

2ej



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

## METODOLOGIA INTEGRAL PARA EL DISEÑO DE UN EMISOR SUBMARINO

T E S I S  
Que para obtener el titulo de  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a

ALEJANDRO MORALES RAMIREZ



Director:  
ING. MIGUEL ANGEL YAÑEZ MONROY

Ciudad Universitaria 1999

TESIS CON  
PALLA DE ORIGEN

7-5561



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**PASINACION**

**DISCONTINUA.**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/172/98

Señor  
ALEJANDRO MORALES RAMIREZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL ANGEL YAÑEZ MONROY, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

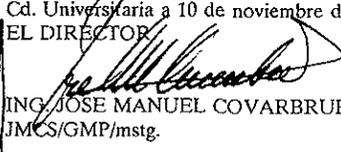
**"METODOLOGIA INTEGRAL PARA EL DISEÑO DE UN EMISOR SUBMARINO"**

- INTRODUCCION**
- I. PROCESO INTEGRAL DE DISEÑO**
  - II. IDENTIFICACION DE LAS CONDICIONES FISICAS DE DISEÑO**
  - III. INGENIERIA DE LA ZONA COSTERA**
  - IV. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA LINEA DE DESCARGA**
  - V. FUNCIONAMIENTO HIDRODINAMICO DE LA DESCARGA AL MAR**
- CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 10 de noviembre de 1998  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSÉ MANUEL COVARBRUBIAS SOLIS  
JMCS/GMP/mstg.

*Pipes are often better  
in theory  
than in practice*

Albert Einstein

*La práctica hace al maestro*

de la sabiduría popular

## NOTA

Finalmente, después de sobrevivir a la incertidumbre propia de su condición, aquí está mi trabajo de tesis; he de reconocer que la elaboración del mismo debe mucho a:

- Ángeles Kaim, animadora de lo mejor de mí, quien nunca me ha dejado dormir en mis laureles, por lo que este trabajo en mucho es de ella.
- Mi mamá, mi hermana (pérez) y mi pa', por todo su cariño y apoyo incondicional; también a mi abuelo (ingeniero por naturaleza), mis abuelitas, . .
- Mis amigas y amigos (ingenieros y no ingenieros), con quienes comparto las "chocoaventuras y sueños guajiros" que dan sabor y sentido a lo realizado.
- El ingeniero Miguel Ángel Yañez Monroy, director de esta tesis, quien generosamente compartió su tiempo, conocimientos y experiencia profesional.
- El ingeniero Gabriel Moreno Pecero, quien además de revisar mi trabajo, desinteresadamente me ha apoyado en diversos asuntos académicos.
- Los ingenieros Javier Gutiérrez Reynoso, Enrique Heras Herrera y Guillermo Zamarripa Mora, por sus valiosos comentarios y sugerencias.
- Consultoría Yañez-Taylor, cuyos miembros me dieron amplias facilidades y su apoyo para el desarrollo del presente trabajo.
- La Universidad Nacional, particularmente a la Facultad de Ingeniería, por la excelente formación que de sus maestros e investigadores he recibido.
- Fundación UNAM, por darme la oportunidad de participar en programas a través de los cuales he obtenido experiencias extraordinarias.
- Dios, desde luego.

A ustedes, gracias totales; espero responder a la confianza que en mí han puesto.

Alejandro Morales Ramírez

*Ciudad de México, abril, 1999*

## CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| Lista de Tablas  | iii       |
| Lista de Figuras   | iv        |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>1</b>  |
| Objetivos y Descripción de Alcances  | 3         |
| <b>I. PROCESO INTEGRAL DE DISEÑO</b>   | <b>6</b>  |
| I.1 Planteamiento del Problema   | 6         |
| I.1.1 Sistema de Tratamiento   | 7         |
| I.1.2 Sistema de Descarga al Mar   | 8         |
| I.2 Proceso Integral de Diseño   | 10        |
| <b>II. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DE DISEÑO</b>                     | <b>14</b> |
| II.1 Topobatimetría  | 14        |
| II.2 Geotécnica  | 15        |
| II.3 Vientos   | 16        |
| II.4 Oleaje Normal   | 17        |
| II.5 Corrientes  | 20        |
| II.6 Mareas  | 21        |
| II.7 Eventos Extraordinarios   | 22        |
| II.7.1. Oleaje extremal  | 23        |
| a. <i>Modelo de viento y campo de presiones</i>                                    | 23        |
| b. <i>Modelo de oleaje generado por viento</i>                                     | 23        |
| c. <i>Decaimiento de oleaje</i>  | 26        |
| II.7.2 Marejada de tormenta  | 30        |
| <b>III. INGENIERÍA DE LA ZONA COSTERA</b>  | <b>32</b> |
| III.1 Oleaje Extremal de Diseño  | 32        |
| III.2 Teoría de Oleaje   | 36        |
| III.2.1 Análisis de refracción de oleaje   | 37        |
| III.2.2 Componentes cinemáticas del oleaje   | 40        |
| III.3 Comportamiento y Estabilidad del Frente Costero                              | 47        |
| III.3.1 Simulación del comportamiento del perfil playero<br>con un modelo numérico | 48        |
| III.3.2 Análisis de estabilidad del perfil playero                                 | 53        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>IV. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA LÍNEA DE DESCARGA</b>            | <b>56</b>  |
| <b>IV.1 Trazo de la Línea de Conducción</b>                      | <b>56</b>  |
| IV.1.1 Longitud del emisor                                       | 56         |
| IV.1.2 Trazo planimétrico  | 57         |
| IV.1.3 Trazo altimétrico   | 59         |
| <b>IV.2 Selección de la Tubería</b>                              | <b>60</b>  |
| <b>IV.3 Obras de Protección Playera</b>                          | <b>63</b>  |
| <b>IV.4 Análisis de Fuerzas</b>                                  | <b>67</b>  |
| IV.4.1 Fuerzas gravimétricas                                     | 67         |
| IV.4.2 Fuerzas hidrodinámicas                                    | 69         |
| IV.4.3 Fuerzas resistentes...                                    | 71         |
| <b>IV.5 Alternativas de Anclaje</b>                              | <b>72</b>  |
| IV.5.1 Relleno de zanjas   | 74         |
| IV.5.2 Ademes  | 74         |
| IV.5.3 Muertos de concreto                                       | 75         |
| IV.5.4 Pilotes   | 75         |
| <b>IV.6 Arreglo Estructural</b>                                  | <b>76</b>  |
| <b>IV.7 Consideraciones Constructivas</b>                        | <b>77</b>  |
| IV.7.1 Dragado de zanjas   | 77         |
| IV.7.2 Construcción e instalación de los<br>elementos de anclaje | 79         |
| IV.7.3 Tendido de la línea                                       | 79         |
| a. <i>Colocación tubo a tubo</i>                                 | 80         |
| b. <i>Por tracción</i>   | 80         |
| c. <i>Desde una barcaza</i>                                      | 80         |
| <br>   |            |
| <b>V. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO DE LA<br/>DESCARGA AL MAR</b> | <b>82</b>  |
| V.1 Datos de Diseño  | 82         |
| V.2 Características Geométricas de la Tubería                    | 83         |
| V.3 Análisis Hidráulico de la Conducción                         | 84         |
| V.4 <i>Diseño de la Obra de Descarga</i>                         | 88         |
| V.5 Análisis de dispersión                                       | 94         |
| V.6 Arreglo Estructural del Difusor                              | 97         |
| <br>   |            |
| <b>CONCLUSIONES</b>  | <b>99</b>  |
| <br>   |            |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>104</b> |
| <br>   |            |
| <b>ANEXO I. Análisis de Costo Directo</b>                        | <b>106</b> |

## LISTA DE TABLAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Matriz de Relación Dato - Parámetro  | 13 |
| Tabla 2.1 | Características significantes del oleaje normal en aguas profundas frente a la bahía de la Ventosa | 19 |
| Tabla 2.2 | Niveles de marea en Salina Cruz, Oax.  | 20 |
| Tabla 2.3 | Ecuaciones para la predicción de oleaje en aguas profundas. Modelo de oleaje generado por viento   | 21 |
| Tabla 2.4 | Oleaje Extremal. Modelo de viento y campo de presiones   | 26 |
| Tabla 2.5 | Oleaje Extremal. Modelo de oleaje generado por viento  | 27 |
| Tabla 2.6 | Modelación de la Marejada de Tormenta  | 28 |
| Tabla 3.1 | Características de la Onda Progresiva. Teoría de Airy  | 31 |
| Tabla 3.2 | Componentes cinemáticas de la onda progresiva.   | 37 |
| Tabla 3.3 | Resumen de Velocidades y Aceleraciones de la onda de diseño  | 45 |
| Tabla 4.1 | Fuerzas de anclaje requeridas para el emisor submarino   | 73 |
| Tabla 4.2 | Peso de los elementos de anclaje de cada tramo   | 77 |
| Tabla 5.1 | Datos para el Diseño Hidráulico del Emisor   | 83 |
| Tabla 5.2 | Revisión Hidráulica de la Línea de Conducción  | 87 |
| Tabla 5.3 | Diseño Hidráulico de la Línea de Difusores. Condición de Gasto Normal                              | 91 |
| Tabla 5.4 | Diseño Hidráulico de la Línea de Difusores. Condición de Gasto Máximo                              | 92 |
| Tabla 5.5 | Dispersión Horizontal del Efluente en la Superficie Marina   | 97 |

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1  | Localización de la Obra  | 4  |
| Figura 1.2  | Diagrama de Flujo para el Diseño de un Emisor Submarino                      | 9  |
| Figura 2.1  | Rosa de Vientos Reinantes  | 18 |
| Figura 2.2  | Trayectoria del Huracán Paulina y Posición Respecto a la Bahía de la Ventosa | 29 |
| Figura 2.3  | Trayectoria del Huracán Olaf y Posición Respecto a la Bahía de la Ventosa    | 29 |
| Figura 3.1  | Curva de Ajuste <i>Altura de Ola - Periodo de Retorno</i>                    | 35 |
| Figura 3.2  | Trayectorias de las Partículas de Agua                                       | 38 |
| Figura 3.3  | Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección SE                        | 41 |
| Figura 3.4  | Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección S                         | 42 |
| Figura 3.5  | Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección SO                        | 43 |
| Figura 3.6  | Diagrama de Refracción de Oleaje Extremal. Dirección SE                      | 44 |
| Figura 3.7  | Comportamiento Cinemático de las Partículas de Agua                          | 46 |
| Figura 3.8  | Simulación del Comportamiento del Perfil Playero                             | 51 |
| Figura 3.9  | Detalle de las Variaciones en la Configuración de la Berma                   | 52 |
| Figura 3.10 | Comparación con el Perfil de Equilibrio                                      | 55 |
| Figura 4.1  | Trazo Planimétrico del Emisor Submarino                                      | 58 |
| Figura 4.2  | Perfil de la Línea de Conducción   | 61 |
| Figura 4.3  | Esquema del Enrocamiento de Protección Playera                               | 66 |
| Figura 4.4  | Fuerzas Actuantes sobre una Tubería Sumergida                                | 68 |
| Figura 4.5  | Alternativas de Anclaje  | 78 |
| Figura 5.1  | Arreglo Geométrico de la Obra de Descarga                                    | 93 |

## INTRODUCCIÓN

No hay duda de que los mares han sido un elemento fundamental en la historia de la humanidad. Desde la antigüedad hasta el mundo contemporáneo, el espacio marítimo (constituido por casi 2/3 de la superficie terrestre y 2,700 veces el volumen de agua dulce disponible) se ha caracterizado por ser el eje del desarrollo de numerosas civilizaciones, no solo por ser una enorme fuente de alimento, sino por su carácter estratégico como vía de comunicación para el intercambio comercial y sociocultural entre las naciones.

En la actualidad, la evolución de las necesidades económicas y sociales de la comunidad internacional, ha intensificado la diversificación en el aprovechamiento de los mares, particularmente en la zona costera. Motivadas por las múltiples facilidades que ofrece, cada día son más las industrias de todo tipo que se instalan en esta zona, a la par que aumenta su uso en el desarrollo de actividades recreativas; incluso, en algunos países europeos se han construido plantas para la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la fuerza motriz de las mareas.

La creciente importancia de las regiones costeras es tal que en décadas recientes grandes longitudes de franja costera han sido urbanizadas al punto de ser el hábitat de un gran segmento de la población mundial; por ejemplo, algunas proyecciones señalan que para principios de siglo XXI, tres de cada cuatro estadounidenses habitarán en esta región (Osterberg, 1982). De manera similar, la mayor parte de la explotación de hidrocarburos se ha desplazado de las zonas de tierra a complejos petroleros localizados sobre la plataforma continental. Siguiendo esta tendencia, nuestro país con sus más de 11,000 km. de litoral, ha mostrado indicios de integración a esta dinámica global, dando posibilidades de desarrollo a múltiples actividades productivas y comerciales.

De hecho, durante las décadas de acelerado crecimiento socioeconómico (1950 - 1980), diferentes objetivos motivaron el desarrollo de numerosas ciudades en la zona costera alrededor del mundo. En México, este periodo se caracterizó tanto por el rápido crecimiento de los centros turísticos de playa, como por la construcción (interrumpida en varios casos) de un número importante de puertos petroleros e industriales, lo que determinó un aumento exponencial en la explotación de los recursos costeros.

Paralelamente, sobre la hipótesis de que los mares disponían de una inagotable capacidad de autodepuración y regeneración, enormes cantidades de desechos fueron y continúan siendo arrojados en las aguas de la zona costera sin ningún tratamiento previo. A pesar de las aparentes ventajas económicas, las consecuencias negativas para el ambiente marino han sido innegables.

Esta situación implica en sí misma un problema ético de gran trascendencia, pues al resultar afectados otros sectores de la sociedad y la economía (e.g. el envenenamiento de productos pesqueros, los daños a la salud pública, la disminución de la actividad turística, etc.), se pone en riesgo la viabilidad de la región costera para el futuro desarrollo de las mismas. Afortunadamente, las consideraciones anteriores han permitido que el problema haya comenzado a ser revertido y hoy en día, existe una creciente preocupación por evitar o al menos disminuir la descarga de contaminantes al medio ambiente marino.

Por su magnitud, el vertido de aguas residuales industriales, municipales, de retorno agrícola y desechos de la actividad petrolera, son los que más atención deben tener. Actualmente, la aplicación de políticas ambientales para controlar y mitigar la contaminación de los cuerpos de agua es una práctica bastante extendida en las sociedades modernas, aunque su amplitud está generalmente limitada por el nivel de desarrollo socioeconómico de cada región

Para la mitigación de este problema, una de las alternativas más recurrentes es la construcción de emisores submarinos que conduzcan un flujo previamente tratado

hasta un punto suficientemente alejado para favorecer la dispersión y prevenir la acumulación de residuos en la zona costera.

### **Objetivos y Descripción de Alcances**

En este contexto, el presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal ofrecer al lector una metodología integral, con los elementos teóricos y las consideraciones prácticas necesarias, para el diseño de una conducción submarina que permita una adecuada descarga del efluente de agua residual tratada.

La metodología propuesta es presentada junto con un caso práctico que ejemplifica numéricamente su aplicación, a la vez que permite establecer comparaciones entre diferentes alternativas a lo largo del proceso de diseño. Dicho caso corresponde a la instalación de un emisor submarino ubicado en la Bahía de la Ventosa, en las cercanías del puerto de Salina Cruz, Oaxaca, como parte del sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas por las actividades de la refinería de PEMEX (ver Figura 1.1); el sistema tiene como objetivo cumplir las disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las normas complementarias a fin de disminuir substancialmente la contaminación de la zona costera del lugar.

