizaron tres alternativas de manejo para las arenas contaminadas de la playa:

- Alternativa de Trasladar las Arenas a una Planta de Tratamiento

Básicamente esta alternativa considera trasladar las arenas de la playa a una planta de tratamiento de residuos mineros o industriales. Esta alternativa resulta ser técnicamente factible y ejecutable, sin embargo los altos costos económicos obtenidos, generan que el proyecto de playa artificial no sea económicamente factible, ya que sólo el tratamiento de la extracción mínima de arenas, (generar un estrato de 1.0 m arenas limpias), supera los costos de todas las obras consideradas para el proyecto de playa artificial, sin incluir los costos asociados por el depósito de arenas limpias.

- Alternativa de Verter las Arenas en el Mar

Con esta alternativa de manejo de arenas se obtienen costos menores respecto al traslado de arenas a una planta de tratamiento. Sin embargo, con el objeto de avanzar en materia ambiental, no se recomienda verter las arenas en el mar, ya que las concentraciones de metales pesados encontrados en las mismas, no cumplen con los estándares internacionales, pudiendo generar un grave daño al medio marino.

- Alternativa de Reutilización de Arenas

Se analizaron tres alternativas para reutilizar las arenas contaminadas en obras del proyecto de playa artificial y del proyecto de borde costero del MINVU, lo que permite obtener de forma directa ventajas ambientales y económicas.

La primera alternativa analizada se relaciona con reutilizar las arenas en la nivelación de la playa artificial, ya que la configuración propuesta modifica la orientación de la playa generando zonas que pueden ser niveladas con las arenas de la misma playa. Con esta alternativa se podrían reutilizar entre 3,800 y 10,000 m^3 de arenas contaminadas, lo que dependerá de la alternativa de extracción considerada.

La segunda alternativa analizada consistió en reutilizar las arenas en las obras de abrigo de la playa artificial. Para ello se analizó utilizar geotubos para generar los núcleos de los rompeolas de la playa, los cuales pueden ser llenados con las arenas existentes, ya que justamente unas de las mayores aplicaciones de estos elementos es confinar y consolidar sedimentos contaminados. Se realizaron modelaciones físicas a una sección de las obras de abrigo, concluyendo que los rompeolas con núcleo de geotubos no presentarían problemas de estabilidad, resultando técnicamente factible su utilización. Con esta alternativa se podrían reutilizar aproximadamente 9,380 m^3 de arenas contaminadas.

La tercera alternativa de reutilización, consistió en utilizar las arenas contaminadas como material de relleno de las obras terrestres del proyecto del MINVU. Técnicamente sería factible esta alternativa, ya que las obras de contención no presentarían problemas de estabilidad al utilizar las arenas contaminadas como material de relleno. En el proyecto original del MINVU se podrían albergar aproximadamente 6,000 m^3 de arenas contaminadas. Con el objeto de poder ampliar el volumen de reutilización de arenas, se analizaron dos alternativas de ampliación de obras de este proyecto, con las cuales se duplica el volumen de arenas reutilizadas, obteniendo un volumen total de arenas reutilizadas como material de relleno de aproximadamente 12,000 m^3.

Dependiendo de la alternativa de extracción a considerar, se obtienen un volumen total de arenas reutilizadas que varía aproximadamente desde 21,000 m^3 hasta 31,000 m^3.

10.6 COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE MANEJO

Los mayores costos para el manejo de las arenas contaminadas se obtienen con la alternativa de trasladar las arenas a una planta de tratamiento, generando que el proyecto de playa artificial sea económicamente inviable.

Si bien la alternativa de extraer y verter las arenas en el mar resulta ser más económica que trasladar las arenas a una planta de tratamiento, por las elevadas concentraciones de metales pesados, no se recomienda considerar esta alternativa.

Los menores costos para el manejo de las arenas contaminadas se obtienen con las alternativas de reutilización de arenas, los cuales incluso resultan ser menores o similares a sus mismas alternativas, ya que el costo de generar los rompeolas con núcleo de geotubos es similar a un rompeolas con núcleo de rocas, misma situación ocurre al utilizar las arenas como material de relleno de las obras terrestres, incluso resulta ser más económico ampliar las obras de paseo costero que trasladar las arenas a una planta de tratamiento.

10.7 RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL PROYECTO DE PLAYA ARTIFICIAL

- En base a los análisis realizados, se recomienda que el manejo de las arenas contaminadas que se encuentran en la playa El Salitre, se realice mediante la aplicación de las alternativas de reutilización de arenas, las cuales solucionan los problemas ambientales de manera limpia e innovadora, permitiendo que el proyecto de playa artificial sea ambientalmente sustentable y económicamente ejecutable para el Ministerio de Obras Públicas.
- Respecto a las alternativas de extracción analizadas, se deberá seleccionar la alternativa que mejor cumpla con los requerimientos ambientales y económicos del proyecto, si bien lo más óptimo es extraer todas las arenas que se encuentran en la playa, se puede extraer una parte de éstas, generando un estrato de arenas limpias para la playa artificial.
- Se debe tener presente que en la mayoría de las alternativas de extracción analizadas, no se podrá reutilizar todas las arenas que se extraerían de la playa, generándose cantidades considerables de arenas sobrantes. Para el manejo del material sobrante se deberá analizar y seleccionar la alternativa que resulte ser más favorable para el proyecto, teniendo presente que por las elevadas concentraciones de metales pesados que poseen las arenas, no sería recomendable verter estas arenas en el mar, teniendo que realizar el vertido en tierra, lo que aumentaría el costo para el manejo de las arenas.

- Todas las alternativas analizadas consideran la extracción o movilización de las arenas existentes en la playa, y de acuerdo a la legislación ambiental vigente, se deberán realizar estudios ambientales para determinar los daños que se podrían generar a una posible biota marina existente, pudiendo incluso relocalizar algunas especies.
- Para la reutilización óptima de las arenas como material de relleno de las obras terrestres, se recomienda que el proyecto del MINVU se materialice al mismo tiempo que el proyecto de playa artificial.
- En el caso de no considerar la extracción de todas las arenas que se encuentran en la playa, se debe tener presente que en el sector norte, a un costado del rompeolas, no se estaría efectuando una intervención ni manejo de arenas. Por lo anterior para el proyecto de playa artificial, se recomienda incorporar el manejo de las arenas de este sector, mediante el depósito de arenas limpias con un geotextil de separación, o bien, ampliar las obras del proyecto del MINVU ganando una mayor superficie al mar y aumentando el volumen de arenas que se podrían utilizar como material de relleno en estas obras.
- Para el proyecto de playa artificial, se recomienda realizar un análisis de calidad ambiental para las arenas limpias que serán depositadas en la habilitación de la nueva playa artificial. Además se recomienda realizar un seguimiento a la calidad ambiental de estas arenas, las cuales podrían ser afectadas por transporte de arenas existentes en el fondo marino o bien por procedimientos inadecuados en la carga de minerales de cobre que pudiesen realizar en el puerto de Tocopilla u otro terminal.

10.8 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Otras Alternativas de Manejo

Las alternativas de manejo que se analizaron y estudiaron en el presente documento, están relacionadas con alternativas que podían ejecutarse en el proyecto de diseño de la playa artificial. Sin embargo, se podrían efectuar futuras investigaciones de alternativas, tales como:

- Faenas Mineras para Recuperación de Metales Pesados

Mediante faenas de recuperación de metales pesados, se podrían limpiar y extraer los metales de cobre que se encuentran en las arenas de la playa, lo que podría ejecutarse a través de un convenio con alguna empresa minera de la zona. Esta alternativa podría aplicarse para dos objetivos, el primero y el principal, poder extraer la mayor parte del cobre, para poder reducir las concentraciones de éste a no más de 50 mg/kg, y así poder utilizar las arenas para la generación de playas. En el caso de que las concentraciones disminuyeran y no pudiesen ser inferiores al límite antes mencionado, éstas podrían cumplir con las categorías adecuadas para efectuar el vertido de las arenas al mar o trasladar las arenas a un botadero autorizado, minimizando de forma considerable los posibles efectos negativos al medio marino y terrestre.

- Mezcla de Arenas Limpias con Arenas Contaminadas

Con el objeto disminuir las concentraciones de los metales pesados que se encuentran en las arenas de la playa, podría estudiarse la alternativa de mezclar las arenas contaminadas con arenas limpias. Esta alternativa podría ser considerada para el manejo de las arenas sobrantes, pudiendo así verter las arenas en el mar o bien trasladar las arenas a un botadero autorizado, ya que con la mezcla de arenas podrían disminuirse los efectos negativos sobre el medio marino o terrestre.

Es importante tener presente que por las elevadas concentraciones de cobre que poseen las arenas (promedio 5,800 mg/kg), el volumen de arenas limpias requerido para efectuar la mezcla sería significativo, por lo que se deben considerar costos adicionales por concepto de arenas limpias y aumentarían los costos por el vertido o traslado de arenas. A pesar de lo anterior, con esta alternativa los costos serían inferiores a los obtenidos con la alternativa de trasladar las arenas sobrantes a una planta de tratamiento.

- Generación de Hormigones con Arenas Contaminadas

La generación de hormigones con arenas de playa puede que haya sido materia de estudio o aplicado en algunas obras nacionales o extranjeras. Sin embargo, es importante mencionar y tener presente la normativa nacional que regula esta materia (Norma NCh 163 "Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales"), en la cual menciona que los áridos deben estar limpios de sales. Esta restricción podría subsanarse analizando y estudiando la eliminación de sales mediante un proceso químico, lo que permitiría generar hormigones con este tipo de áridos. Alternativamente, podría estudiarse la generación de obras que requieran hormigones de menor calidad. Para ambos casos, se recomienda efectuar ensayos en laboratorio para verificar la calidad y dureza del hormigón obtenido.

- Estudiar el Comportamiento de Playas sobre Arenas Confinadas con Geotextil

En el presente documento se analizó la alternativa de extraer una parte de los sedimentos que se encuentran en la playa, para posteriormente depositar una capa arenas limpias. Previo al depósito de las nuevas arenas, se recomendó la colocación de un material que aislé y confiné las arenas contaminadas (geotextil de separación), evitando así la mezcla de las arenas limpias con las contaminadas. Sin embargo, esta alternativa no fue estudiada ni justificada técnicamente, sólo fue planteada para fundamentar y desarrollar las alternativas de extracción parcial de arenas. Es por ello que se recomienda investigar y estudiar el comportamiento de las arenas de playa sobre geotextiles, lo que podría realizarse mediante modelos físicos.

CAPÍTULO XI

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ref.1 BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2008. Contaminación en la Segunda Región. Anexo 3901. 30p.

Ref.2 BORDEMAR INGENIERÍA, 2009. Estudio Topo-batimétrico de Playa El Salitre, elaborado para GHD S.A. 58p.

Ref.3 BORDEMAR INGENIERÍA, 2009. Estudio de Corrientes Lagrangianas de Playa El Salitre, elaborado para GHD S.A. 11p.

Ref.4 BORDEMAR INGENIERÍA, 2009. Medición de Marea en Tocopilla, elaborado para GHD S.A. 5p.

Ref.5 CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT (CCME). 2002. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. 7p.

Ref.6 CEDEX, 2004. Guía metodológica para la realización de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas. 41p.

Ref.7 CEDEX, 2004. Master en Ingeniería de Puertos y Costas, Sección I: Conceptos Generales y Caracterización del Medio Vol. 2254p.

Ref.8 CESMEC, 2011. Informe de Ensayo SQC-21754, elaborado para GHD S.A. 21p.

Ref.9 DIRECCIÓN GENERAL DEL TERRITORIO MARÍTIMO Y DE MARINA MERCANTE DE CHILE, 2007. Procedimientos a seguir para el cumplimiento de las disposiciones respecto al vertido de desechos y otras materias contaminantes. 6p.

Ref.10 ECOTECNOS, 2009. Caracterización Columna De Agua y Sedimentos Marinos Playa El Salitre, elaborado para GHD S.A. 86p.

Ref.11 GESAMP (Grupo Mixto de Expertos OMI/FAO/Unesco/OMM/OIEA/Naciones Unidas/PNUMA sobre aspectos Científicos de la Contaminación de las Aguas del Mar). 1991. Informe del 21° período de sesiones, Londres, 18-22 de febrero de 1991. 44p.

Ref.12 GHD S.A., 2011. Base de Precios Unitarios Proyecto Playa Artificial El Salitre. 15p.

Ref.13 GHD S.A., 2009. Estudio de Oleaje Playa El Salitre. 49p.

Ref.14 GHD S.A., 2009-2011. Proyecto de Diseño de Playa Artificial El Salitre. Etapa I. 140p, Etapa II. 133p, Etapa III. 109p, Etapa IIIA. 98p y Etapa IV. 28p.

Ref.15 GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS, 2000. Documento Temático de Regeneración de Playas. Universidad de Cantabria. 211p.

Ref.16 GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS, 2000. Documentos de Referencia. Volumen I 580p, II 411p, III 302p y IV 178p. Universidad de Cantabria.

Ref.17 FACULTAD DE BIOLOGÍA Y DE QUÍMICAS, UNIVERSIDAD DE VALENCIA. Guía Metodológica para el Estudio de Impacto Ambiental sobre el Medio Marino por Regeneraciones de Playa. 116p.

Ref.18 HIDRONOR CHILE S.A., 2010. Cotización para Tratamiento y Disposición de las Arenas de Playa El Salitre. 7p.

Ref.19 HIDRONOR CHILE S.A., 2010. Cotización para Transporte de las Arenas de Playa El Salitre. 75p.

Ref.20 INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA, 2010. Diagnóstico del Comportamiento de las Arenas de las Playas Artificiales de la II Región, 248p.

Ref.21 INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA, 2010. Estudio en Modelo Físico Bidimensional Playa El Salitre, elaborado para GHD S.A. 96p.

Ref.22 KUADRANTE INGENIERÍA, 2009. Estudio de Mecánica de Suelos Playa El Salitre, elaborado para GHD S.A. 28p.

Ref.23 MEDINA, R., 2001. Modelado de la Morfodinámica de Playas por Medio de Formulaciones de Equilibrio. Universidad de Cantabria. 30p.

Ref.24 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS, 1998. Proyecto de Protección y Mejoras de la Playa El Salitre de Tocopilla.

Ref.25 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS-DIRECCIÓN DE VIALIDAD, 2008. Manual de Carreteras Volumen N°3. 1468p.

Ref.26 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS, 2012. Presentación "Experiencia de la DOP en el Diseño de Playas Artificiales".

Ref.27 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE - DIRECCIÓN GENERAL DE COSTAS - ESPAÑA, 2008. Directrices Sobre Actuaciones en Playas.

Ref.28 MOPU, 1990. ROM 0.2-90: Acciones en el Proyecto de obras Marítimas y Portuarias, 272p.

Ref.29 NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 1999, Sediment quality guidelines developed for the National Status and Trends Program. 12p.

Ref.30 POLIS ARQUITECTURA, 2010, Planos de Proyecto Mejoramiento Borde Costero Centro y Norte, Tocopilla, elaborado para MINVU II Región.

Ref.31 Resolución Exenta N° 1152. 2006. Norma Secundaria de Calidad Ambiental para Sedimentos Marinos en la Región de Aysén. [http://www.eclac.cl/ilpes/noticias/paginas/4/39104/Cuadros-_DIA_2_conama.pdf]. Revisado: octubre 2010.

Ref.32 RUBIO, B., L. GAGO, F. VILAS, M. NOMBELA, S. GARCIA-GIL, I. ALEJO Y O. PAZOS, 1996. Interpretación de tendencias históricas de contaminación por metales pesados en testigos de sedimentos de la Ría de Pontevedra. Thalassa.

Ref.33 SEREMI DE SALUD DE LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA., 2011, Resolución Exenta N° 1411 de 05/05/2011. 2p.

Ref.34 SERVICIO AÉREO FOTOGRAMÉTRICO (SAF). Imágenes Aéreas de Tocopilla, años 1980, 1998 y 2005.

Ref.35 SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA (SHOA). Tablas de Marea años 2007, 2008 y 2009.

Ref.36 SHORE PROTECTION MANUAL, 1984. Vol II. Structure Design: Physical factor. Stability of Rubble Structures. 640p.

Ref.37 USACE, 2003. Coastal Engineering Manual. Vol. II parte 4, Surf Zone Hydrodynamics, 42p.