Para su desarrollo el trabajo esta dividido en cinco capítulos. El primer capítulo incluye el planteamiento del problema y describe el proceso integral de diseño del emisor submarino, con énfasis en la metodología necesaria para configurar las diferentes etapas y componentes del estudio.

El Capítulo II proporciona la guía para la caracterización de las condiciones físicas de la región en estudio, incluyendo las técnicas para el procesamiento de información y los modelos de predicción. Posteriormente, los resultados son utilizados para definir el comportamiento físico de la zona costera en las condiciones de diseño y, en caso necesario, determinar las características de las obras de protección (Capítulo III).

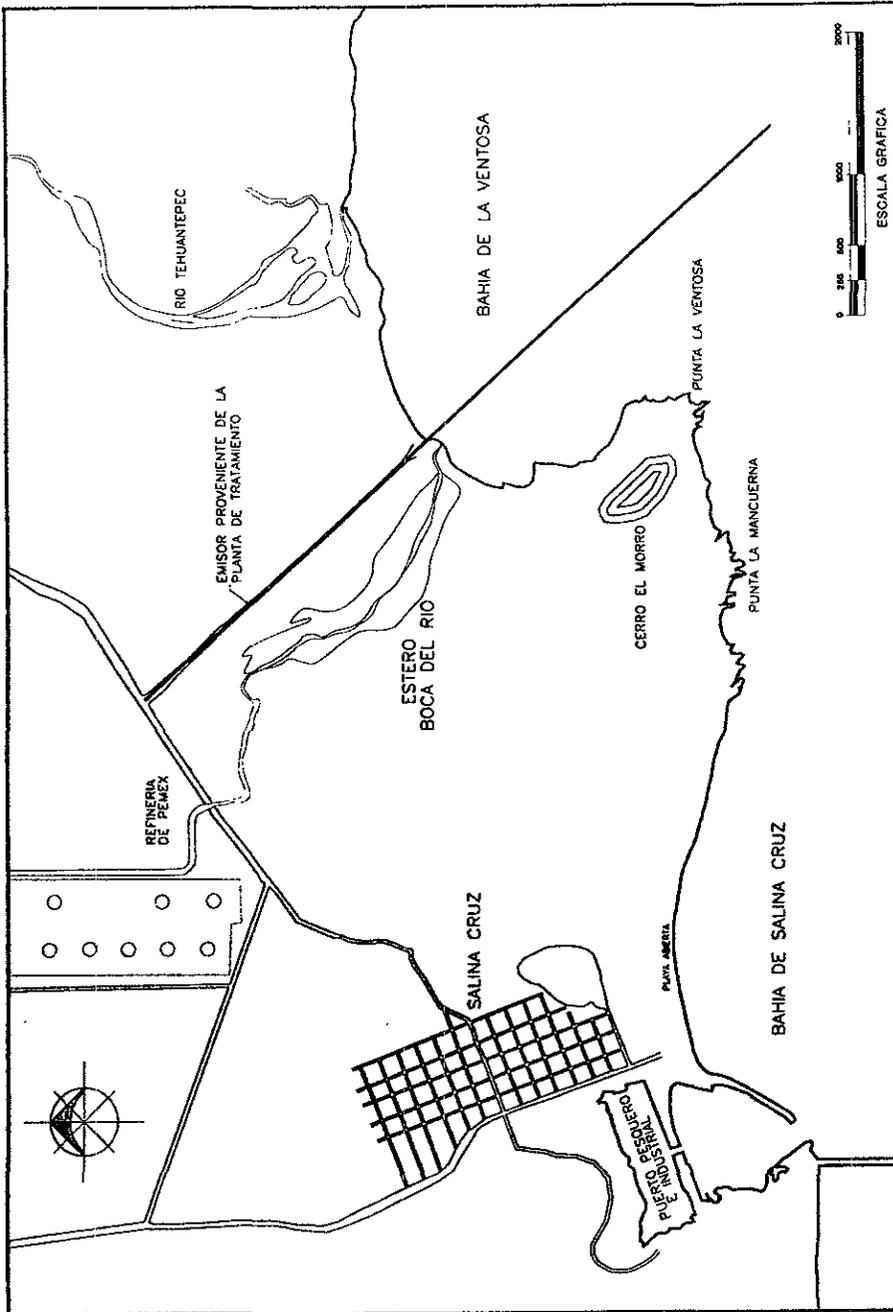


Figura 1.1 Localización de la Obra

A partir de la definición de los elementos de diseño obtenidos en las etapas previas y considerando el tipo de tubería seleccionada, en el Capítulo IV se determinan las solicitaciones dinámicas sobre la línea para luego plantear y evaluar diversas alternativas estructurales para resistir dichas solicitaciones.

Finalmente, en el Capítulo V se revisa el comportamiento hidráulico del emisor y se diseña la estructura de descarga (difusor). Las características geométricas del difusor son definidas por medio de la interacción entre el comportamiento hidráulico (tanto dentro de la tubería como en los puertos de salida) y el fenómeno de dispersión en el cuerpo receptor. El diseño finaliza con la determinación del arreglo estructural de la obra de descarga.

Desde luego, el trabajo incluye una sección de conclusiones con observaciones generales al proceso de diseño y recomendaciones particulares al problema estudiado; adicionalmente, se revisan brevemente algunas alternativas complementarias para el control y mitigación del deterioro de la zona costera por el vertido de aguas residuales.

## **I. PROCESO INTEGRAL DE DISEÑO**

De acuerdo con lo mencionado en la introducción, el control y la mitigación de la contaminación ocasionada por el vertido de aguas residuales requiere de la participación de instituciones y especialistas de diversas disciplinas; en particular, destaca la responsabilidad del Ingeniero Civil en la realización de estudios y proyectos así como en la integración de una amplia variedad de obras de infraestructura que permitan conformar un sistema capaz de ofrecer una solución eficiente. Para lograrlo, se requiere seguir un proceso integral que incluya la planeación del conjunto de obras, así como el diseño, construcción y operación de cada una en particular. Aunque la metodología presentada en este trabajo de tesis está enfocada únicamente al diseño del emisor submarino, conviene revisar brevemente el funcionamiento del conjunto.

### **I.1 Planteamiento del Problema**

Cada sistema para el manejo del agua residual en la zona costera representa una solución particular en función de las características de los residuos y dependiendo de las necesidades que deba satisfacer, así como de las condiciones físicas a las que se tenga que ajustar, sin embargo, invariablemente se requiere de algún tipo de tratamiento para moderar la concentración de contaminantes en el efluente, y de una estructura de descarga que facilite la dilución del agua residual con la del cuerpo marino, a modo de causar el menor impacto ambiental posible.

Una de las principales limitantes en la implantación del sistema es la elección del sitio para su colocación. Además de las consideraciones técnicas y económicas asociadas a cada alternativa, la viabilidad del proyecto también es determinada por la afectación al entorno biológico, social y económico de la obra. Por lo anterior, resulta conveniente la realización de un estudio de impacto ambiental a través del cual se identifiquen y evalúen dichas afectaciones con el objeto de plantear medidas de prevención y/o mitigación necesarias para garantizar el éxito del proyecto. En tanto que la descarga directa del agua residual implicaría la contaminación del medio marino con una sustancia ajena al mismo, una incuestionable medida es la realización de algún tipo de tratamiento del efluente previo al vertido del mismo en el mar.

### I.1.1 Sistema de Tratamiento

Sobre la base de que el arrastre de materia flotante y sólidos sedimentables constituyen un riesgo para el funcionamiento de la estructura de descarga, en general se aplica al menos un tratamiento preliminar por medio de rejillas y desarenadores, lo que adicionalmente disminuye la acumulación de desechos sólidos en la costa. La decisión sobre la aplicación de tratamiento complementario depende de la calidad del agua residual y de los parámetros definidos por la normatividad o la práctica en el medio; así, en el caso de aguas residuales urbanas (caracterizadas por la presencia de materia orgánica y material en suspensión) es recomendable aplicar tratamiento primario o incluso secundario, en tanto que para aguas residuales industriales el tratamiento a realizar es función de los compuestos contaminantes presentes en dichas aguas.

Un aspecto importante a considerar en la selección del sistema de tratamiento de las aguas residuales es la compatibilidad de las mismas con el ambiente marino, ya que un proceso de tratamiento inadecuado, podría ocasionar más daños de los que se pretende evitar, o bien puede resultar inútil. Por ejemplo, la desinfección del efluente utilizando cloro reviste ciertos peligros para la flora y fauna marina por las características tóxicas de este elemento; de manera semejante la remoción de nitratos resulta irrelevante para descargas en la zona costera pues el agua de mar tiene altas concentraciones de los mismos.

Posterior al tratamiento del agua residual, el siguiente reto ingenieril corresponde al de la adecuada disposición del efluente. La mejor opción en términos ambientales e incluso económicos es el reuso del agua tratada en alguna otra actividad (riego, procesos industriales, etc.); además de eliminar el impacto ocasionado por el vertido del efluente, es posible obtener considerables ahorros al prescindir de la obra de descarga y al disminuir los requerimientos del tratamiento y sustituir el uso de agua fresca en diversas actividades; más aún, con la autorización correspondiente y la existencia de un mercado, se pueden generar ingresos extraordinarios por concepto de la comercialización del agua tratada. Desafortunadamente, el reuso del agua tratada es

limitado con frecuencia por aspectos administrativos y/o comerciales, así como por el costo y/o la disponibilidad de la infraestructura necesaria. En tales casos, el efluente es directamente vertido al mar con el consecuente riesgo de modificar en cierto grado el ambiente natural (al tener características diferentes a las del cuerpo receptor), por lo que es indispensable evaluar las condiciones de la descarga.

### 1.1.2 Sistema de Descarga al Mar

En caso de que no existan corrientes importantes que puedan ser utilizadas como vehículo dispersor, o cuando las condiciones propias de la costa no faciliten el flujo de la masa de agua y por el contrario exista una tendencia a la concentración del efluente, es necesario proponer la construcción de una obra que facilite la rápida integración del efluente al medio marino, destacando la alternativa de instalar un emisor submarino.

Descrito en términos generales, un emisor submarino está compuesto por una tubería superficial lastrada o enterrada, y una estructura de descarga (difusor) formada por uno o más tubos con orificios (puertos de salida) por los que sale el efluente. Obviamente, la función de la tubería es llevar el flujo desde la conexión con una conducción terrestre (proveniente de un sistema de aprovechamiento, tratamiento o bombeo) hasta la estructura de descarga localizada mar adentro que tiene el objetivo de facilitar la dispersión del efluente.

El diseño de un emisor submarino requiere de un proceso ordenado para integrar los aspectos hidráulicos característicos de cualquier línea de conducción, con los conocimientos de ingeniería costera, estructural y ambiental necesarios para: (i) determinar las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre la tubería, (ii) proponer las fuerzas resistentes; y, (iii) evaluar el fenómeno de dispersión, respectivamente.

La Figura 1.2 muestra un diagrama de flujo con la secuencia a seguir en la conformación del proyecto de un emisor submarino, las diferentes etapas de diseño son detalladas en la siguiente sección.

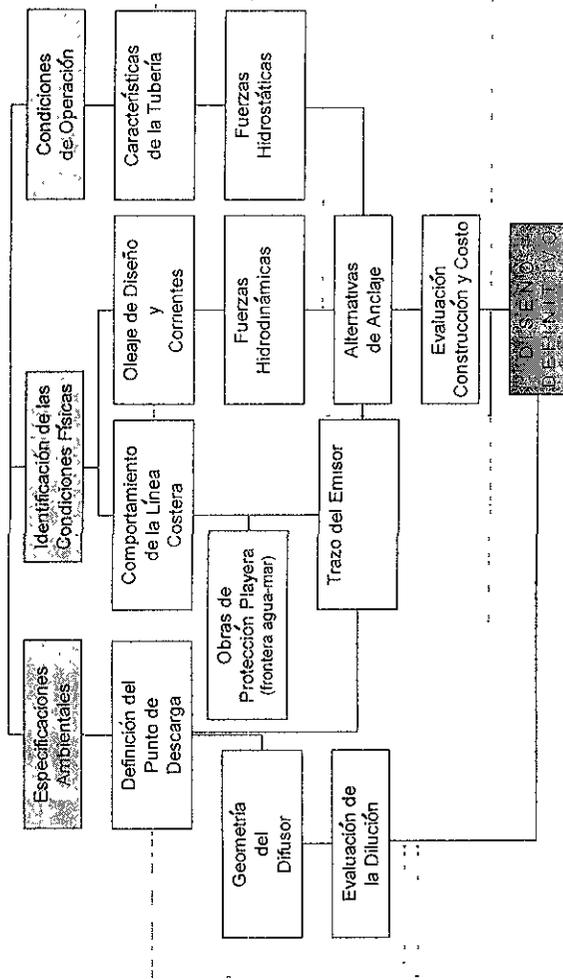


Figura 1.2 Diagrama de Flujo para el Diseño de un Emisor Submarino

## **I.2 Proceso integral de diseño**

El punto de partida para el diseño de un emisor submarino es delimitar el contexto de la obra para garantizar la compatibilidad entre el diseño y las restricciones del proyecto. En otras palabras, el diseñador nunca debe perder de vista la naturaleza de la obra, pues evidentemente el diseño de una descarga para un gasto proveniente del sistema de tratamiento de una localidad pequeña no puede tener los mismos lineamientos que el de un emisor de aguas residuales en un complejo industrial o una ciudad con modernas plantas de tratamiento; mientras la primera se debe implantar con recursos técnicos y económicos escasos, un sistema de mayor tamaño permite suponer un presupuesto más amplio y la disponibilidad de diversos materiales y equipos, así como la existencia de programas de mantenimiento. Desde luego también es fundamental la consideración del marco legal y las especificaciones definidas en el contrato (concentraciones de contaminantes, condiciones de descarga, impacto estético, etc.), así como de las condiciones de operación del emisor (caudal, presión).

Una vez definidas las restricciones del sistema, la primera fase del diseño corresponde a la identificación de las condiciones físicas del terreno (topografía, geotécnica, etc.) y las características de fenómenos costeros como el oleaje y las corrientes, tanto en condiciones normales como en eventos extraordinarios.

El proceso continúa con la aplicación de diversas técnicas y modelos de ingeniería costera que, a partir de la información recopilada, permiten definir el comportamiento del perfil playero y determinar el oleaje de diseño (asociado a un período de retorno) así como sus características en la zona de estudio. En esencia, el objetivo de esta etapa es determinar la extensión de terreno con comportamiento dinámico y la magnitud de las componentes cinemáticas de la ola de diseño al nivel del eje longitudinal de la tubería.

Previo al diseño estructural de la línea de descarga se debe definir el trazo del emisor y adelantar parte del diseño hidráulico al determinar las características

geométricas y mecánicas de la tubería. La selección del trazo de la línea (para unir la conducción terrestre con el punto de descarga) depende sobre todo del comportamiento del perfil playero, aunque también influyen consideraciones topobatómicas y geotécnicas; en cuanto a la definición del punto de descarga esta se relaciona con la presencia de corrientes, el uso de la zona, la forma de la costa e incluso con las características del efluente y especificaciones legales o del contrato. Por su parte, las dimensiones de la tubería son propuestas en función de las condiciones de operación (gastos y presión); en tanto, la elección del material de la tubería es limitada por las características del efluente y las propiedades mecánicas requeridas, así como el costo de la misma. Adicionalmente, en función del comportamiento playero previsto en condiciones extremas, se evalúa la pertinencia de proteger la configuración playera y en caso necesario se diseñan los elementos de la obra de protección.

Considerando el trazo de la conducción, las características de la tubería y el comportamiento del oleaje de diseño (componentes cinemáticas), es posible calcular la magnitud de las fuerzas gravimétricas (flotación) e hidrodinámicas actuantes sobre la tubería a lo largo de toda la línea. Evidentemente la finalidad del cálculo es determinar la fuerza resistente mínima para conservar al conjunto en equilibrio. Dicha fuerza puede ser proporcionada por diversos tipos de elementos de anclaje, generalmente contruidos de concreto.

La siguiente fase en el diseño de un emisor submarino corresponde al diseño de una estructura de descarga que permita cumplir con el objetivo de dispersar al efluente dentro del ambiente marino. Previamente, se requiere determinar las características hidráulicas (gasto y presión) disponibles para la realización de la descarga, para lo cual es necesario revisar el comportamiento del flujo a lo largo de la línea de conducción, en las diferentes condiciones de operación. Desde luego, las características geométricas y el material de la tubería influyen notoriamente en los resultados, por lo que de no obtenerse condiciones favorables con una tubería, es posible seleccionar otra con dimensiones o material diferente.

A continuación de la revisión hidráulica, el siguiente paso corresponde propiamente al diseño del difusor, para lo cual es necesario realizar un proceso iterativo de evaluación-modificación del arreglo geométrico propuesto, en función del comportamiento del flujo (en el interior de la tubería y en los puertos de descarga) y el fenómeno de dilución que experimenta el mismo al entrar en el medio marino. Cabe señalar que es posible obtener los mismos resultados con diferentes arreglos, por lo que el diseño debe incluir la comparación entre diversas alternativas a fin de seleccionar la más eficiente. El diseño concluye con la determinación de las características estructurales (niveles requeridos, fuerzas hidrodinámicas exteriores y fuerzas internas) del difusor.

Para concluir la etapa del diseño estructural, las alternativas de anclaje propuestas se evalúan en función de la dificultad del proceso constructivo requerido (fabricación de los elementos de anclaje y tendido de la línea) y del costo correspondiente. En caso de fuerzas que impliquen una solución muy costosa, resulta conveniente evaluar un nivel de riesgo menor, el cual se asocia a una relación de períodos de retorno o probabilidades de ocurrencia de los fenómenos que provocan las solicitaciones de diseño, previendo así que se habrá de realizar una reparación mayor de la línea en algún momento de su vida útil.

Como resumen, la Tabla 1.1 presenta una matriz que relaciona diversos datos con la definición de los diferentes componentes del emisor submarino, según lo descrito en los párrafos precedentes.

|   | Información Predeterminada  |   |  |   |   | Condiciones Físicas de Diseño                                |                                |   |  |  | Ingeniería Costera   |  |   |   | Diseño del Emisor  |  |  |   |
|---|---|---|--|---|---|--|--------------------------------|---|--|--|--|--|---|---|--|--|--|---|
|   | Marco Legal / Especificaciones<br>(leyes de protección al ambiente,<br>normas técnicas de diseño, contrato) | Naturaleza de la Obra<br>(tipo e importancia relativa del<br>sistema, recursos disponibles) | Características del Fluente<br>(concentraciones de contaminantes,<br>temperatura, color, etc.) | Caudal Vertido (gasto mínimo,<br>normal, máximo y extraordinario) | Uso de la Zona<br>(actividades turísticas, pesca, etc.) | Forma de la Costa<br>(bahías, lagunas, puntas, barras, etc.) | Topografía<br>(perfil playero) | Geología<br>(granulometría, relaciones volumétricas y<br>gravimétricas, etc.) | Condiciones Normales de Oleaje<br>y Marea (altura de ola, periodo,<br>inertes característicos) | Corrientes<br>(profundidad, dirección y velocidad) | Cond. Extraordinarias de<br>Oleaje y Marea<br>(altura y periodo, sobreelevación) | Diseño de Diseño<br>(asociado a un periodo de retorno o<br>probabilidad de excedencia) | Comportamiento del Perfil<br>Playero<br>(dinámica, equilibrio de masas) | Obras de Protección Playera<br>(pantallas, enrocamientos, etc.) | Trazo del Emisor (características<br>planimétricas y altimétricas) | Presión de Operación y<br>Fenómenos Transitorios<br>(conducción por bombeo o gravedad) | Características de la Tubería<br>(diámetro, material, espesor) | Puertos de Descarga<br>(número y geometría) |
| Oleaje de Diseño<br>(asociado a un periodo de retorno)          |   | X   |  |   |   |  |                                |   |  | X  |  |  |   |   |  |  |  |   |
| Comportamiento del Perfil<br>Playero                            |   |   |  |   |   | X  |                                | X   |  |  |  |  |   |   |  |  |  |   |
| Obras de Protección Playera<br>(pantallas, enrocamientos, etc.) |   |   |  |   |   |  |                                |   |  |  |  |  | X   |   |  |  |  |   |
| Profundidad de la Descarga y<br>Trazo del Emisor                | X   |   | X  |   | X   | X  | X                              |   | X  |  |  |  | X   |   |  |  |  |   |
| Presión de Operación y<br>Fenómenos Transitorios                |   |   |  | X   |   |  |                                |   |  |  |  |  |   |   | X  |  |  |   |
| Características de la Tubería<br>(diámetro, material, espesor)  |   | X   | X  | X   |   |  |                                |   |  |  |  |  |   |   | X  |  | X  |   |
| Elementos de Anclaje<br>(lastres de concreto, ademas, etc.)     |   | X   |  |   |   |  | X                              |   |  |  |  |  |   |   |  |  |  |   |
| Puertos de Descarga<br>(número y geometría)                     |   |   |  | X   |   |  |                                |   |  |  |  |  |   |   | X  |  | X  |   |
| Separación entre los Puertos de<br>Descarga                     | X   |   |  | X   |   |  |                                |   | X  |  |  |  |   |   |  |  |  |   |
| Línea del Difusor<br>(elevación, cambios de sección, etc.)      |   |   |  | X   |   |  |                                |   |  |  |  |  |   |   |  |  |  | X   |

Matriz de Relación Dato-Parámetro

## **II. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DE DISEÑO**

Una actividad fundamental previa al diseño de cualquier estructura es identificar cualitativa y cuantitativamente las características físicas de su entorno, con el objeto de determinar las condiciones físicas que gobiernan el diseño. En el caso de emisores submarinos los estudios físicos deben incluir los fenómenos que definen el comportamiento dinámico de la zona costera, desde donde emerge el perfil playero hasta la profundidad de descarga. En la zona playera, la dinámica puede ser de receso o crecimiento, determinando las condiciones de desplante de la conducción en la frontera entre tierra y mar. A profundidades mayores, no solo se deben documentar las condiciones del lecho marino para el desplante, sino también los efectos dinámicos del oleaje y las corrientes sobre la tubería.

Así, para la instalación de una línea de descarga submarina es importante conocer la topobatimetría del terreno, sus características geotécnicas, así como el oleaje (normal y extremal) y las corrientes propias del lugar. Además, existen otros factores físicos que deben ser revisados como son el viento, las mareas, la marejada de tormenta y la existencia de otras descargas como ríos o estuarios; sin embargo su influencia puede ser irrelevante. Este capítulo documenta los estudios necesarios para caracterizar el entorno físico.

### **II.1 Topobatimetría**

La disponibilidad de información topobatimétrica confiable constituye un elemento indispensable para el correcto diseño del emisor submarino, pues es el punto de partida de diversos componentes del estudio. Además de permitir evaluar la estabilidad del perfil playero al inicio en tierra de la línea, destaca su importancia en las previsiones referentes al desplante de la línea en el lecho marino hasta alcanzar la profundidad de descarga.

Por otro lado, cabe señalar que la ejecución de levantamientos topobatimétricos en general tiene un costo elevado y puede requerir de varios días e incluso semanas, por lo que se tiene que valorar la dimensión de la obra para justificar la realización de los mismos. En este sentido, cuando la justificación es limitada es conveniente revisar la información disponible en cartas náuticas o levantamientos previos para inferir la configuración del fondo marino.

Para fines de diseño del emisor submarino en la Bahía de la Ventosa, la reducida escala de la estructura justifica utilizar tan solo la información batimétrica disponible en la carta náutica de la región de Salina Cruz (Secretaría de Marina, No. 628) en la fase inicial de definición del trazo, para posteriormente complementarla con un levantamiento de campo abierto sobre el eje del mismo, el cual comprobará o corregirá deficiencias implícitas en la utilización de la carta de referencia. La configuración batimétrica de la zona de estudio se presenta junto con el análisis de refracción de oleaje (Sección III.2.1).

## **II.2 Geotécnia**

Otro aspecto importante para completar la descripción del terreno corresponde a las propiedades físicas del mismo, en particular la información granulométrica, la cual es un componente indispensable en la modelación del comportamiento del perfil playero. Adicionalmente, es de utilidad disponer de datos generales sobre la resistencia mecánica y el contenido de agua del suelo aunque solo se utilicen como referencia.

Al igual que con la topobatimetría, es común que la disponibilidad de información geotécnica específica sobre el sitio en estudio sea escasa y poco confiable, por lo que es recomendable la realización de sondeos o al menos la toma de muestras alteradas de suelo que brinden una mayor cantidad de datos reales para el diseño.

Así por ejemplo, ya que la Bahía de la Ventosa estuvo considerada dentro de las alternativas para la ubicación del puerto petrolero de Salina Cruz, existen algunas referencias bibliográficas sobre las características geotécnicas del suelo en esa zona; sin embargo, la información reportada es totalmente divergente de la obtenida en muestreos recientes. Por ejemplo, mientras las primeras indican la existencia de un limo arenoso con tamaño medio de 0.06 mm, el análisis de las muestras recolectadas durante una visita de campo señala que el material de fondo es arena fina mal graduada, con un diámetro representativo ( $D_{50}$ ) de 0.35 mm.

Con respecto a la resistencia mecánica del suelo, los estudios previos para la instalación del puerto petrolero comentan los resultados de pruebas de penetración estándar en la zona, de acuerdo con los cuales el fondo marino tendría una resistencia muy baja (entre 5 y 10 golpes para un estrato de 5 metros de espesor). Referente al contenido de agua, los sondeos realizados reportan un valor cercano al 300% en el estrato superficial. Adicionalmente, conviene remarcar que la región de estudio es altamente sísmica. En conjunto, estos datos permiten concluir que además de su baja compacidad relativa (alta relación de vacíos), el material de fondo es propenso a experimentar una fluidización instantánea como consecuencia del incremento en la presión hidrostática interna y la consecuente disminución del esfuerzo entre las partículas sólidas al recibir una súbita sollicitación (e.g. sismo, impacto).

Para fines del diseño del emisor submarino estas características son consideradas en la definición del trazo de la línea tubería y el arreglo geométrico de las estructuras de apoyo, según se detalla en el capítulo correspondiente.

### **II.3 Vientos**

Considerando que en general el viento es uno de los factores físicos que más influye en el comportamiento de la superficie del mar, es conveniente revisar las condiciones normales (vientos reinantes) para detectar su posible influencia en la generación de oleaje local y/o corrientes superficiales. Con respecto a los vientos

dominantes (de mayor intensidad pero poca ocurrencia), la caracterización de los mismos se presenta en el inciso correspondiente a eventos extremales. Por otro lado, para lograr una correcta identificación del patrón de vientos en un lugar, es conveniente disponer de al menos un año de registros puntuales (a cada 6 u 8 horas) con intensidad y dirección. Posteriormente, los datos son procesados estadísticamente para obtener la distribución de frecuencias y los valores promedio en cada dirección.

Para el ejemplo en la Bahía de la Ventosa, los registros de viento (enero 96 – junio 1998) fueron los obtenidos del anemómetro localizado en la torre de tráfico marítimo que opera PEMEX en la Terminal de Marítima de Salina Cruz; los resultados estadísticos se muestran gráficamente en la Rosa de Vientos (Figura 2.1).

Como se puede apreciar en la Figura referida, el viento predominante proviene del Norte (ocurrencia de 65%) con una velocidad promedio de aproximadamente 10 m/s. Dado que esta dirección se aleja de la costa, los efectos en el comportamiento de la superficie del agua no incidirán sobre la playa; en consecuencia se descarta al viento como factor de importancia en el comportamiento del perfil playero.

#### **II.4 Oleaje Normal**

Con respecto a las características físicas del mar, el fenómeno más destacado es el oleaje o propagación de ondas de períodos cortos, generado principalmente por la acción del viento en el cuerpo de agua. Al igual que con el viento, es posible identificar dos condiciones: una normal o frecuente y otra extraordinaria. En este punto se presentan las características del oleaje normal, el cual influye considerablemente en el comportamiento diario del perfil playero.

En general, la disponibilidad de datos confiables sobre las características del oleaje (altura de ola y período) en un lugar específico es poco probable. El ideal sería disponer de los registros de una estación de medición de oleaje en un período no

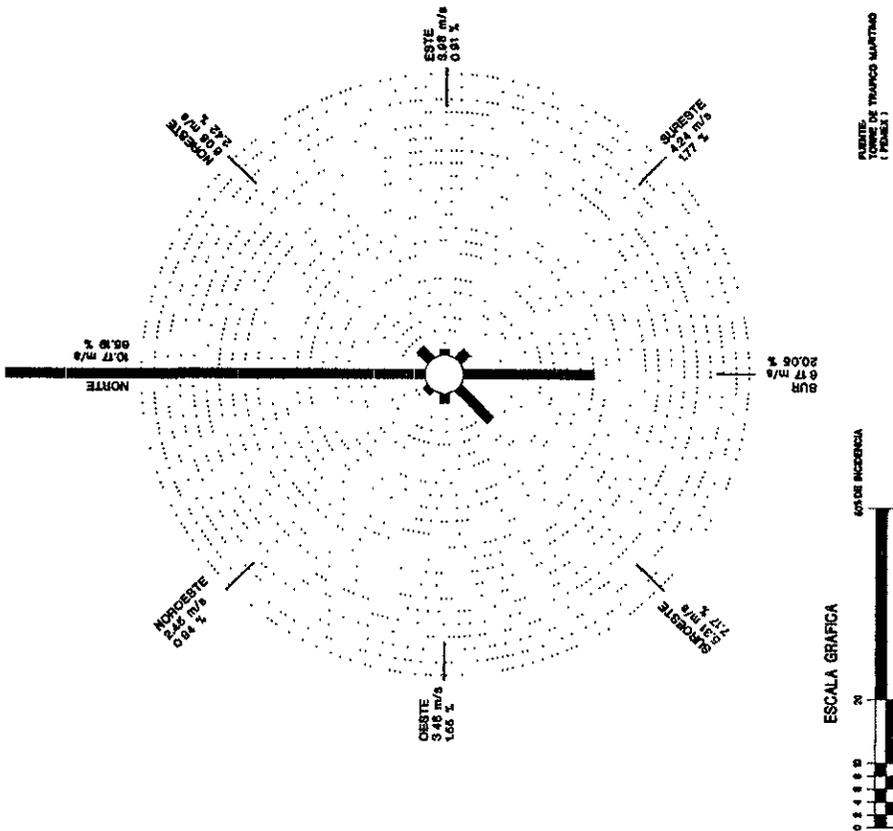


Figura 2.1 Rosa de Vientos Reinartides

menor de un año, sin embargo la instalación de un emisor submarino de menores proporciones difícilmente justifica la inversión en tiempo y recursos económicos para este fin. Por lo anterior es común la utilización de fuentes estadísticas como el Ocean Wave Statistics del Almirantazgo Británico (OWS), la cual presenta resultados de amplios períodos de observación del oleaje por parte de embarcaciones que navegan en aguas profundas de diversas regiones del mundo.