Ref.38 VICENTE NEGRO V Y OVIDIO VARELA C., 2002. Diseño de Diques Rompeolas. 364p.

Ref.39 Y.GODA, 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. 462p.

CAPÍTULO XII

12. ANEXOS

12.1 ESTIMACIÓN DE ENROCADOS PARA ROMPEOLAS

12.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

12.1.1.1 VIDA ÚTIL

La vida útil corresponde al tiempo en que se estima que la obra se mantenga operativa, para el cálculo de esta variable se utilizó la Ref.28 (MOPU, 1990. ROM 0.2-90: Acciones en el Proyecto de obras Marítimas y Portuarias, 272p.), la cual recomienda una vida útil mínima que depende del tipo de obra a proyectar y de los niveles de seguridad requeridos.

El proyecto corresponde a una obra de carácter general, la cual no está ligada a una explotación industrial y considerando un nivel de seguridad con un bajo riesgo de pérdidas humanas (Nivel 1), se obtiene una vida útil mínima de 25 años.

Tabla 49: Vidas útiles mínimas recomendadas por la ROM. (Fuente: Ref.28)

TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

LEYENDA:

INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECIFICO:
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...).

NIVEL 1:
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...).

NIVEL 2:
Obras e instalaciones de interés general.
Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

NIVEL 3:
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

12.1.1.2 RIESGO

De acuerdo a la Ref.28(ROM 02-90), se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o factibilidad de reparación de la estructura.

Las obras a proyectar poseen características de obras flexibles, semi-rígidas con una rotura general reparable, para lo cual se adopta un riesgo de iniciación de averías. Además considerando que el riesgo de pérdidas humanas es reducido, y que en caso de inutilización de la obra, la repercusión económica sería media, con lo que se obtiene un riesgo de un 30%.

Tabla 50: Riesgos máximos admisibles recomendados por la ROM 02-90.
(Fuente: Ref.28)

a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS

		POSIBILIDAD DE PERDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
Indice $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	ALTA	0,25	0,15

b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL

		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
Indice r: $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	ALTA	0,10	0,05

12.1.1.3 PERIODO DE RETORNO

En base al riesgo y la vida útil proyectada de la obra y utilizando la Ref.28 (ROM 02-90), se calculó el periodo de retorno, el cual presenta la siguiente formulación:

Ecuación 8: Periodo de retorno.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{Lf} \approx 1 - e^{-\left(\frac{Lf}{Tr}\right)} \quad \Rightarrow \quad Tr = -\frac{Lf}{\ln(1-R)}$$

Por lo tanto con una vida útil de 25 años y un riego de un 30%, se obtiene un periodo de retorno de 70 años.

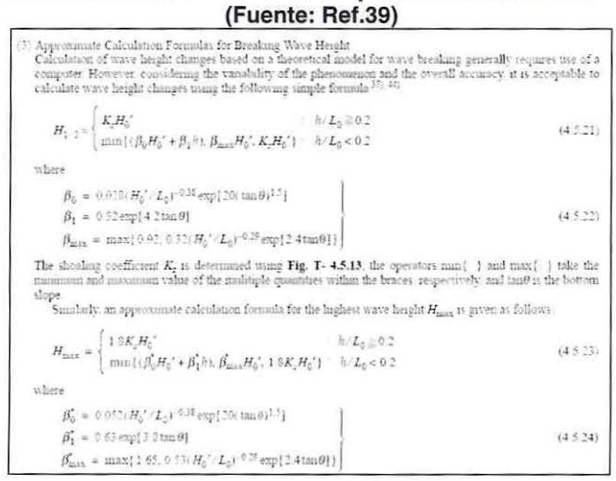
12.1.1.4 OLEAJE DE DISEÑO

De acuerdo a las características de las obras de abrigo, el oleaje de diseño en la zona cercana posee una altura 3.40 m con un periodo característico de 17 segundos.

- Oleaje al Pie

Del análisis de valores extremos propagados a una zona cercana al sitio de estudio, se cuantificó el efecto del oleaje de diseño con las futuras obras, utilizando el método de Goda (Ref.39), el cual considera la interacción del oleaje- estructura, transformando la altura de ola a través de efectos de shoaling y rotura.

Figura 134: Formulaciones de Goda para determinar altura al pie.
(Fuente: Ref.39)



(3) Approximate Calculation Formulas for Breaking Wave Height

Calculation of wave height changes based on a theoretical model for wave breaking generally requires use of a computer. However, considering the variability of the phenomenon and the overall accuracy, it is acceptable to calculate wave height changes using the following simple formula[35), 44)]:

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{max} H_0', K_s H_0'\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (4.5.21)$$

where

$$\left.\begin{aligned} \beta_0 &= 0.028(H_0'/L_0)^{-0.38}\exp[20(\tan\theta)^{1.5}] \\ \beta_1 &= 0.52\exp[4.2\tan\theta] \\ \beta_{max} &= \max[0.92, 0.32(H_0'/L_0)^{-0.38}\exp[2.4\tan\theta]] \end{aligned}\right\} \quad (4.5.22)$$

The shoaling coefficient K_s is determined using **Fig. T- 4.5.13**, the operators min{ } and max{ } take the minimum and maximum value of the multiple quantities within the braces respectively, and $\tan\theta$ is the bottom slope.

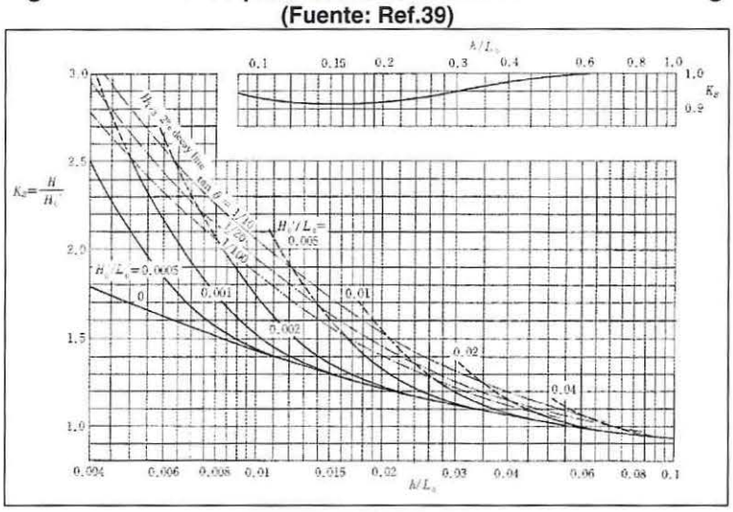
Similarly, an approximate calculation formula for the highest wave height H_{max} is given as follows:

$$H_{max} = \begin{cases} 1.8 K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0^* H_0' + \beta_1^* h), \beta_{max}^* H_0', 1.8 K_s H_0'\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (4.5.23)$$

where

$$\left.\begin{aligned} \beta_0^* &= 0.052(H_0'/L_0)^{-0.38}\exp[20(\tan\theta)^{1.5}] \\ \beta_1^* &= 0.63\exp[3.8\tan\theta] \\ \beta_{max}^* &= \max[1.65, 0.53(H_0'/L_0)^{-0.38}\exp[2.4\tan\theta]] \end{aligned}\right\} \quad (4.5.24)$$

Figura 135: Grafico para determinar coeficiente de shoaling.
(Fuente: Ref.39)



Este método incluye el efecto de shoaling, por lo cual la altura de oleaje en la zona cercana solo debe estar afectada por refracción y difracción. Como el modelo de propagación incluye los efectos refracción, difracción y shoaling, a la altura de oleaje obtenida en el nodo de interés se le debe eliminar este último efecto.

La pendiente desde el nodo de extracción hasta la ubicación de las futuras obras es de aproximadamente 4% (tanα=0.04).

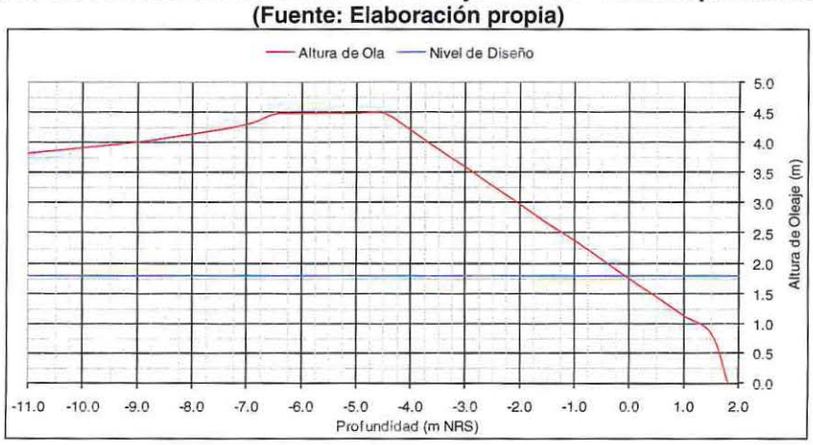
Siendo conservadores para el cálculo de la altura de ola al pie de las obras, se consideró un nivel máximo de la superficie del agua de +1.80 mNRS, el cual estaría generado por efectos astronómicos y un posible efecto meteorológico.

La profundidad del nodo de extracción es de aproximadamente -11.00 mNRS.

La profundidad al pie de los rompeolas es variable y aumenta a medida que las obras se internan en el mar, y dependiendo de la profundidad depende la altura de la ola y a su vez el tamaño del enrocado. Es por ello que se analizó la evolución de la altura de ola con la profundidad.

A continuación se presenta de forma gráfica la evolución de la altura del oleaje de diseño con la profundidad:

Figura 136: Evolución de la altura de oleaje de diseño con la profundidad.
(Fuente: Elaboración propia)



De la Figura anterior, se observa que el oleaje de diseño genera su rompimiento entre los veriles -6.50 y 5.50 mNRS, presentándose en este tramo la máxima altura de oleaje en rompiente de 4.50 m.

12.1.2 DISEÑO DE ELEMENTOS DE CORAZA

Para el cálculo del peso de los elementos de la coraza, se utilizó la referencia Ref.38: VICENTE NEGRO V Y OVIDIO VARELA C., 2002. Diseño de Diques Rompeolas. 364p., en la cual se hace referencia para el cálculo de los elementos de la coraza la fórmula de Hudson:

Ecuación 9: Formulación de Hudson.

$$W_{50} = \frac{\gamma \cdot H^3}{K_D \cdot cotg\alpha \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1\right)^3}$$

Donde:

W_{50} : Peso medio de los elementos de la coraza.

γ : Peso específico del elemento.

γ_w : Peso específico del agua de mar.

H : Altura de ola de diseño.

K_D : Coeficiente de estabilidad de Hudson.

$cotg\alpha$: Talud coraza del rompeolas.

El coeficiente de estabilidad (K_D), se determina en función de las partes de la estructura (tronco o cabezo del dique), tipo de pieza, forma de colocación, numero de capas, talud, naturaleza del oleaje (roto o no roto).

El diseño de la coraza se realiza para un talud de coraza 2:1.

Tabla 51: Coeficiente de estabilidad para los elementos de rocas.
(Fuente: Ref.38)

Tabla 5.7. VALORES DE LA CONSTANTE DE ESTABILIDAD DE HUDSON (RECOMENDACIÓN) [20]

CRITERIO DE INICIACION DE AVERIAS SIN REBASE

Tipo de cantos	Num. capas	Colo-cacion	C. del dique Kd Rota	C. del dique Kd No Rota	Morro del dique Kd Rota	Morro del dique Kd No rota	Talud cotg(@)
Escollera. Nat.							
Lisa red.	2	Rand.	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3.0
Lisa red.	>3	Rand.	1.6	3.2	1.4	2.3	
					1.9	3.2	1.5
Rug. ang.	2	Rand.	2.0	4.0	1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.0
Rug. ang.	>3	Rand.	2.2	4.5	2.1	4.2	
Rug. ang.	2	Espc	5.8	7.0	5.3	5.4	
Tetrapo.					5.0	6.0	1.5
y	2	Rand.	7.0	8.0	4.5	5.5	2.0
Quadrip.					3.5	4.0	3.0

Dependiendo de las profundidades de las obras de abrigo, para cada rompeolas se dividieron en diferentes tramos, los cuales poseerán diferentes tipos de enrocados.

A continuación se presenta el peso medio de los enrocados obtenidos para los diferentes tramos analizados:

Tabla 52: Estimación de pesos de los elementos de coraza.
(Fuente: Elaboración propia)

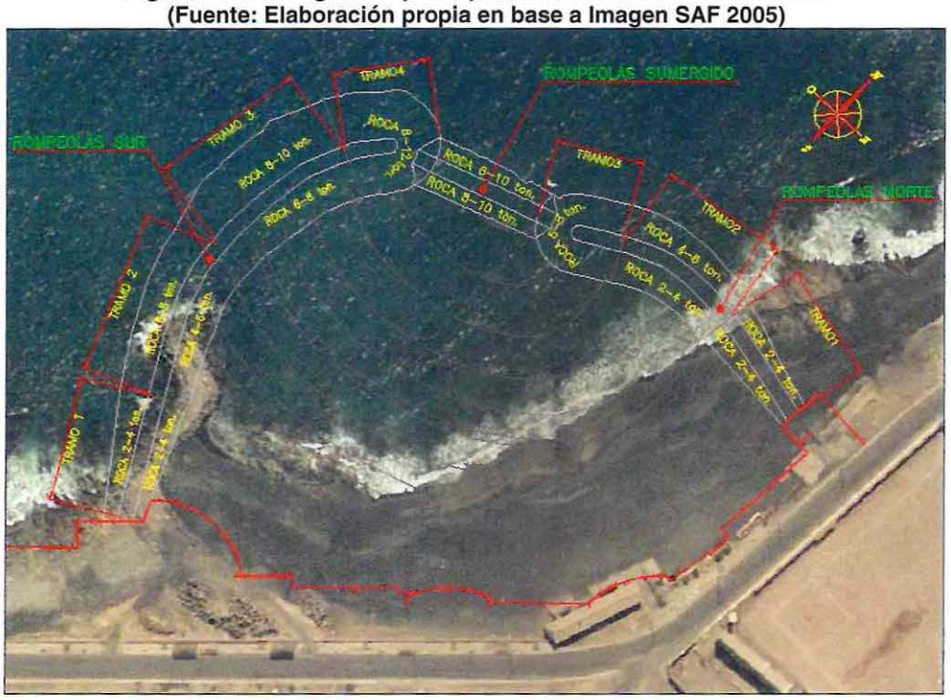
	Rompeolas Norte			Rompeolas Sur			Rompeolas Sumergido		
	Profundidad Pie (mNRS)	$H_{DISEÑO}$ (m)	W_{50} (ton)	Profundidad Pie (mNRS)	$H_{DISEÑO}$ (m)	W_{50} (ton)	Profundidad Pie (mNRS)	$H_{DISEÑO}$ (m)	W_{50} (ton)
Tramo 1	0.00	2.00	1.4	-1.20	2.50	2.6	-3.4	3.8	9.1
Tramo 2	-2.00	2.98	4.4	-2.90	3.50	7.3	/	/	/
Tramo 3	-2.20	3.10	6.2	-5.00	4.50	6.0*	/	/	/
Tramo 4	/	/	/	-5.00	4.50	6.0*	/	/	/

(*) En el cálculo de los tramos finales del rompeolas sur (tramos 3 y 4), se utilizó un coeficiente de estabilidad de colocación especial del elemento. Por lo tanto la colocación de las rocas debe ser con su eje mayor dispuesto en forma perpendicular a la dirección de los frentes de oleaje. En el caso de no cumplir fielmente esta colocación especial, y considerando los tonelajes de las rocas de los cabezos de los rompeolas de las playas Trocadero (7-12 ton.) y Covadonga (8-12 ton), se estimó conveniente aumentar el tonelaje de los tramos finales del rompeolas sur con rocas entre 8 a 12 ton, lo que fue ajustado en la modelación física con rocas entre 8 a 10 ton. A continuación se presenta los rangos de los pesos considerados para las rocas de coraza.