Por otro lado, en el caso de contar con registros previos realizados en la cercanía de la playa, es de enorme importancia conocer el sitio exacto de la medición pues evidentemente los resultados estarán afectados por los efectos de propagación del oleaje hacia la costa, lo que podría conducir a una interpretación errónea de los mismos.

Una vez seleccionada la fuente de información, los datos de altura y período de ola son ordenados por rangos de magnitud y dirección, lo que permite obtener la distribución de frecuencias y luego calcular los valores de altura de ola y período significantes ( $H_{1/3}$  y  $T_{1/3}$ ). Para el caso de las alturas de ola estos valores están definidos como el promedio del tercio superior de los registros en cada dirección y son los recomendados por el Manual de Diseño de Obras Marítimas (CFE, 1983) para la revisión de los efectos del oleaje en condiciones normales. Los períodos significantes por otra parte se definen como los valores medios de los períodos existentes en cada distribución frecuencial por dirección. La Tabla 2.1 presenta los valores significantes del oleaje normal para la región de Salina Cruz.

| Dirección      | Altura de Ola (H) | Período (T) | Frecuencia |
|----------------|-------------------|-------------|------------|
|                | [ m ]             | [ s ]       | [ % ]      |
| Sur-Oeste (SW) | 1.85              | 9.00        | 36.90      |
| Sur (S)        | 2.10              | 10.25       | 35.60      |
| Sur-Este (SE)  | 1.85              | 10.00       | 27.50      |

**Tabla 2.1** Características significantes del oleaje normal en aguas profundas frente a la Bahía de la Ventosa, Salina Cruz.

## II.5 Corrientes

Además del oleaje, las corrientes son otro elemento básico en la definición del comportamiento físico del mar. Aunque las corrientes, particularmente en mar abierto, están estrechamente asociadas con los patrones globales de circulación del aire, en la zona costera existen flujos locales que pueden estar ocasionados por oleaje, viento local y/o variaciones en el nivel del mar.

Para la elaboración del proyecto de una línea de descarga al mar, el conocimiento del comportamiento de las corrientes en el sitio tiene una doble importancia. Por un lado el diseño estructural de los elementos de lastre y la tubería misma, tiene que incluir las fuerzas hidrodinámicas generadas por el flujo, y por otra parte, la orientación de la estructura de descarga está en función de la dirección de las corrientes predominantes, a manera de aprovecharlas como agentes de dispersión.

De acuerdo con lo anterior, es conveniente identificar el comportamiento de las corrientes globales con influencia en la zona y compararlo con el observado o modelado en el sitio en estudio, con el objeto de definir la condición crítica a utilizar en el diseño.

Así pues, la revisión de las corrientes oceánicas del Pacífico (G. Neumann, 1968) permitió documentar la influencia de la Corriente Ecuatorial del Pacífico Norte en la región del Golfo de Tehuantepec, con dirección sensiblemente paralela a la línea de costa y una velocidad promedio de 0.5 nudos (25.7 cm/seg). Por otro lado, los estudios oceanográficos realizados como parte del proyecto del puerto petrolero detectaron una corriente media de 24 cm/seg fluyendo de este a oeste. En ambos casos, las características reportadas coinciden ampliamente, definiendo claramente las condiciones de diseño.

## II.6 Mareas

Las mareas o variaciones periódicas en el nivel del mar es otro fenómeno a considerar en el diseño de cualquier estructura costera, ya que definen el marco de referencia para las elevaciones del terreno. En general, las características de la marea son fáciles de obtener a través de las tablas numéricas de predicción de mareas, publicadas anualmente por diferentes instituciones. Para fines del ejemplo de esta tesis, se identificó que en Salina Cruz el tipo de marea es semidiurna con amplitud media de 1.11 m; los niveles característicos son mostrados en la siguiente tabla:

| <b>Nivel Característico</b>            | <b>Nivel<br/>[m.s.n.b.m.]</b> |
|--|-------------------------------|
| Pleamar Máxima Registrada (PMR)        | 1.748                         |
| Nivel de Pleamar Media Superior (NPMS) | 1.219                         |
| Nivel de Pleamar Media (NPM)           | 1.110                         |
| Nivel Medio del Mar (NMM)              | 0.574                         |
| Nivel de Bajamar Media (NBM)           | 0.038                         |
| Nivel de Bajamar Media Inferior (NBMI) | 0.000                         |
| Bajamar Mínima Registrada (BMR)        | -0.537                        |

Fuente: Secretaría de Marna, 1998.

**Tabla 2.2** Niveles de marea en Salina Cruz, Oax.

Por otro lado, el desplazamiento de la masa de agua por efecto de los cambios de nivel origina corrientes de flujo y reflujo, cuya magnitud podría afectar el comportamiento del perfil playero e inducir fuerzas hidrodinámicas considerables sobre la estructura. Este efecto adquiere mayor importancia cuando existe notable diferencia entre los niveles máximo y mínimo (mayor a 3 metros), o cuando hay disminución en la sección transversal del flujo que circula por efecto de la propagación de la onda hacia zonas restringidas (entradas de puertos, marinas, lagunas costeras, etc.). En el caso de la Bahía de la Ventosa, considerando que no existen cuerpos u obstrucciones que restrinjan la circulación de la masa de agua, se despreció el efecto de la marea en la generación de corrientes.

## II. 7 Eventos Extraordinarios

Sin duda una parte fundamental en el diseño de cualquier estructura es la identificación de los eventos extraordinarios con posibilidad de ocurrir en la región de estudio. La importancia de determinar las características de estos eventos radica en que por lo general son los que definen las solicitaciones extremas sobre la estructura. Cabe aclarar que las solicitaciones máximas no son necesariamente las que definen los diseños, pues se debe considerar también un período de tiempo acorde con la jerarquía de la obra (Sección III.1).

En función del tipo de obra, los fenómenos extraordinarios pueden ser: tormentas tropicales, sistemas de vientos intensos, olas gigantes y avenidas de ríos entre otros. Desde luego, los registros de experiencias previas son los indicadores más adecuados para seleccionar los eventos a considerar.

Con respecto a la región de Salina Cruz, ésta es afectada periódicamente por el paso de huracanes tropicales frente a sus costas. En cuanto a las avenidas fluviales, la influencia del Río Tehuantepec es despreciable en tanto que la presa "Benito Juárez", algunos kilómetros aguas arriba, controla las avenidas en el mismo.

Bajo estas consideraciones es conveniente obtener información de los avisos de huracanes cuya trayectoria podría haber implicado la generación de oleajes extremos y marejadas de tormenta en la zona en estudio. En la actualidad, los recursos tecnológicos (Internet) proporcionan un fácil acceso a los bancos de información de diversos observatorios meteorológicos en los que es posible obtener la trayectoria de los huracanes, así como la velocidad del viento y la presión del sistema en cada punto de aviso.

El estudio de los huracanes en la región costera de Salina Cruz incluyó la revisión de las trayectorias registradas por el Servicio Meteorológico Nacional y el Centro Nacional de Huracanes de Miami, en la cuenca del Pacífico durante el período de 1960

a 1997. Del total de eventos, se seleccionaron los 22 huracanes con las menores distancias al sitio y las mayores velocidades del viento.

### II.7.1 Oleaje Extremal

Aunque lo ideal sería disponer de mediciones precisas del oleaje, en condiciones de oleaje extremal es aún más difícil su obtención por lo que es necesario utilizar modelos de predicción de oleaje; sin embargo, la complejidad y variabilidad de los sistemas atmosféricos y su interacción con el océano limitan considerablemente la confiabilidad de dichos modelos, por lo que el ingeniero debe de utilizar su criterio para descartar resultados incongruentes físicamente. A continuación se presentan dos de los modelos de predicción de oleaje más frecuentemente utilizados.

#### a. Modelo de viento y campo de presiones.

Este modelo (SPM, 1984) es válido para huracanes con desplazamiento lento y permite obtener los valores de altura y período de ola significativos en el punto de vientos máximos utilizando las siguientes expresiones:

$$\text{Altura de ola: } H_o = 5.03 \exp^{(R \Delta p / 4700)} [1 + 0.29 \alpha V_F / U_R^{1/2}] \quad (2.1)$$

$$\text{Período de ola: } T_o = 8.6 \exp^{(R \Delta p / 9400)} [1 + 0.145 \alpha V_F / U_R^{1/2}] \quad (2.2)$$

En donde:

- $H_o$  = altura de ola significativa en aguas profundas, en metros.
- $T_o$  = el período de ola correspondiente en aguas profundas; segundos.
- $R$  = radio de vientos máximos en kilómetros. El valor de R se determina aplicando las siguientes fórmulas experimentales:

Océano Pacífico:

$$R = 28.52 \cdot \text{Tanh}(0.0873 | \theta - 28 |) + 12.22 \cdot \exp^{(-\Delta p / 33.86)} + 37.22 + 0.2 V_F$$

Golfo de México

$$R = 1.85[10^{(Po/150 - 3.45)}] + 1.85[10^{0.5(Po/38 - 16.74)}]$$

- $\Delta p$  = diferencial de presión medida en milímetros de mercurio; es obtenida de la diferencia entre la presión atmosférica normal (760 mmHg) y la presión en el centro del huracán ( $P_o$ , dato).
- $V_F$  = la velocidad de desplazamiento del huracán en metros por segundo; para determinarla es necesario conocer la posición geográfica de los avisos y el tiempo entre ellos.
- $U_R$  = la velocidad máxima sostenida del viento en metros por segundo en el radio R; es calculada como la suma del 0.865 de la velocidad máxima del viento (dato) y el 0.5 de la velocidad de desplazamiento.
- $\alpha$  = un coeficiente función de la velocidad de desplazamiento por efecto del incremento en la longitud de acción del viento, para huracanes lentos se recomienda utilizar un valor de 1.0.
- $\theta$  = latitud en grados

De este modo, los valores de altura y período de ola son calculados para cada aviso de los huracanes seleccionados. Posteriormente cada par de valores es trasladado a la zona de aguas profundas frente a la zona de estudio (altura y período decaídos) utilizando el procedimiento detallado mas adelante.

#### *b. Modelo de Oleaje Generado por Viento*

Como ya se mencionó anteriormente, los modelos de predicción de las condiciones de oleaje no son totalmente confiables, por lo que es conveniente aplicar diferentes modelos. Aunque no es específicamente para huracanes, el modelo de oleaje generado por viento (SPM, 1984) es uno de los más aceptados en la predicción de condiciones de oleaje. Este método considera un flujo de aire uniforme actuando sobre la superficie del mar en una longitud (fetch) y tiempo determinados, el cual genera un oleaje que puede o no alcanzar su total desarrollo, es decir, el máximo nivel de energía que las condiciones de viento consideradas le pueden transmitir. Cabe señalar que la suposición inicial es algo errónea en tanto que en general los huracanes

presentan continuas variaciones en la intensidad y dirección de sus vientos.

Al igual que con el modelo anterior, el primer paso consiste en la obtención de los avisos de huracán con información sobre su posición geográfica y la velocidad del viento ( $U_A$ ), así como el tiempo entre avisos. Posteriormente, aplicando las ecuaciones de la Tabla 2.3, se calculan los valores de altura y período de ola asociados a cada aviso, tanto para la condición de fetch limitado como para la de duración limitada. El fetch limitado ( $F$ ) está definido por la distancia entre el centro del huracán y el sitio en estudio, la cual al ser utilizada junto con el registro de la velocidad del viento ( $U_A$ ) permite calcular la altura ( $H_o$ ) y período de ola ( $T_o$ ), además del tiempo necesario para alcanzar estos valores. En cuanto a la condición de duración limitada, a partir del tiempo entre avisos ( $t$ ) y la velocidad del viento, es calculado el fetch necesario para el desarrollo de la altura y período de ola correspondientes.

Posteriormente, la duración obtenida en la condición de fetch limitado es comparada con la registrada entre avisos; desde luego, si el tiempo calculado es mayor al medido, los valores de altura y período mas acertados serán los definidos por la condición de duración limitada, siempre y cuando el fetch calculado sea mayor a la longitud entre el centro de la tormenta y el punto de interés, pues de lo contrario la altura y período de ola son determinados con las expresiones correspondientes a la condición de oleaje totalmente desarrollado (Tabla 2.3).

| Condición de Oleaje             |                                  |                         |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Fetch Limitado                  | Duración Limitada                | Totalmente Desarrollado |
| $H_o = 1.6E-3[U_A(F/g)^{1/2}]$  | $F = 1.75E-3[t^3 g U_A^2]^{1/3}$ | $gH_o/U_A^2 = 2.433E-1$ |
| $T_o = 0.2857[U_A F/g^2]^{1/3}$ | $H_o = 1.6E-3[U_A(F/g)^{1/2}]$   | $gT_o/U_A = 8.134$      |
| $t = 68.8[F^2/gU_A]^{1/3}$      | $T_o = 0.2857[U_A F/g^2]^{1/3}$  | $gt/U_A = 7.15E4$       |

Nota.  $H_o$  [m],  $T_o$  [s],  $U_A$  [m/s],  $F$  [m],  $t$  [s],  $g=9.81$  [m/s<sup>2</sup>].