Tabla 53: Rangos de peso para los elementos de coraza.
(Fuente: Elaboración propia)

	Rompeolas Norte (Ton)	Rompeolas Sur (Ton)	Rompeolas Sumergido (Ton)
Tramo 1	2 - 4	2 - 4	8 - 10
Tramo 2	4 - 6	6 - 8	/
Tramo 3	6 - 8	8 - 12	/
Tramo 4	/	8 - 12	/

Figura 137: Rangos de peso para los elementos de coraza.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)



12.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MURO DE CONTENCIÓN

12.2.1 PARÁMETROS GEOTECNICOS DE LOS SUELOS DE RELLENO

12.2.1.1 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE LAS ARENAS EXISTENTES EN LA PLAYA

De acuerdo a la Ref.22, las arenas existentes en la playa poseen un ángulo de roce interno (ø) de aproximadamente 31°, con un específico es de 1.8 ton/m^3.

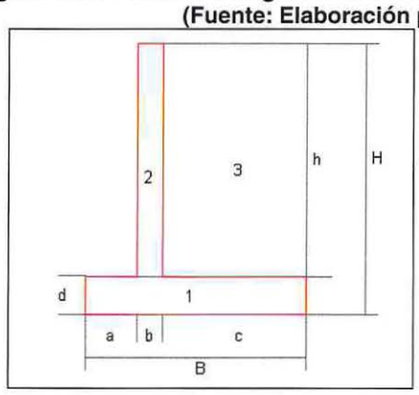
12.2.1.2 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE UN RELLENO GRANULAR

Para el análisis se considera un relleno granular, con ángulo de fricción interna (ø) de 42°, con un peso específico de 2.2 ton/m^3.

12.2.2 GEOMETRÍA DEL MURO

En la siguiente Figura se muestran los parámetros geométricos del muro de contención a analizar:

Figura 138: Parámetros geométricos de muro de contención.
(Fuente: Elaboración propia)



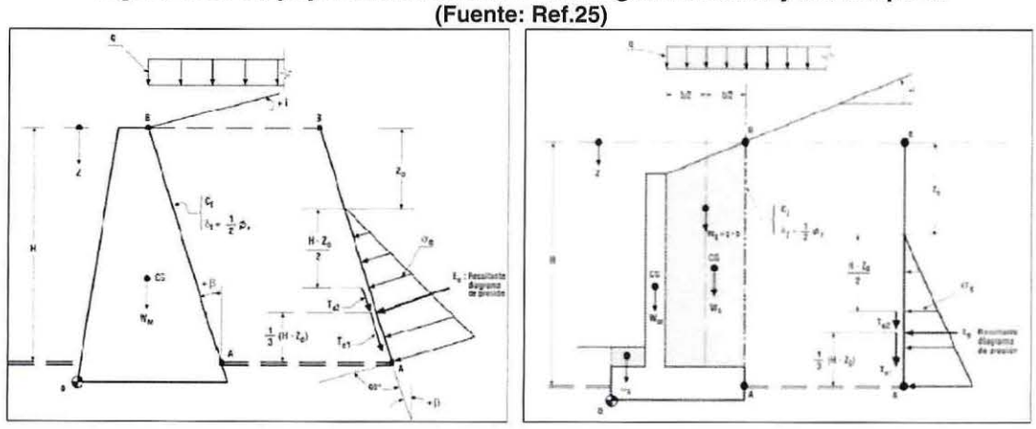
	Unidad m
a	*0.40*
b	*0.20*
c	*1.10*
d	*0.30*
h	*1.60*
H	*1.90*
B	*1.70*

12.2.3 CASO ESTÁTICO

- Empuje Activo

En la siguiente Figura se presentan los empujes que actúan sobre el muro para el caso estático:

Figura 139: Empujes estativos sobre muro gravitacional y muro tipo L.
(Fuente: Ref.25)



De acuerdo a la referencia antes mencionada, el empuje del suelo estático es:

Ecuación 10: Empuje de suelo estático.

$$\sigma_e = [(\gamma H + q)K_e - 2C\sqrt{K_e}]cos\delta_f \quad \left[{}^{ton}/_{m^2}\right]$$

Considerando un relleno sin cohesión, la resultante del empuje estático es:

Ecuación 11: Resultante de empuje suelo estático sin cohesión.

$$E_e = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_e + qHK_e \qquad \left[{}^{ton}/_{m}\right]$$

Donde

γ= Peso unitario del relleno retenido en [ton/m^3]

H = Altura definida en Figura 139.

q = sobrecarga (ton/m^2)

C = Cohesión del material de relleno

Ke = Coeficiente de empuje estático:

Ecuación 12: Coeficiente de empuje estático.

$$K_e = \left[\frac{\frac{1}{cos\beta}\,cos(\beta - \emptyset)}{\sqrt{cos(\beta + \delta_f)} + \sqrt{\frac{sen(\emptyset+\delta_f)\,sen(\emptyset-i)}{cos(\beta-i)}}}\right]^2 cos\beta$$

β = Ángulo definido en Figura 139, correspondiente a la inclinación de la cara interior del muro.

i = Ángulo definido en Figura 139, correspondiente a la inclinación del relleno con respecto a la horizontal.

$\emptyset$= Angulo de roce interno del suelo de relleno.

δ_f= Angulo de fricción entre el relleno y el muro, para efector de diseño se considera:

Ecuación 13: Ángulo de fricción entre el relleno y el muro.

$$\delta_f = \frac{1}{2}\emptyset$$

- Empuje Pasivo

Para el análisis de estabilidad conservadoramente, no se considera la acción del empuje pasivo.

- Verificación de Estabilidad al Deslizamiento Caso Estático:

Ecuación 14: Verificación estabilidad al deslizamiento-caso estático.

$$FSED = \frac{\sum Fuerzas\ resistentes}{\sum Fuerzas\ solicitantes} = \frac{N\,Tg\left(\frac{2}{3}\emptyset_b\right)}{\sum FH} \geq 1.5$$

Donde:

N= Fuerza normal, reacción de las fuerzas verticales.

$\emptyset_b$= Angulo de roce interno del suelo de fundación del muro, para efecto de diseño se considera que el muro se apoya en núcleo de enrocado, adoptando un ángulo de roce interno de 35°.

- Verificación de Estabilidad al Volcamiento Caso Estático:

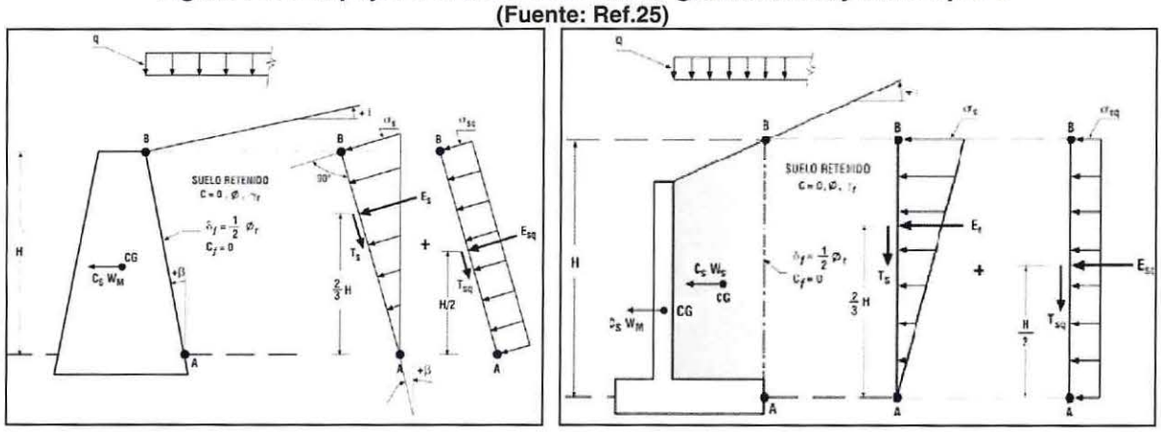
Ecuación 15: Verificación estabilidad al volcamiento-caso estático.

$$FSEV = \frac{\sum Momentos\ volcantes\ resistentes}{\sum Momentos\ volcantes\ solicitantes} \geq 1.5$$

12.2.4 CASO SÍSMICO

En la Ref.25, se analiza la componente sísmica del empuje en base a las expresiones de Mononobe y Okabe, las cuales consideran el empuje sísmico como un triángulo invertido. En la siguiente Figura se presentan los empujes que actúan sobre el muro para el caso sísmico:

Figura 140: Empujes sísmicos sobre muro gravitacional y muro tipo L.
(Fuente: Ref.25)



De acuerdo a la referencia antes mencionada, la componente sísmica de la presión del relleno y la componente sísmica de la presión debido a la sobrecarga son respectivamente:

Ecuación 16: Empuje de suelo sísmico.

$$\sigma_s = \gamma H(K_s - K_e)cos\delta_f$$

Ecuación 17: Empuje de sobrecarga sísmica.

$$\sigma_{sq} = \frac{q\sigma_s}{\gamma H}$$

La resultante del empuje sísmico del relleno respectivamente es:

Ecuación 18: Resultante de empuje de suelo sísmico sin cohesión.

$$E_s = \frac{1}{2}\gamma H^2(K_s - K_e)cos\delta_f$$

Ecuación 19: Resultante de empuje de sobrecarga sísmica sin cohesión.

$$E_{sq} = qH(K_s - K_e)cos\delta_f$$

Donde

Ks: Coeficiente de empuje sísmico:

Ecuación 20: Coeficiente de empuje sísmico.

$$K_s = \left[\frac{\cos(\emptyset - \beta - \theta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta_f + \beta + \theta)\left(1 + \sqrt{\frac{sen(\emptyset + \delta_f)\, sen(\emptyset - i - \theta)}{\cos(\delta_f + \beta + \theta)\cos(i - \beta)}}\right)^2} \right] \cos\beta$$

$\theta = arct(C_s)$

$C_s = 0.5\, A_0'$

C_s= Coeficiente Sísmico.

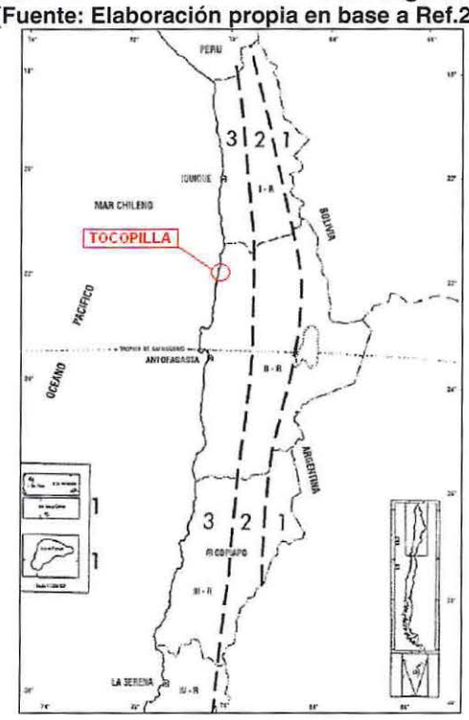
A_0'= Coeficiente de aceleración máxima efectiva, el cual se establece de acuerdo a la siguiente Tabla:

Tabla 54: Valor de coeficiente de aceleración máxima efectiva.
(Fuente: Ref.25)

Zona Sísmica	A_0'
1	0.2
2	0.3
3	0.4

La zona sísmica se determina de acuerdo a la ubicación geográfica del sector en estudio. Para Tocopilla la zona sísmica es 3.

Figura 141: Zonificación sísmica de las regiones I, II y III.
(Fuente: Elaboración propia en base a Ref.25)



- Verificación de Estabilidad al Deslizamiento Caso Sísmico:

Ecuación 21: Verificación estabilidad al deslizamiento-caso sísmico.

$$FSSD = \frac{\sum Fuerzas\ resistentes}{\sum Fuerzas\ solicitantes} \geq 1.1$$

- Verificación de Estabilidad al Volcamiento Caso Sísmico:

Ecuación 22: Verificación estabilidad al volcamiento-caso sísmico.

$$FSSD = \frac{\sum Momentos\ volcsntes\ resistentes}{\sum Momentos\ volcantes\ solicitantes} \geq 1.15FSSD$$

12.3 ANEXOS DE COSTOS DE ALTERNATIVAS DE MANEJO

12.3.1 ANEXOS DE COSTOS DE DRAGADO Y VERTIDO DE LAS ARENAS EN EL MAR

12.3.1.1 COSTOS DE TRASLADO DE LA DRAGA

Esta tarea considera los costos de traslado de la draga desde su puerto base, que se encuentra en la ciudad de Valdivia, hasta el sector en estudio (Tocopilla), de ida y vuelta. Los costos considerados para esta partida fueron los siguientes:

- Combustible: La draga consume 200 lt/hr con un rendimiento de 5 millas/hr. Desde Valdivia hasta Tocopilla hay una distancia aproximada de 1300 millas (2085 km). Se estima que el traslado tendría una duración de 11 días, por cualquier inconveniente se consideran 15 días, completando un total de 30 días para el ida y vuelta.
- En el traslado de la draga (ida y vuelta), se consumirán aproximadamente 104,000 lt de combustible. El combustible que utiliza la draga es de tipo diésel, cuyo litro tiene un costo aproximado de $ 700. Por lo tanto el traslado de la draga tiene un costo por combustible de $ 72,800,000.
- Viáticos: Se estima que el costo mensual por el viatico de toda la tripulación en el traslado de la draga es de aproximadamente $ 2,500,000. Valor considerado para todo el traslado, ya que tendría una duración de 30 días.
- Sueldo Tripulación: Se estima que el sueldo mensual de tota la tripulación sería de $ 8,000,000.
- Arriendo de Draga: El arriendo de la draga Ernesto Pinto tiene un valor 4 UF por hora. Como el traslado de ida y vuelta dura 30 días, por el arriendo de la draga se tendría un costo total de arriendo de $ 64,800,000.
- Seguros: Se considera un costo mensual por concepto de seguros de $ 5,000,000.

De acuerdo a lo anterior, se estima que el traslado de la draga desde Valdivia a Tocopilla, tanto de ida como de vuelta, tendría un costo total de $ 153,100,000.

12.3.1.2 COSTOS DE DRAGADO Y VERTIDO DEL MATERIAL

Esta tarea considera los costos asociados a la ejecución del dragado y al traslado del material a la zona de vertido. Los costos relacionados con estas tareas serían: el combustible, los sueldos y viáticos de la tripulación y el arriendo de la draga.

A continuación se presenta una estimación mensual de estos costos:

- Combustible: De las 180 horas que operaría la draga mensualmente, 90 horas se utilizarán para efectuar el dragado y 90 horas para trasladar el material a la zona de vertido. La draga tiene un consumo de combustible de 200 lt/hora, por lo tanto al mes se consumen 36,000 litros de combustible, que tiene un costo total de $ 25,200,000.
- Viáticos: El costo total mensual para viáticos de la tripulación es de $ 2,500,000.
- Sueldo Tripulación: El costo mensual de los sueldos de toda la tripulación es de $ 8,000,000.
- Arriendo Draga: El arriendo mensual de la draga es de $ 64,800,000 (4UF/hora).
- Seguros: El costo mensual de los seguros es de $ 5,000,000.

Por lo tanto el costo mensual para extraer y trasladar el material con la Draga sería de $ 105,500,000.

Además de los costos directos para efectuar el dragado, se deben incorporar los gastos generales y utilidades de la empresa contratista (40%).

Es importante mencionar que en la ejecución del dragado, se debe considerar el tiempo para efectuar el traslado del material a la zona de vertido, aproximadamente la draga demoraría en esta actividad 6 horas. Se estima un rendimiento de dragado de 80 m^3/h, mensualmente se podrían extraer 7,200 m^3 de material.

12.3.2 ANEXOS DE COSTOS ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE ARENAS

Para la estimación de los costos de las alternativas de reutilización se utilizan los precios unitarios de la Ref.12.

12.3.2.1 COSTOS NIVELACIÓN DE LA PLAYA

12.3.2.1.1 COSTOS DE MANO DE OBRA Y EQUIPOS PARA NIVELACIÓN

El análisis de costos para efectuar la nivelación de la playa considera la mano de obra, y los equipos necesarios para realizar esta actividad.

Tabla 55: Costos para nivelación de 1 m^3 de material.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	PRECIO TOTAL/m3
MANO DE OBRA	$620
EQUIPOS	$5,880
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)	**$6,500**

12.3.2.1.2 COSTOS DE MATERIAL DE SEPARACIÓN

Además de los costos antes mencionados, al momento de nivelar la playa, previo al depósito de las arenas limpias, se deberá colocar el material que aísle las arenas existentes de las arenas de relleno.