**Tabla 2.3** Ecuaciones para la predicción de oleaje en aguas profundas. Modelo de oleaje generado por viento.

### c. Decaimiento de Oleaje

Los valores de altura y período de ola obtenidos aplicando los modelos descritos previamente corresponden a la región con máximo desarrollo del oleaje, la cual no necesariamente se localiza en la cercanía de la zona en estudio. Una vez que cesa la fuerza generadora, por efecto de la dispersión el oleaje experimenta un decaimiento a lo largo del recorrido hasta el punto de interés. El fenómeno es modelado por medio del Método de Bretschneider (CFE, 1983):

$$\text{Altura de Ola decaída:} \quad H_d = H_o [0.4F/(0.4F+D)]^{1/2} \quad [m] \quad (2.3)$$

$$\text{Período decaído:} \quad T_d = T_o [1-(H_o/H_d)]^{1/2} \quad [s] \quad (2.4)$$

Las Tablas 2.4 y 2.5 presentan los resultados de la modelación del oleaje extremal en la zona costera de Salina Cruz, correspondientes a los avisos con mayor altura de ola asociada a cada evento. El modelo de campo de presiones únicamente incluye el estudio de ocho huracanes ya que únicamente los registros más recientes incluyen las lecturas de presión. Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran las trayectorias de los huracanes que de acuerdo con los modelos habrían ocasionado las condiciones más críticas. Los resultados de la modelación son discutidos más adelante en el punto correspondiente al oleaje de diseño (punto III.1).

| NOMBRE   | FECHA               | Número de Aviso | LAT   | LONG    | Día (Greenwich) | Hora  | Velocidad del Viento [ms] | Duración [hrs] | Distancia al sitio de estudio X [km] | Distancia al sitio de estudio Y [km] | Distancia al sitio de estudio TOTAL [km] | Clasificación | Dist. [km] | Velocidad de Transición [m/s] | Presión [mb] | Velocidad de Transición [m/s] | Ur [m/s] | Riseo [m] | Mo [m] | To [h] | Hd [m] | Td [s] |  |
|----------|---------------------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---------------|------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--|
| SID      | 20-25 JUN 1988      | 5               | 14.50 | -95.00  | 21.00           | 18.00 | 20.58                     | 6.00           | 181.50                               | 50.12                                | 188.29                                   | Torm Tropical | 130.82     | 6.05                          | 1004.00      | 17.80                         | 72.03    | 7.90      | 23.69  | 3.52   | 17.64  |        |  |
| MIRIAM   | 23 OCT.-2 NOV 1988  | 11              | 13.70 | -94.00  | 24.00           | 18.00 | 18.01                     | 6.00           | 270.39                               | -121.94                              | 296.61                                   | Dep Tropical  | 72.55      | 3.36                          | 1004.00      | 15.57                         | 72.08    | 6.56      | 24.70  | 2.35   | 20.10  |        |  |
| BEATRIZ  | 18-20 JUN 1993      | 6               | 15.20 | -97.30  | 19.00           | 12.00 | 25.72                     | 6.00           | 103.71                               | 232.33                               | 254.43                                   | Torm Tropical | 61.64      | 2.85                          | 997.00       | 22.25                         | 89.37    | 7.06      | 22.97  | 2.55   | 18.95  |        |  |
| CRISTINA | 1.-3 JUL 1996       | 8               | 15.30 | -95.80  | 3.00            | 6.00  | 30.87                     | 6.00           | 92.80                                | 82.19                                | 123.81                                   | Torm Tropical | 131.21     | 6.97                          | 981.00       | 26.70                         | 88.86    | 8.59      | 22.51  | 4.96   | 14.62  |        |  |
| DOUGLAS  | 29 JUL.-6 AUG 1966  | 4               | 13.40 | -95.20  | 29.00           | 18.00 | 33.44                     | 6.00           | 303.73                               | 7.18                                 | 303.81                                   | Torm Tropical | 194.15     | 8.99                          | 982.00       | 28.82                         | 65.55    | 10.54     | 23.16  | 3.43   | 19.02  |        |  |
| OLAF     | 28 SEP.-12 OCT 1997 | 9               | 15.60 | -94.60  | 28.00           | 12.00 | 25.72                     | 6.00           | 59.26                                | -57.13                               | 82.32                                    | Torm Tropical | 35.03      | 1.62                          | 956.00       | 22.25                         | 69.53    | 6.66      | 23.08  | 3.33   | 16.32  |        |  |
| PAULINE  | 06-10 OCT 1997      | 11A             | 15.30 | -87.30  | 8.00            | 18.00 | 59.16                     | 3.00           | 82.60                                | 232.27                               | 259.05                                   | Huracan-4     | 146.19     | 13.54                         | 950.00       | 51.17                         | 85.87    | 15.11     | 23.39  | 5.35   | 18.60  |        |  |
| RICK     | 7-10 NOV 1997       | 7               | 12.70 | -103.50 | 8.00            | 12.00 | 20.58                     | 6.00           | 381.51                               | 902.09                               | 979.45                                   | Torm Tropical | 70.42      | 3.26                          | 1004.00      | 17.80                         | 72.71    | 6.84      | 23.70  | 1.21   | 21.51  |        |  |

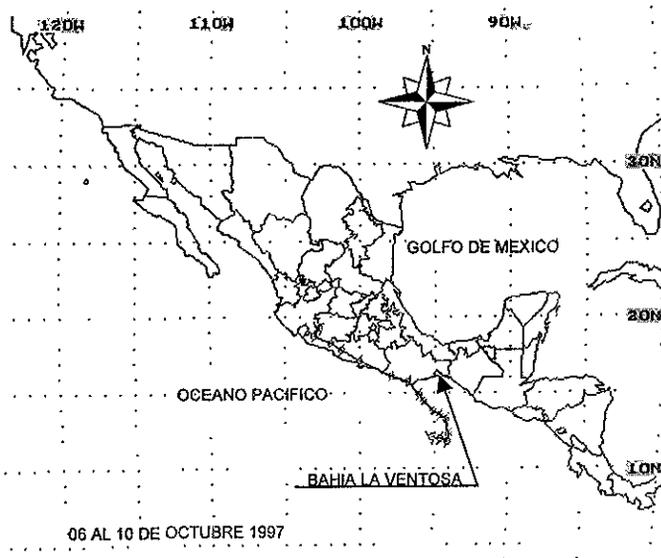
a) El sitio se estudio de localiza en latitud Norte 16.01° y longitud Oeste -95.01°  
b) La presión atmosférica en el sitio es 1013.25 [mb]

Tabla 2.4 Oleaje Extremal. Modelo de Viento y Campo de Presiones

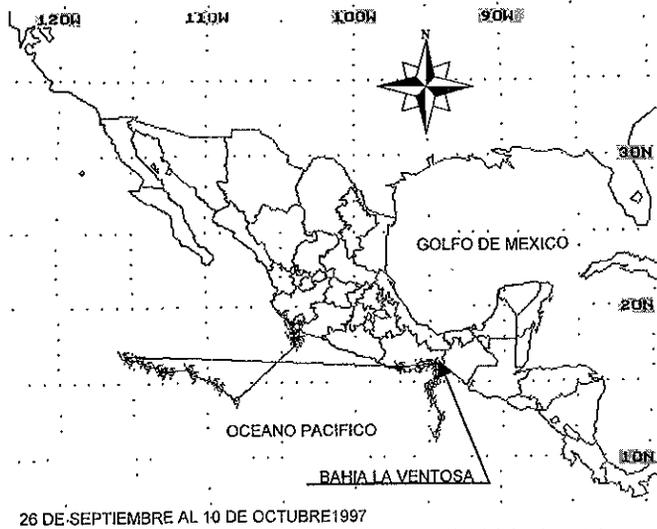
| NOMBRE    | FECHA                | Numero de Años | LAT | LON  | Da (Greenwich) | Hora (Greenwich) | Velocidad del Viento [m/s] | Duracion [hrs] | Distancia al sitio de estudio |               | Clasificación | Fase Limitada                |                              | Duración Limitada |                              | Evolución Clásica |                              | Causas/ Daños |                   |      |      |
|-----------|----------------------|----------------|-----|------|----------------|------------------|----------------------------|----------------|-------------------------------|---------------|---------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------|-------------------|------|------|
|           |                      |                |     |      |                |                  |                            |                | $\frac{1}{2}$                 | $\frac{1}{4}$ |               | Alm. de las Duraciones [hrs] | Alm. de las Duraciones [hrs] | Fecha [hrs]       | Alm. de las Duraciones [hrs] | Fecha [hrs]       | Alm. de las Duraciones [hrs] |               |                   |      |      |
| ANNETTE   | 9-12 JUN 1960        | 2              | 14  | -06  | 9              | 6                | 23 15                      | 6              | 255.63                        | 117 31        | 282 22        | Term.Tropical                | 6 29                         | 13 68             | 11 76                        | 63 79             | 3 43                         | 7 86          | Duración Limitada | 1 30 | 6 18 |
| ESTELLE   | 29 AUG - 9 SEP 1960  | 5              | 15  | -95  | 30             | 0                | 36 58                      | 6              | 167 79                        | -11 82        | 168 21        | Huracan-1                    | 9 09                         | 9 16              | 11 76                        | 108 17            | 8 43                         | 10 15         | Duración Limitada | 4 20 | 6 03 |
| SIMONE    | 1-3 NOV 1981         | 4              | 15  | -95  | 1              | 18               | 23 15                      | 6              | 112 23                        | -1 07         | 112 24        | Term.Tropical                | 3 96                         | 7 39              | 8 66                         | 65 79             | 3 43                         | 7 66          | Duración Limitada | 2 32 | 4 04 |
| AVA       | 1-3 JUL 1969         | 6              | 15  | -99  | 3              | 0                | 23 15                      | 6              | 168 68                        | 385 60        | 416 22        | Term.Tropical                | 7 63                         | 17 73             | 13 42                        | 83 79             | 3 43                         | 7 86          | Duración Limitada | 1 04 | 6 58 |
| FRANCESCA | 1-10 JUL 1970        | 10             | 11  | -95  | 3              | 18               | 43 73                      | 6              | 578 94                        | 42 21         | 580 47        | Huracan-2                    | 17 03                        | 17 81             | 18 54                        | 115 16            | 7 39                         | 10 60         | Duración Limitada | 2 28 | 9 04 |
| AGATHA    | 21-25 MAY 1971       | 7              | 14  | -100 | 23             | 0                | 36 58                      | 6              | 212 24                        | 515 06        | 537 08        | Huracan-1                    | 14 72                        | 18 17             | 17 54                        | 108 17            | 6 49                         | 10 15         | Duración Limitada | 1 92 | 6 51 |
| BRIDGET   | 14-20 JUN 1971       | 8              | 15  | -86  | 16             | 6                | 43 73                      | 6              | 167 78                        | 327 85        | 210 95        | Huracan-2                    | 10 27                        | 9 11              | 13 22                        | 115 16            | 7 59                         | 10 80         | Duración Limitada | 4 32 | 7 09 |
| OLIVIA    | 20 SEP - 1 OCT 1971  | 15             | 14  | -97  | 22             | 12               | 41 16                      | 6              | 267 80                        | 224 99        | 349 17        | Huracin-1                    | 12 44                        | 13 03             | 15 34                        | 111 72            | 7 03                         | 10 48         | Duración Limitada | 2 80 | 8 13 |
| PRISCILLA | 6-13 OCT 1971        | 10             | 13  | -97  | 6              | 18               | 36 01                      | 6              | 323 36                        | 182 12        | 371 12        | Huracin-1                    | 11 21                        | 14 17             | 14 97                        | 104 50            | 5 95                         | 9 80          | Duración Limitada | 2 19 | 7 78 |
| HEATHER   | 31 AUG - 1 SEP 1973  | 6              | 16  | -86  | 1              | 6                | 23 15                      | 6              | 56 57                         | -1 07         | 56 68         | Term.Tropical                | 2 82                         | 4 68              | 6 89                         | 83 79             | 3 43                         | 7 86          | Fech Limitado     | 2 82 | 6 89 |
| OLIVIA    | 20-23 SEP 1976       | 11             | 15  | -85  | 22             | 12               | 33 44                      | 6              | 96 01                         | -22 52        | 92 78         | Term.Tropical                | 5 21                         | 5 75              | 8 19                         | 100 70            | 5 42                         | 9 44          | Fech Limitado     | 5 21 | 9 19 |
| PAUL      | 16-30 SEP 1982       | 12             | 14  | -95  | 20             | 12               | 15 43                      | 6              | 178 90                        | -54 80        | 187 11        | Dep. Tropical                | 3 41                         | 11 90             | 8 97                         | 68 41             | 2 06                         | 6 41          | Duración Limitada | 0 89 | 4 83 |
| BLANCA    | 6-16 JUN 1985        | 8              | 12  | -97  | 8              | 0                | 33 44                      | 6              | 490 04                        | 171 85        | 519 30        | Term.Tropical                | 12 32                        | 18 18             | 16 33                        | 100 70            | 5 42                         | 9 44          | Duración Limitada | 1 61 | 7 92 |
| IRWIN     | 3-9 AUG 1987         | 10             | 14  | -96  | 5              | 0                | 25 72                      | 6              | 256 69                        | 149 60        | 297 10        | Term.Tropical                | 7 17                         | 13 67             | 12 42                        | 66 32             | 3 91                         | 8 28          | Duración Limitada | 1 49 | 6 52 |
| BLVD      | 20-22 JUN 1988       | 5              | 15  | -96  | 21             | 18               | 20 53                      | 6              | 167 79                        | 63 39         | 179 36        | Term.Tropical                | 4 48                         | 10 51             | 9 74                         | 79 00             | 2 96                         | 7 40          | Duración Limitada | 1 45 | 5 29 |
| MIRIAM    | 23 OCT - 2 NOV 1988  | 8              | 14  | -82  | 24             | 0                | 25 72                      | 6              | 223 35                        | -312 99       | 384 51        | Term.Tropical                | 8 15                         | 16 24             | 13 53                        | 88 32             | 3 91                         | 8 28          | Duración Limitada | 1 28 | 8 60 |
| BEATRIZ   | 16-20 JUN 1993       | 5              | 15  | -97  | 18             | 6                | 23 15                      | 6              | 134 46                        | 206 91        | 243 42        | Term.Tropical                | 5 84                         | 12 39             | 11 22                        | 83 79             | 3 43                         | 7 86          | Duración Limitada | 1 43 | 6 00 |
| CRISTINA  | 1-3 JUL 1996         | 8              | 15  | -96  | 3              | 6                | 30 87                      | 6              | 78 90                         | 95 44         | 123 83        | Term.Tropical                | 5 55                         | 7 17              | 9 85                         | 96 75             | 4 91                         | 9 07          | Duración Limitada | 3 76 | 4 38 |
| DOUGLAS   | 23 AG - 16 AUG 1998  | 5              | 14  | -97  | 30             | 0                | 36 01                      | 6              | 267 80                        | 203 46        | 338 32        | Huracin-1                    | 10 89                        | 13 27             | 14 48                        | 104 50            | 5 95                         | 9 80          | Duración Limitada | 2 33 | 7 65 |
| OLAF      | 28 SEP - 12 OCT 1997 | 7              | 15  | -85  | 28             | 0                | 41 16                      | 6              | 123 34                        | -44 01        | 130 96        | Huracan-1                    | 7 61                         | 6 76              | 11 05                        | 111 72            | 7 03                         | 10 48         | Duración Limitada | 5 88 | 4 24 |
| PAULINE   | 06-10 OCT 1987       | 11             | 15  | -96  | 8              | 15               | 51 44                      | 3              | 123 34                        | 106 26        | 162 80        | Huracin-3                    | 10 61                        | 7 28              | 12 80                        | 44 16             | 5 53                         | 8 28          | Duración Limitada | 1 99 | 6 62 |
| RICK      | 7-10 NOV 1987        | 7              | 13  | -104 | 8              | 12               | 21                         | 6              | 367 81                        | 915 68        | 866 77        | Term.Tropical                | 10 45                        | 32 84             | 17 21                        | 73 00             | 5 96                         | 7 40          | Duración Limitada | 0 54 | 6 69 |

a) El sitio de estudio de localiza en Bahad Norte 18 04' y longitud Oeste -95 01'

Tabla 2.5 Oleaje Extremal. Modelo de Oleaje Generado por Viento



**FIGURA 2.2** TRAYECTORIO DEL HURACAN PAULINA Y POSICION RESPECTO A LA BAHIA LA VENTOSA



**FIGURA 2.3** TRAYECTORIO DEL HURACAN OLAF Y POSICION RESPECTO A LA BAHIA LA VENTOSA

## II.7.2 Marejada de Tormenta

La determinación de las características de la marejada de tormenta es bastante compleja por la diversidad de factores que influyen en ella. Al igual que con el oleaje extremal la falta de información precisa obliga a la aplicación de herramientas matemáticas para su modelación. Aunque existen modernos modelos numéricos capaces de incluir la mayoría de las variables, su distribución es limitada por lo que tienen un costo elevado y difícil de justificar en un proyecto como el de un emisor submarino; para fines prácticos, una aproximación razonable utilizando modelos experimentales es suficiente.