El análisis de costos considera la mano de obra para la colocación del material y el costo por metro cuadro del material.

Tabla 56: Costos para colocar un m^2 de geotextil de separación.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	PRECIO TOTAL/m2
MANO DE OBRA	$320
GEOTEXTIL DE SEPARACIÓN DE ARENAS	$1,680
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)	**$2,000**

De acuerdo a los metros cuadros de geotextil que se requieren para cubrir las arenas (27,340 m^2), el costo total para el material de separación sería de $ 54,680,000.

12.3.2.1.3 PLAZOS DE EJECUCIÓN DE DRAGADO PARA ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN

En base a los tiempos de ejecución del dragado y el traslado del material a la zona de vertido, en la siguiente Tabla se presenta la duración total del proceso de dragado para las alternativas de extracción analizadas:

Tabla 57: Plazos de dragado para cada alternativa de extracción.
(Fuente: Elaboración propia)

Alternativa de Extracción	Vol. Extracción (m^3)	Duración (mes)
Extracción Total	80,959	12.0
Extracción Total Proyecto	57,711	9.0
Extracción Estrato 2.0 m	53,587	8.0
Extracción Estrato 1.5 m	41,175	6.0
Extracción Estrato 1.0 m	29,928	5.0

12.3.2.1.4 COSTOS NIVELACIÓN DE PLAYA PARA ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN

En base a los análisis de costos y plazos, se presentan a continuación los costos para ejecutar el dragado para cada alternativa de extracción:

Tabla 58: Costos de dragado para alternativa de extracción total arenas.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRASLADO (IDA Y VUELTA)				
Combustible	104,000	lt	$700	$72,800,000
Viáticos	1	mes	$2,500,000	$2,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	1	mes	$8,000,000	$8,000,000
Arriendo Draga	1	mes	$64,800,000	$64,800,000
Seguros	1	mes	$5,000,000	$5,000,000
				$153,100,000
DRAGADO				
Combustible (Dragado y Vertido)	12	mes	$25,200,000	$302,400,000
Viáticos	12	mes	$2,500,000	$30,000,000
Sueldo Tripulación Adicional	12	mes	$8,000,000	$96,000,000
Arriendo Draga	12	hm	$64,800,000	$777,600,000
Seguros	12	mes	$5,000,000	$60,000,000
				$1,266,000,000
COSTO DIRECTO				**$1,419,100,000**
GASTOS GENERALES Y UTILIZADES			**40%**	**$567,640,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$1,986,740,000**

Tabla 59: Costos de dragado para alternativa de extracción total proyecto.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRASLADO (IDA Y VUELTA)				
Combustible	104,000	lt	$700	$72,800,000
Viáticos	1	mes	$2,500,000	$2,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	1	mes	$8,000,000	$8,000,000
Arriendo Draga	1	mes	$64,800,000	$64,800,000
Seguros	1	mes	$5,000,000	$5,000,000
				$153,100,000
DRAGADO				
Combustible (Dragado y Vertido)	9	mes	$25,200,000	$226,800,000
Viáticos	9	mes	$2,500,000	$22,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	9	mes	$8,000,000	$72,000,000
Arriendo Draga	9	hm	$64,800,000	$583,200,000
Seguros	9	mes	$5,000,000	$45,000,000
				$949,500,000
COSTO DIRECTO				**$1,102,600,000**
GASTOS GENERALES Y UTILIZADES			**40%**	**$441,040,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$1,543,640,000**

Tabla 60: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 2.00 m.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRASLADO (IDA Y VUELTA)				
Combustible	104,000	lt	$700	$72,800,000
Viáticos	1	mes	$2,500,000	$2,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	1	mes	$8,000,000	$8,000,000
Arriendo Draga	1	mes	$64,800,000	$64,800,000
Seguros	1	mes	$5,000,000	$5,000,000
				$153,100,000
DRAGADO				
Combustible (Dragado y Vertido)	8	mes	$25,200,000	$201,600,000
Viáticos	8	mes	$2,500,000	$20,000,000
Sueldo Tripulación Adicional	8	mes	$8,000,000	$64,000,000
Arriendo Draga	8	hm	$64,800,000	$518,400,000
Seguros	8	mes	$5,000,000	$40,000,000
				$844,000,000
COSTO DIRECTO				**$997,100,000**
GASTOS GENERALES Y UTILIZADES			**40%**	**$398,840,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$1,395,940,000**

Tabla 61: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 1.50 m.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRASLADO (IDA Y VUELTA)				
Combustible	104,000	lt	$700	$72,800,000
Viáticos	1	mes	$2,500,000	$2,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	1	mes	$8,000,000	$8,000,000
Arriendo Draga	1	mes	$64,800,000	$64,800,000
Seguros	1	mes	$5,000,000	$5,000,000
				$153,100,000
DRAGADO				
Combustible (Dragado y Vertido)	6	mes	$25,200,000	$151,200,000
Viáticos	6	mes	$2,500,000	$15,000,000
Sueldo Tripulación Adicional	6	mes	$8,000,000	$48,000,000
Arriendo Draga	6	mes	$64,800,000	$388,800,000
Seguros	6	mes	$5,000,000	$30,000,000
				$633,000,000
COSTO DIRECTO				**$786,100,000**
GASTOS GENERALES Y UTILIZADES			**40%**	**$314,440,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$1,100,540,000**

Tabla 62: Costos de dragado para alternativa de extracción estrato de 1.00 m.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TRASLADO (IDA Y VUELTA)				
Combustible	104,000	lt	$700	$72,800,000
Viáticos	1	mes	$2,500,000	$2,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	1	mes	$8,000,000	$8,000,000
Arriendo Draga	1	mes	$64,800,000	$64,800,000
Seguros	1	mes	$5,000,000	$5,000,000
				$153,100,000
DRAGADO				
Combustible (Dragado y Vertido)	5	mes	$25,200,000	$126,000,000
Viáticos	5	mes	$2,500,000	$12,500,000
Sueldo Tripulación Adicional	5	mes	$8,000,000	$40,000,000
Arriendo Draga	5	hm	$64,800,000	$324,000,000
Seguros	5	mes	$5,000,000	$25,000,000
				$527,500,000
COSTO DIRECTO				**$680,600,000**
GASTOS GENERALES Y UTILIZADES			**40%**	**$272,240,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$952,840,000**

12.3.2.2 COSTOS DE ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE GEOTUBOS Y NÚCLEO DE ROCAS

En el presente capítulo se determinan los costos económicos de los rompeolas compuestos un núcleo de geotubos y con un núcleo de rocas.

Las cubicaciones volumetrías de las rocas se efectuaron mediante el análisis de las secciones transversales de cada rompeolas.

12.3.2.2.1 COSTOS ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE GEOTUBOS

Se analizan los costos del enrocado de coraza y todas las partidas del núcleo: manta antisocavación, geotubos, relleno de los geotubos, geotextil de protección y finalmente las rocas de filtro.

Tabla 63: Costos de rompeolas con núcleo de geotubos.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
ROMPEOLAS NORTE				
Núcleo				
Geotubo, C 10.70m, L=20.0m	1	un	$4,698,000	$4,698,000
Geotubo, C 10.70m, L=22.0m	2	un	$4,950,000	$9,900,000
Geotubo, C 10.70m, L=25.0m	6	un	$5,329,000	$31,974,000
Geotubo, C 13.70m, L=25.0m	1	un	$6,300,000	$6,300,000
Relleno de Geotubos con Arena	1,397	m3	$2,300	$3,213,100
Geotextil de Protección Geotubos	1,163	m2	$3,200	$3,721,600
Rocas de 0.3 a 0.5 Ton - Filtro	1,180	m3	$47,000	$55,460,000
				$115,266,700
Coraza				
Rocas de 2 a 4 Ton	2,230	m3	$64,000	$142,720,000
Rocas de 4 a 6 Ton	1,920	m3	$72,000	$138,240,000
Rocas de 6 a 8 Ton	1,853	m3	$75,000	$138,975,000
				$419,935,000
			Total Rompeolas Norte	**$535,201,700**
ROMPEOLAS SUR				
Núcleo				
Geotubo, C 15.20m, L=20.0m	1	un	$5,890,000	$5,890,000
Geotubo, C 15.20m, L=25.0m	1	un	$6,792,000	$6,792,000
Geotubo, C 12.20m, L=20.0m	11	un	$5,095,000	$56,045,000
Geotubo, C 12.20m, L=25.0m	5	un	$5,816,000	$29,080,000
Geotubo, C 16.8m, L=20.0m	10	un	$6,288,000	$62,880,000
Geotubo, C 16.8m, L=25.0m	5	un	$7,694,000	$38,470,000
Geotubo, C 16.8m, L=22.0m	2	un	$6,685,000	$13,370,000
Geotubo, C 16.8m, L=24.0m	3	un	$7,081,000	$21,243,000
Relleno de Geotubos con Arena	7,984	m3	$2,300	$18,363,200
Geotextil de Protección Geotubos	4,637	m2	$3,200	$14,838,400
Rocas de 0.3 a 0.5 Ton - Filtro	4,175	m3	$47,000	$196,225,000
				$463,196,600
Coraza				
Rocas de 2 a 4 Ton	1,833	m3	$64,000	$117,312,000
Rocas de 4 a 6 Ton	1,468	m3	$72,000	$105,696,000
Rocas de 6 a 8 Ton	4,934	m3	$75,000	$370,050,000
Rocas de 8 a 10 Ton	7,479	m3	$80,000	$598,320,000
				$1,191,378,000
			Total Rompeolas Sur	**$1,654,574,600**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$2,189,776,300**

12.3.2.2.2 COSTOS ROMPEOLAS CON NÚCLEO DE ROCAS

Tabla 64: Presupuesto Rompeolas con núcleo de rocas.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
ROMPEOLAS NORTE				
Núcleo				
Rocas de 0.2 a 1.0 Ton	2,120	m3	$47,000	$99,640,000
				$99,640,000
Coraza				
Rocas de 2 a 4 Ton	2,230	m3	$64,000	$142,720,000
Rocas de 4 a 6 Ton	1,920	m3	$72,000	$138,240,000
Rocas de 6 a 8 Ton	1,853	m3	$75,000	$138,975,000
				$419,935,000
			Total Rompeolas Norte	**$519,575,000**
ROMPEOLAS SUR				
Núcleo				
Rocas de 0.2 a 1.0 Ton	10,162	m3	$47,000	$477,614,000
				$477,614,000
Coraza				
Rocas de 2 a 4 Ton	1,833.00	m3	$64,000	$117,312,000
Rocas de 4 a 6 Ton	1,468	m3	$72,000	$105,696,000
Rocas de 6 a 8 Ton	4,934	m3	$75,000	$370,050,000
Rocas de 8 a 10 Ton	7,479	m3	$80,000	$598,320,000
				$1,191,378,000
			Total Rompeolas Sur	**$1,668,992,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$2,188,567,000**

12.3.2.3 COSTOS DE RELLENO DE OBRAS TERRESTRES

12.3.2.3.1 COSTOS RELLENO PROYECTO MINVU CON ARENAS DE LA PLAYA

Tabla 65: Costos al utilizar las arenas existentes como material de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Getotextil de Separación de Arenas	7,210	m2	$2,000	$14,420,000
Extracción y Depósito de Arenas Existentes	6,056	m3	$4,500	$27,252,000
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$41,672,000**

12.3.2.3.2 COSTOS RELLENO PROYECTO MINVU CON RELLENO GRANULAR

Tabla 66: Costos al utilizar un relleno granular como material de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Relleno Obras Terrestres con Relleno Granular	6,056	m3	$9,300	$56,320,800
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$56,320,800**

12.3.2.3.3 COSTOS AMPLIACIÓN SUR PROYECTO MINVU

En la estimación de los costos de ampliación de obras del proyecto MINVU, se considera la disminución de los costos de obras de protección (muro y escollera de Figura 142). Aproximadamente se deben disminuir 109 m lineales de muro y enrocados, lo que equivale a un costo total de $ 82 MM.

Figura 142: Disminución de muro y enrocados en sector sur proyecto.
(Fuente: Elaboración propia en base a Imagen SAF 2005)

Tabla 67: Costos ampliación sur proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Excavación	388	m3	$3,000	$1,164,000
Base de Rocas 10 - 30 Kg	1,067	m3	$38,000	$40,546,000
Geotextil	582	m2	$1,500	$873,000
Muro Hormigón	105	m3	$300,000	$31,464,000
Roca Filtro 30 -50 Kg	243	m3	$38,000	$9,215,000
Roca Coraza 300 - 500 Kg	1,067	m3	$50,000	$53,350,000
Relleno con Arenas Contaminadas	3,589	m3	$4,500	$16,150,500
Getotextil de Separación de Arenas	1,683	m2	$2,000	$3,366,000
Base Granular	1,171	m2	$10,000	$11,710,000
Pavimento Radier	1,171	m2	$20,000	$23,420,000
Arena para Canchas	256	m3	$15,000	$3,840,000
Baranda	97	ml	$70,000	$6,790,000
SUBTOTAL				**$201,888,500**
DISMINUCIÓN 109 ml MURO Y ENROCADO				**$82,000,000**
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**$119,888,500**

12.3.2.3.4 COSTOS AMPLIACIÓN NORTE PROYECTO MINVU

Se realizó un análisis de los costos asociados a las obras de ampliación del sector norte del proyecto MINVU. Al igual que en el sector sur, en este sector se consideró una disminución de costos de las obras que limitan con la zona de relleno. De acuerdo a los análisis realizados deben disminuir aproximadamente 26.5 m lineales de muro y enrocados, lo que equivale a un costo total de $ 12.5 MM.

Tabla 68: Costos ampliación norte proyecto MINVU.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Excavación	1,005	m3	$3,000	$3,015,180
Base de Rocas 10 - 30 Kg	254	m3	$38,000	$9,667,086
Geotextil	1,570	m2	$1,500	$2,354,685
Muro Hormigón	165	m3	$300,000	$49,612,920
Roca Filtro 10 - 30 Kg	74	m3	$38,000	$2,794,520
Roca Coraza 100 - 300 Kg	684	m3	$45,000	$30,780,450
Relleno con Arenas Contaminadas	2,130	m3	$4,500	$9,585,878
Getotextil de Separación de Arenas	3,531	m2	$2,000	$7,062,000
Base Granular	2,722	m2	$10,000	$27,220,000
Pavimento Radier	2,722	m2	$20,000	$54,440,000
Arena para Canchas	405	m3	$15,000	$6,067,500
Baranda	180	ml	$70,000	$12,600,000
SUBTOTAL				**215,200,219**
DISMINUCIÓN 26.5 ml MURO Y ENROCADO				$12,500,000
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)				**202,700,219**

12.3.3 ANEXOS DE COSTOS DEPÓSITO ARENAS LIMPIAS DE RELLENO

El análisis de costos considera la mano de obra y los equipos para la extracción, traslado y colocación de las arenas limpias de relleno para la playa artificial. Es importante mencionar que no se considera el costo del mismo material, ya que las arenas se extraen de terrenos fiscales, y su fin está relacionado con una obra pública. Previo al depósito de las arenas limpias, se recomienda colocar sobre la playa el material de separación.

Para la estimación de los costos de colocación de las arenas limpias de relleno, se utilizan los precios unitarios de la Ref.12.

Tabla 69: Costos m^3 de arenas limpias de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

PARTIDA	PRECIO TOTAL/m3
MANO DE OBRA	$1,900
EQUIPOS	$11,400
COSTO TOTAL (SIN I.V.A.)	**$13,300**

Tabla 70: Costos depósito de arenas limpias de relleno.
(Fuente: Elaboración propia)

ALTERNATIVA DE EXTRACCIÓN	VOL. ARENAS LIMPIAS (m^3)	COSTO ARENAS LIMPIAS	COSTO MATERIAL DE SEPARACIÓN	COSTO TOTAL
Extracción Total	92,972	$ 1,236,527,600	$ 70,184,000	**$ 1,306,711,600**
Extracción Total Proyecto	69,724	$ 927,329,200	$ 54,680,000	**$ 982,009,200**
Extracción Estrato 2.0 m	61,436	$ 817,098,800	$ 54,680,000	**$ 871,778,800**
Extracción Estrato 1.5 m	49,405	$ 657,086,500	$ 54,680,000	**$ 711,766,500**
Extracción Estrato 1.0 m	39,256	$ 522,104,800	$ 54,680,000	**$ 576,784,800**