Uno de los métodos más accesibles es el de la sobreelevación del nivel del mar producida por depresión atmosférica (Per Brunn, 1983). Además del diferencial de presiones entre el centro del huracán y la atmósfera estándar, este modelo considera el tamaño del huracán (radio), la distancia al punto de interés, el ángulo de incidencia, la velocidad de desplazamiento y la orografía de la costa; la altura de la marejada se obtiene de la lectura de curvas experimentales para diversas condiciones. La Tabla 2.6 muestra las alturas asociadas a los avisos de huracán seleccionados en el estudio de oleaje; considerando a la cercanía con el sitio como un factor determinante en la confiabilidad de dichos valores, se seleccionó el valor de 1.30 m.

| NOMBRE   | FECHA                | Numero de Aviso | LAT   | LON     | Dia (Greenwich) | Hora  | Velocidad del Viento [m/s] | y'     | x'      | TOTAL [km] | Clasificación | Velocidad de Traslación [km/hr] | Presión [mb] | Raio [km] | Diferencial de presión [mb] | Sobretensión [m] |
|----------|----------------------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|----------------------------|--------|---------|------------|---------------|---------------------------------|--------------|-----------|-----------------------------|------------------|
| BUD      | 20-22 JUN 1988       | 5               | 14 50 | -95 60  | 21              | 18 00 | 20 58                      | 181 50 | 50 12   | 188 29     | Torm Tropical | 21 77                           | 1004 00      | 72 03     | 9 25                        | 0 38             |
| MIRIAM   | 23 OCT - 2 NOV 1988  | 11              | 13 70 | -94 00  | 24              | 18 00 | 18 01                      | 270 39 | -121 94 | 286 61     | Dep Tropical  | 12 09                           | 1004 00      | 72 08     | 9 25                        | 0 26             |
| BEATRIZ  | 18-20 JUN 1983       | 6               | 15 20 | -97 30  | 19              | 12 00 | 25 72                      | 103 71 | 232 33  | 254 43     | Torm Tropical | 10 27                           | 997 00       | 69 37     | 16 25                       | 0 50             |
| CRISTINA | 1-3 JUL 1986         | 8               | 15 30 | -95 50  | 3               | 6 00  | 20 87                      | 92 60  | 82 19   | 123 81     | Torm Tropical | 21 87                           | 981 00       | 68 86     | 22 25                       | 1 23             |
| DOUGLAS  | 29 JU - 6 AUG 1996   | 4               | 13 40 | -85 20  | 29              | 18 00 | 33 44                      | 303 73 | 7 18    | 303 81     | Torm Tropical | 32 36                           | 982 00       | 69 55     | 31 25                       | 0 83             |
| OLAF     | 26 SEP - 12 OCT 1987 | 9               | 15 60 | -84 60  | 28              | 12 00 | 25 72                      | 59 26  | -57 13  | 82 32      | Torm Tropical | 5 84                            | 996 00       | 66 58     | 17 25                       | 1 27             |
| PAULINE  | 06-10 OCT 1997       | 11A             | 15 30 | -86 20  | 8               | 18 00 | 59 16                      | 82 60  | 114 35  | 147 14     | Huracán-4     | 16 44                           | 950 00       | 64 08     | 63 25                       | 2 90             |
| RICK     | 7-10 NOV 1997        | 7               | 12 70 | -103 50 | 8               | 12 00 | 20 58                      | 381 51 | 802 09  | 979 45     | Torm Tropical | 11 74                           | 1004 00      | 72 71     | 9 25                        | 0 09             |

a) El sitio se estudio de localiza en latitud Norte 16.01° y longitud Oeste -95 01°  
b) La presión atmosférica en el sitio es 1013.25 [mb]

Tabla 2.6 Modelación de la Marejada de Tormenta

### III. INGENIERÍA DE LA ZONA COSTERA

Una vez identificadas las características físicas de la región en la que será colocada la línea de descarga al mar, el siguiente paso en el diseño del emisor submarino corresponde al estudio del comportamiento del oleaje y del perfil playero tanto en condiciones normales como extremas. Los resultados de esta etapa son fundamentales para definir el trazo altimétrico de la línea y determinar las acciones dinámicas que actúan sobre la tubería, así como para identificar los requerimientos de protección de la misma en la frontera que conforma el frente costero. Como primer punto del proceso de análisis es imperante determinar las características del oleaje extremal a utilizar en el diseño.

#### III.1 Oleaje Extremal de Diseño

Para fines prácticos, las características del oleaje extremal de diseño (altura de ola y período asociado) definen las fuerzas hidrodinámicas máximas que deberá resistir la tubería y los cambios en la configuración de la playa por efecto de la misma; cabe recordar que el comportamiento diario del perfil playero está determinado principalmente por el oleaje normal (Sección II.4).

Evidentemente, la condición de diseño debe ser acorde con la vida útil de la obra y su importancia en el sistema del que forma parte, pues de lo contrario habría mayores posibilidades de que la obra falle durante su operación, o bien que resulte sobrada (incrementado el costo de la misma). Para seleccionar la condición adecuada, primeramente se requiere determinar la distribución del oleaje extremal en el tiempo, es decir, el período de retorno asociado a cada condición extraordinaria. Previamente, conviene comparar los resultados de la modelación del oleaje extremal (sección II.7.1.1), con el objeto de delimitar la congruencia física entre los mismos, así como con los registros u observaciones de oleaje normal.

Como consecuencia de las diferencias entre los modelos de cálculo de las características del oleaje extremal (altura de ola y período), es muy probable la existencia de discrepancias en los resultados obtenidos para un mismo evento; en tanto no es posible seleccionar simplemente entre uno u otro, resulta recomendable identificar el orden (rango) de valores de cada serie de datos para compararlos y discriminar aquellos que sean poco razonables físicamente. En cuanto a la congruencia entre el oleaje normal y el extremal, es importante hacer notar que las olas extremales con alturas menores a los valores significativos del oleaje normal (inciso 11.4) son despreciables en el cálculo.

Para determinar el período de retorno de cada altura de ola es necesario realizar un análisis estadístico y de probabilidad de ocurrencia al conjunto de valores asociados a los eventos extremales registrados durante cierto intervalo de tiempo. Considerando que la distribución de los eventos extremales no es uniforme en el tiempo, sino que por el contrario responde a un patrón aleatorio, resulta conveniente utilizar el método de valores máximos registrados (*Análisis Estadístico*, CFE, 1981). De acuerdo con esta metodología, una vez que los registros son ordenados en forma decreciente, el período de retorno de la altura de ola ( $T$ , en años) está definido como:

$$T = (n + 1) / m \quad (3.1)$$

en donde  $m$  es el número de orden asociado a cada registro y  $n$  es el período de observación en años; cabe señalar que la expresión anterior conduce al valor más conservador pues utiliza directamente el valor del período de observación. Con respecto a la probabilidad de excedencia del evento en un año cualquiera ( $P$ ), esta es definida por el inverso del período de retorno,

$$P = 1/T \quad (3.2)$$

En tanto, aplicando la teoría probabilística y suponiendo que la ocurrencia del evento en un año es independiente de la ocurrencia en los años anteriores o posteriores, el riesgo

( $R$ ) de que determinada altura de ola sea excedida al menos una vez durante la vida útil ( $U$ ) es:

$$R = 1 - (1 - (1/T))^U \quad (3.3)$$

Por otro lado, una vez obtenido el período de retorno de las alturas de ola obtenidas con los diferentes modelos de oleaje, las parejas de datos (de cada serie) son interpoladas con diversos modelos de ajuste para encontrar una expresión que permita calcular el período de retorno de cualquier altura de ola. Con el objeto de obtener el mejor ajuste es conveniente probar el mayor número de modelos, seleccionando aquel con mejor correlación y cuyo rango de extrapolación sea lógico físicamente (a mayor altura de ola, el período de retorno es más grande). Finalmente, a partir de la ecuación de ajuste de cada serie de datos, se define el valor de la altura de ola correspondiente al período de retorno seleccionado para diseño.

Para la determinación del período de ola de diseño es conveniente construir una curva *altura de ola – período* con los resultados de la modelación de oleaje extremal.

Al aplicar la metodología descrita para determinar el oleaje de diseño para el emisor submarino de la Bahía de la Ventosa, resalta la similitud en los rangos de altura de ola obtenidos con cada modelo; sin embargo, la falta de congruencia entre los resultados de cada evento y la diferencia en los intervalos de observación, no permiten concluir con un valor de diseño (Tablas 2.4 y 2.5). Por lo anterior, lo conveniente para este caso fue construir las curvas de ajuste *altura de ola – período de retorno* de cada serie de valores, para posteriormente obtener el promedio de los dos ajustes y definir así el comportamiento esperado.

La Figura 3.1 muestra las curvas de ajuste de los puntos definidos por la altura de ola y el período de retorno, así como la curva del comportamiento medio. En todos los casos el modelo de ajuste más adecuado corresponde a una curva tipo Weibull ( $T=A \cdot B \cdot \exp(C \cdot H_o^D)$ ).

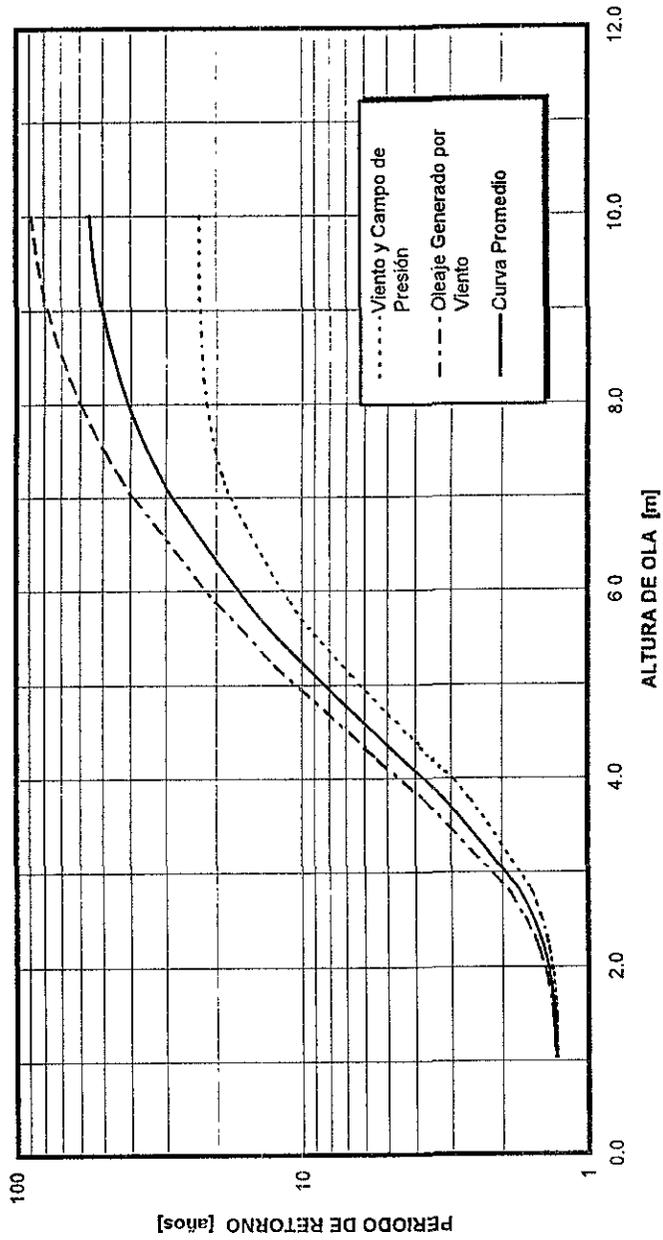


Figura 3.1 Curva de Ajuste Altura de Ola - Periodo de Retorno

Considerando la curva media y un período de retorno de 25 años (definido en función del plazo de operación de la planta de tratamiento), la altura de ola de diseño correspondiente es de 6.50 m, con una probabilidad de excedencia del 64% durante el mismo lapso de tiempo. Con respecto al período de la ola, en tanto que no se encontró un comportamiento bien definido entre la altura de ola y el período, se utilizó el criterio del período significativo, resultando un valor de 14.3 segundos.

### **III.2 Teoría de Oleaje**

Como ya se mencionó, el comportamiento del perfil playero y la magnitud de las fuerzas que actuarán sobre la tubería dependen fundamentalmente de las condiciones del oleaje normal y extremal respectivamente. Sin embargo, es fácil intuir que tales características no son iguales en cualquier punto de la superficie marina, sino que por el contrario, varían en función de las características propias de las regiones que atraviesa la ola al propagarse. De lo anterior, resulta evidente la necesidad de determinar las características del oleaje en la zona donde se colocará la obra. Aunque en la actualidad existen diversos modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento del oleaje en extensas regiones (e.g. el modelo REF-DIF desarrollado por el CERC), para fines del diseño de un emisor submarino es suficiente con la aplicación directa de los fundamentos teóricos de dichos modelos, es decir, la teoría lineal de oleaje (Teoría de Airy) y el fenómeno de refracción descrito por la Ley de Snell.

Para definir el comportamiento de oleaje en un punto cualquiera se requiere conocer primeramente las características de la onda de ola. De acuerdo con la teoría de Airy, en función de la interacción entre la onda y el fondo marino, existen tres regiones que caracterizan la propagación del oleaje. La primera corresponde a aguas profundas, en donde el fondo marino no tiene influencia en el comportamiento de la onda y ésta se propaga libremente. Una vez que la ola cruza el límite de aguas profundas (profundidad =  $\frac{1}{2}$  longitud de la onda,  $L$ ) y entra a la zona de aguas intermedias, las órbitas de movimiento comienzan a deformarse por efecto de la disminución en la profundidad ( $d$ ), provocando la modificación de la onda (longitud y altura) y en consecuencia de la

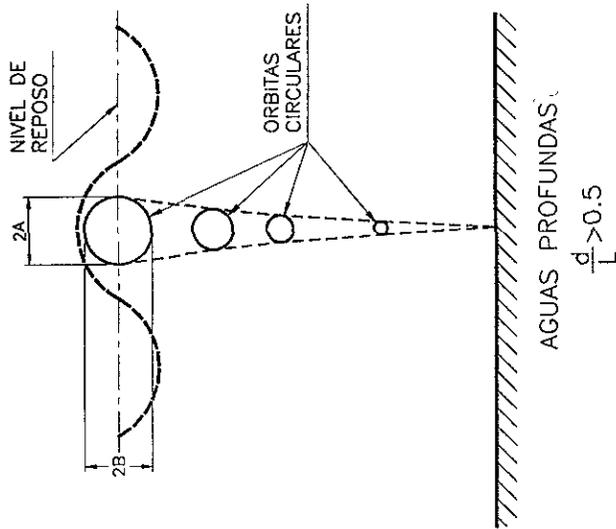
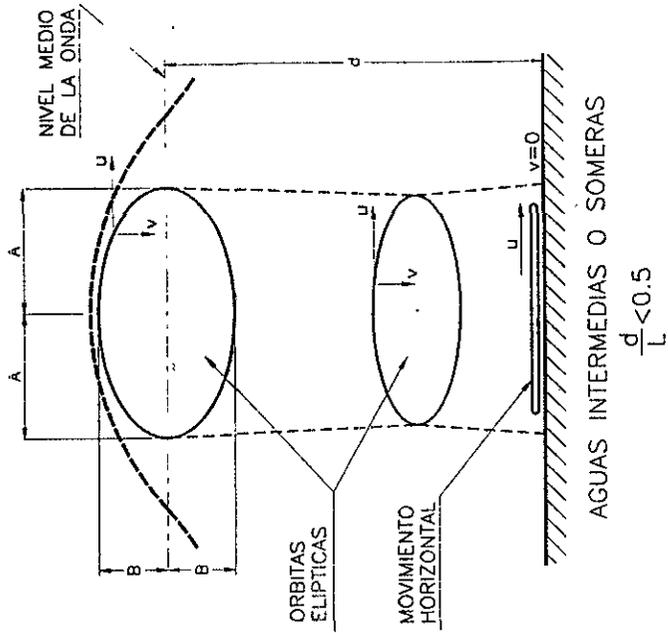
celeridad ( $C$ ) y otras características. Finalmente, la onda deformada llega a aguas someras ( $d/L < 1/20$ ), donde las órbitas de movimiento se comprimen volviéndose inestables y desembocando en el rompimiento de la onda cuando la profundidad ya no puede soportar la altura de la onda. Aunque la profundidad de rompiente de un sitio específico esta influenciada por las características propias del lugar (y por tanto requeriría de estudios de altura - profundidad con mediciones en campo), una aproximación preliminar puede obtenerse aplicando el criterio de Munk (SPM, 1983), según el cual la profundidad de rompiente de determinada ola corresponde a 1.28 veces la altura de la misma. La Tabla 3.1 presenta las ecuaciones de Airy para obtener la longitud y celeridad de onda en cada una de las regiones descritas; la Figura 3.2 muestra los esquemas de movimiento en las regiones mencionadas.

|                      | Aguas Someras<br>$d/L < 1/20$ | Aguas Intermedias<br>$1/20 < d/L < 1/2$ | Aguas Profundas<br>$d/L > 1/2$ |
|----------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|
| Período de la onda   | $T$                           | $T$                                     | $T$                            |
| Longitud de la onda  | $L = T(gd)^{1/2}$             | $L = (gT^2/2\pi)\tanh(2\pi d/L)$        | $L_0 = gT^2/2\pi$              |
| Celeridad de la onda | $C = (gd)^{1/2}$              | $C = (gT/2\pi)\tanh(2\pi d/L)$          | $C_0 = gT/2\pi$                |

**Tabla 3.1** Características de la onda progresiva. Teoría lineal (Airy)

### III.2.1 Análisis de Refracción de Oleaje

Además de las modificaciones del oleaje definidas por la teoría lineal, uno de los aspectos de mayor importancia al modelar la propagación del oleaje hacia aguas someras es la refracción del oleaje. Este fenómeno consiste en la tendencia del frente de ola a alinearse con los contornos batimétricos, como consecuencia de la variación en la velocidad de la onda a lo largo de la cresta de ola por efecto de la profundidad (a mayor profundidad, mayor velocidad). El cambio en el ángulo de incidencia de las ondas significa la convergencia o divergencia de la energía de oleaje a lo largo de la costa, lo cual se refleja directamente en cambios en la altura de ola y consecuentemente en la magnitud de las fuerzas a considerar en el diseño de



REFERENCIA: MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES  
SECCION HIDRAULICA MARITIMA C.F.E.

Figura 3.2 Trayectorias de las Partículas de Agua

estructuras marinas. Adicionalmente, la refracción tiene influencia en los patrones de erosión y deposición de sedimento.

Para fines prácticos, el fenómeno de refracción puede ser modelado con una precisión aceptable a través del concepto del canal de energía, según el cual la transmisión de energía de oleaje permanece constante entre dos ortogonales o rayos de ola (las ortogonales son líneas imaginarias dibujadas perpendicularmente a las crestas de ola, desde aguas profundas hasta la línea de playa), al suponer que no existen pérdidas por fricción ni transmisión lateral de energía.

La construcción de los rayos de ola está fundamentada en la aplicación de la ley de Snell. Esta ley permite relacionar la modificación en la dirección de un rayo de ola con la variación de la celeridad de la onda como consecuencia de un cambio en la profundidad. El cálculo está definido por la expresión:

$$\text{sen } \alpha_2 = (C_2/C_1) \text{ sen } \alpha_1 \quad (3.4)$$

Los subíndices de esta expresión hacen referencia a dos profundidades consecutivas en la dirección del oleaje, en las cuales  $C$  corresponde a la celeridad de la ola y  $\alpha$  es el ángulo formado por la cresta de la ola y el contorno del terreno.

Desde luego, los rayos de ola que delimitan a los canales de energía sólo pueden ser trazados en la región donde la batimetría sea conocida; en cuanto al ancho inicial del canal ( $b_0$ ), este es establecido en función del detalle requerido. Completado el trazo de las ortogonales se mide el ancho del canal ( $b$ ) en cada curva batimétrica; dicho valor es necesario para calcular la altura de ola (en la profundidad correspondiente) mediante la ecuación:

$$H = (H_0) (K_S) (K_R) \quad (3.5)$$

en donde:

$H_0$  = altura de ola en aguas profundas

$K_S$  = coeficiente por reducción de la profundidad

$$K_S = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{n} \right) \left( \frac{C_0}{C} \right) \right]^{1/2}$$

$K_R$  = coeficiente de refracción

$$K_R = (b_0/b)^{1/2}$$

$n$  = coeficiente de grupo

$$\frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d}{L} / \sinh(4\pi d / L) \right]$$

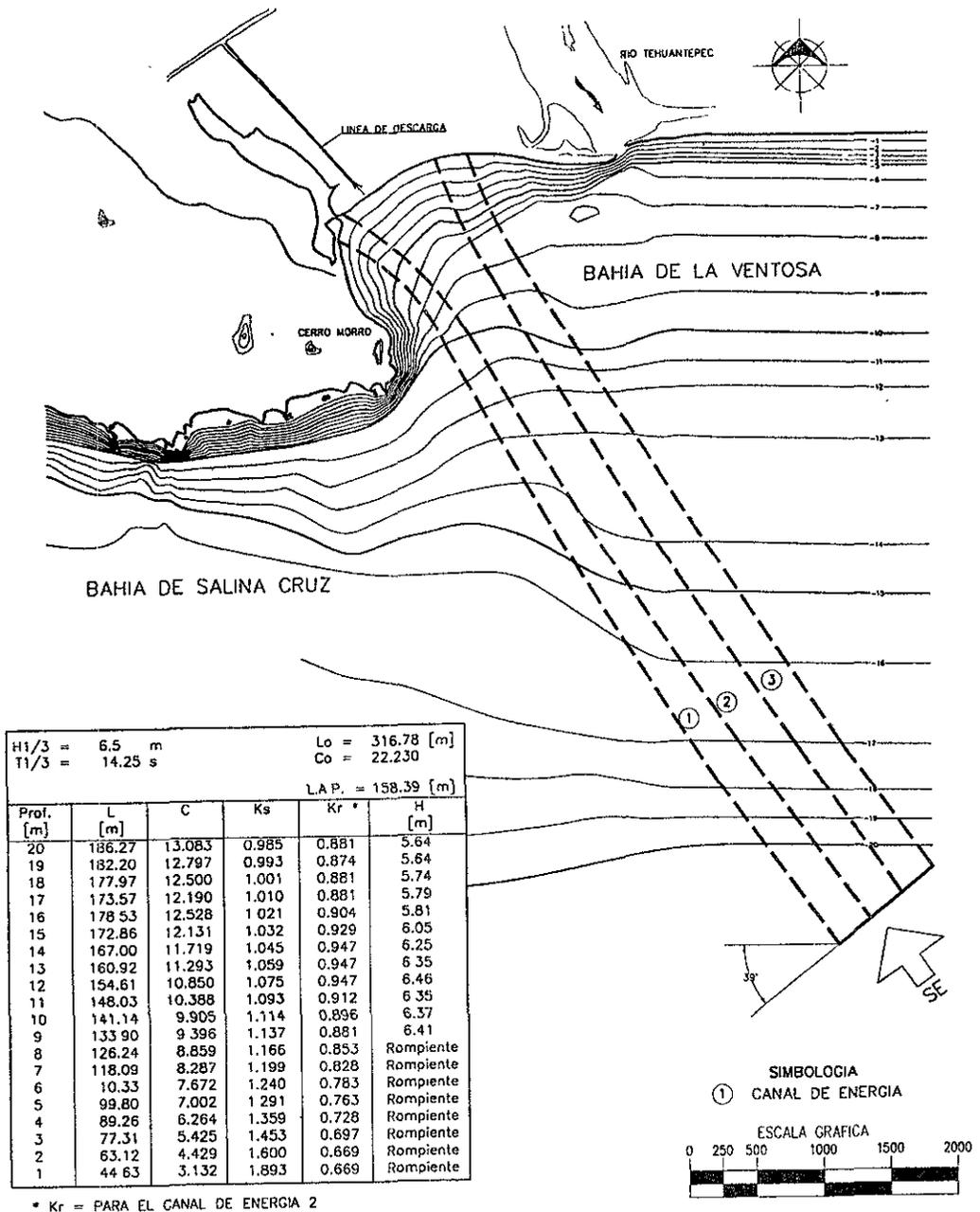
Evidentemente, el cálculo de la altura de ola está limitado por la condición de rompiente de ola definida previamente ( $H > 0.78d$ ).

Las figuras 3.3 a 3.6 muestran el comportamiento del oleaje en la Bahía de la Ventosa; las condiciones de oleaje estudiadas corresponden a las tres direcciones de oleaje normal (punto II.4) y al oleaje extremal de diseño (punto III.1) suponiéndolo proveniente de la dirección más desfavorable.

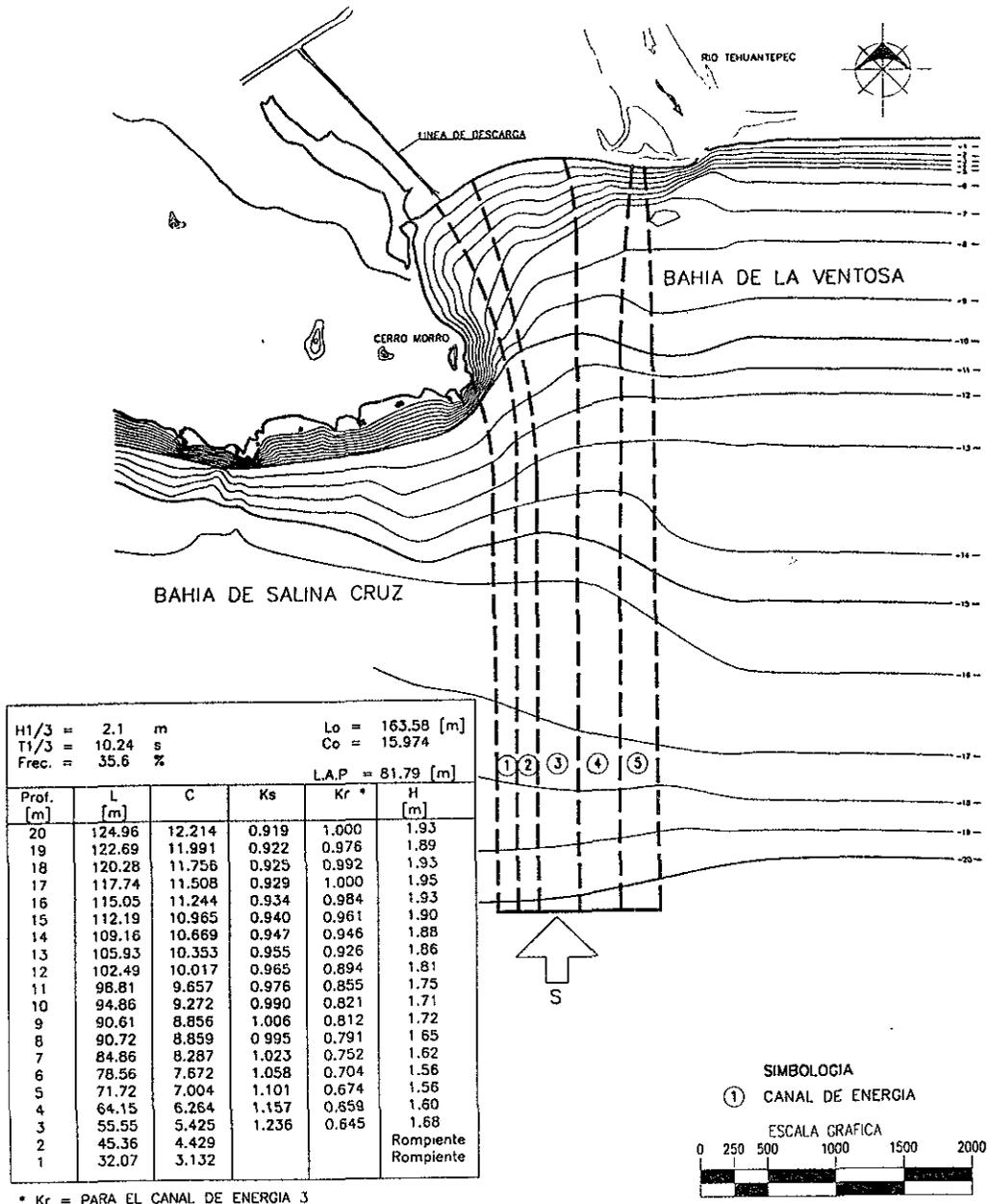
### III.2.2 Componentes cinemáticas del oleaje

En cuanto a la aplicación de la teoría de oleaje, el último punto de interés es la determinación de las componentes cinemáticas del oleaje, es decir, las velocidades y aceleraciones que experimenta la masa de agua como resultado del paso de una onda. La importancia de definir su magnitud radica en los efectos hidrodinámicos que tienen sobre los cuerpos localizados dentro del cuerpo marino.

La tabla 3.2 presenta las expresiones de la teoría lineal de oleaje para el cálculo de las velocidades y aceleraciones orbitales en función de la región de oleaje (aguas someras o intermedias) en que se encuentre la obra. Adicionalmente, la Figura 3.7 ilustra el comportamiento cinemático de las órbitas en función de la fase angular ( $\theta = 2\pi$  (período,  $T$ / tiempo,  $t$ )) en que se encuentre la onda.



**Figura 3.3** Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección SE



**Figura 3.4** Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección S

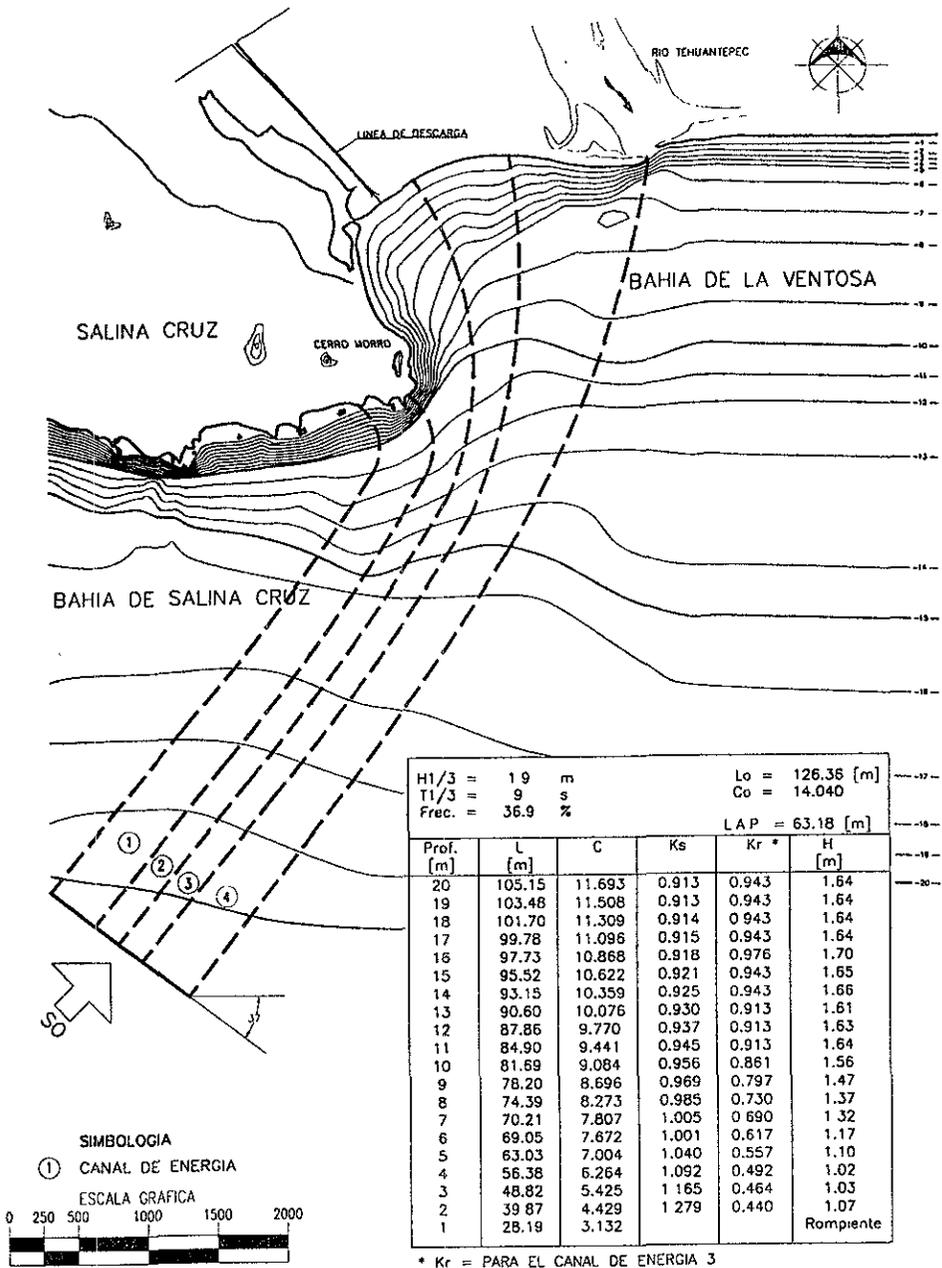
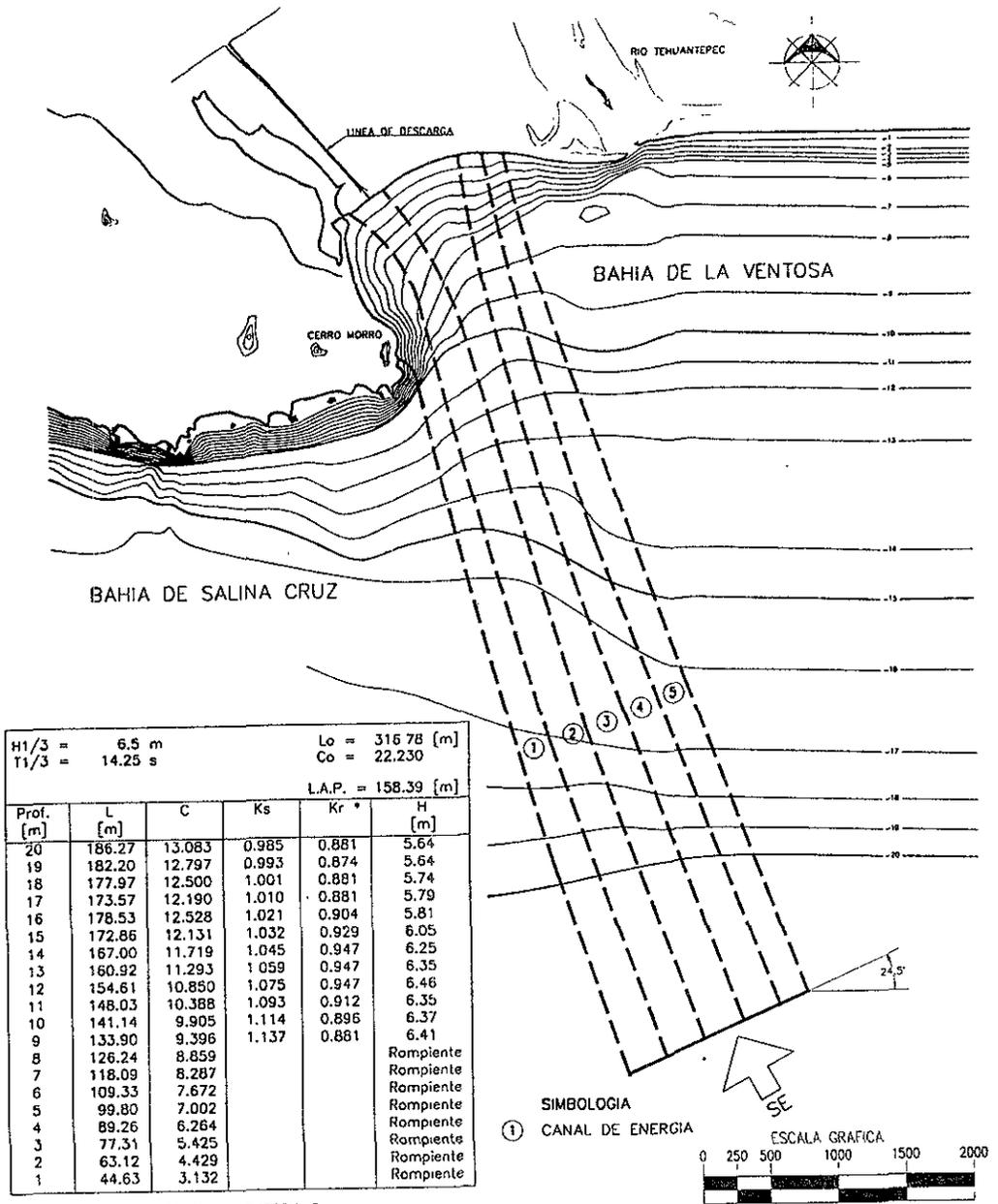


Figura 3.5 Diagrama de Refracción de Oleaje Normal. Dirección SO



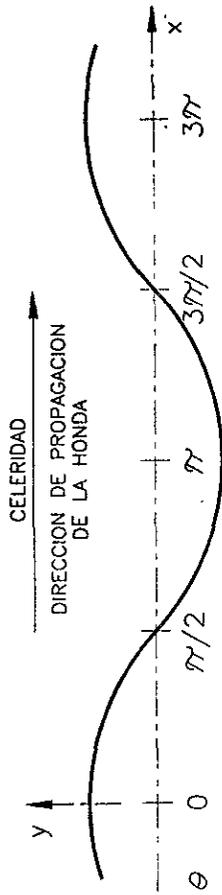
**Figura 3.6** Diagrama de Refracción de Oleaje Extremal. Dirección SE

|  | Aguas Someras<br>$d/L < 1/20$         | Aguas Intermedias<br>$1/20 < d/L < 1/2$  |
|--|---------------------------------------|--|
| Perfil de la superficie libre              | $\eta = (H/2)\cos\theta$              | $\eta = (H/2)\cos\theta$   |
| Velocidad horizontal [m/s]                 | $u = (H/2)(g/d)^{1/2}\cos\theta$      | $u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(d+y)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\theta$ |
| Velocidad vertical [m/s]                   | $v = (H\pi/T)[1+y/d]\sin\theta$       | $v = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(d+y)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin\theta$              |
| Aceleración Horizontal [m/s <sup>2</sup> ] | $a_h = (H\pi/T)(g/d)^{1/2}\sin\theta$ | $a_h = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(d+y)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin\theta$       |
| Aceleración vertical [m/s <sup>2</sup> ]   | $a_v = -2H(\pi/T)^2[1+y/d]\cos\theta$ | $a_v = \frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(d+y)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\theta$       |

**Tabla 3.2** Componentes cinemáticas de la onda progresiva.  
Teoría lineal (Airy)

En particular, interesa conocer el valor de las componentes cinemáticas en los puntos por donde pasa el emisor submarino (en la elevación “y” sobre el fondo). Obviamente, los valores de altura de ola (H) y longitud de onda (L) son los determinados para cada profundidad (d) en el análisis de refracción del oleaje de diseño; en el caso de rompiente, la altura de ola corresponde a la máxima posible (aproximadamente el 0.78 de la profundidad). Cabe hacer notar que los valores máximos se obtienen, de acuerdo con la Figura 3.7, cuando la fase angular ( $\theta$ ) es múltiplo de  $\pi/2$ .

Para fines del caso práctico estudiado en esta tesis, considerando la ubicación de la tubería submarina (detallada en el capítulo siguiente), se calcularon las componentes cinemáticas máximas a 0.50 m de fondo, de la profundidad -3.0 m a la -14.0 m por debajo el nivel de bajamar medio. La tabla 3.3 presenta las velocidades y aceleraciones orbitales máximas en las direcciones horizontal y vertical asociadas al oleaje de diseño ( $H_0 = 6.50$  m,  $T = 14.3$  s), para cada una de las profundidades consideradas.



|             |  |                    |  |                    |  |                    |  |                    |  |                    |
|-------------|--|--------------------|--|--------------------|--|--------------------|--|--------------------|--|--------------------|
| VELOCIDAD   |  | $u = +, v = 0$     |  | $u = 0, v = +$     |  | $u = -, v = 0$     |  | $u = 0, v = -$     |  | $u = +, v = 0$     |
| ACELERACION |  | $a_x = 0, a_y = +$ |  | $a_x = +, a_y = 0$ |  | $a_x = 0, a_y = -$ |  | $a_x = -, a_y = 0$ |  | $a_x = 0, a_y = +$ |

Figura 3.7 Comportamiento Cinemático de las Partículas de Agua

| Profundidad                     | -3    | -4    | -5    | -6    | -7    | -8    | -9    | -10   | -12   | -14   |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Velocidad [m/s]                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Horizontal                      | 2.072 | 2.372 | 2.615 | 2.841 | 2.972 | 3.178 | 3.064 | 2.862 | 2.605 | 2.291 |
| Vertical                        | 0.056 | 0.084 | 0.082 | 0.082 | 0.079 | 0.079 | 0.072 | 0.064 | 0.053 | 0.043 |
| Aceleración [m/s <sup>2</sup> ] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Horizontal                      | 0.914 | 1.046 | 1.153 | 1.253 | 1.310 | 1.401 | 1.351 | 1.262 | 1.148 | 1.010 |
| Vertical                        | 0.037 | 0.037 | 0.036 | 0.036 | 0.035 | 0.035 | 0.032 | 0.028 | 0.023 | 0.019 |

**Tabla 3.3** Resumen de Velocidades y Aceleraciones.

### III. 3 Comportamiento y estabilidad del frente costero

Uno de los aspectos fundamentales en los proyectos de ingeniería costera, particularmente de aquellos localizados en la cercanía de la línea de playa, es el estudio del comportamiento del perfil playero. De los resultados de este estudio depende la definición de importantes componentes del proyecto, como los niveles mínimos de desplante de la tubería (para evitar la exposición de la tubería enterrada por efecto de cambios en la morfología de la playa) o los requerimientos de protección playera.

Como se ha mencionado previamente, la configuración del fondo marino depende de una amplia variedad de factores de entre los que destacan el oleaje, las mareas y el tamaño del sedimento, aunque también es posible apreciar la influencia de otros como la temperatura y el ángulo de incidencia. De lo anterior, resulta evidente la dificultad para integrar un modelo con la capacidad de simular totalmente el comportamiento de cualquier perfil playero, por lo que es conveniente utilizar diferentes modelos a fin de complementar resultados y obtener una definición más amplia del comportamiento del fondo marino. A continuación se describe la aplicación de un modelo numérico y otro teórico para simular el comportamiento del perfil y evaluar la estabilidad de la playa respectivamente.

### III.3.1 Simulación del comportamiento del perfil playero con un modelo numérico

Para fines del proyecto de un emisor submarino, la simulación del comportamiento del perfil playero es de utilidad en la determinación de la zona de movimiento de sedimento en condiciones normales, así como el área de afectación por la acción del oleaje extremal de diseño. Obviamente, no está dentro de los alcances de la presente tesis detallar el sustento teórico y/o experimental del modelo, por lo que en los siguientes párrafos solamente se exponen los criterios utilizados en la aplicación del mismo.

Conocido como SBEACH (CERC, 1992), el modelo numérico combina la teoría de oleaje con observaciones experimentales para modelar el comportamiento bidimensional (perfil) de cualquier playa al experimentar la acción de diversas características costeras durante un período de tiempo definido, bajo la hipótesis de que los fenómenos paralelos a la línea de playa son despreciables y por tanto no hay transferencia lateral de material.

En este punto del proyecto, la confiabilidad de los resultados obtenidos en la etapa de identificación de las condiciones físicas de diseño es fundamental para la correcta modelación de comportamiento del perfil playero; si además de las limitantes propias del modelo se agrega la incertidumbre de los datos, la posibilidad de obtener resultados erróneos aumenta considerablemente. La configuración del modelo incluye los siguientes conceptos:

- Perfil topobatimétrico de la playa
- Granulometría del suelo
- Características del oleaje
- Niveles de Marea
- Período de simulación

En cuanto al perfil playero, lo más adecuado es disponer un levantamiento a lo largo del eje de la línea de conducción, para definir con detalle las características geométricas de la berma playera. Por otro lado, sobre las características granulométricas del terreno, el dato de interés es el diámetro medio del sedimento.

Una vez configuradas las características físicas del terreno, el siguiente paso corresponde a la definición del oleaje y la marea en condiciones normales y extraordinarias. En tanto que SBEACH tiene la opción de utilizar series de oleaje y de marea, su aplicación resulta evidente para la simulación de condiciones normales al permitir considerar arreglos aleatorios con diferentes valores de período, altura de ola y ángulo de incidencia, así como ciclos de marea. Un aspecto importante al construir dichas series es la congruencia en las frecuencias de ocurrencia de los valores de oleaje y en la duración de los ciclos de marea, con el objeto de aumentar la semejanza entre la simulación y el comportamiento real de estos fenómenos. Con respecto al tiempo de simulación, conviene que sean períodos largos (uno o más meses) que permitan definir la configuración estable del terreno, o bien, identificar un proceso de recesión del perfil playero.

A diferencia de la modelación de condiciones normales, la simulación de las condiciones extraordinarias tiene las siguientes particularidades: el tiempo está limitado a algunas horas cuando más; los niveles de marea correspondientes aumentan como consecuencia de la marejada de tormenta; y las características de oleaje son directamente las determinadas para diseño. De los resultados de esta modelación, interesa principalmente identificar la modificación en la geometría de la berma.

De acuerdo con la metodología y recomendaciones de los párrafos precedentes, el modelo SBeach fue utilizado para simular el comportamiento del perfil playero de la Bahía de la Ventosa. Desde luego, las características y condiciones físicas consideradas son las definidas en el Capítulo II y en el punto correspondiente al oleaje de diseño. Los resultados son detallados a continuación.

La modelación del comportamiento en condiciones normales inició con la simulación de un periodo de 30 días, entre cuyos resultados destaca el desplazamiento de la cresta de la berma, aproximadamente 15 m con respecto a su posición inicial. Posteriormente, el perfil resultante fue sometido a las mismas condiciones de oleaje y marea en periodos de 30, 60, y 120 días, obteniendo como resultado un comportamiento estable (de la berma) en todos los casos. En tanto que el modelo matemático no puede regenerar el perfil original, la variación observada en la primer simulación puede ser explicada como el rango de variación normal en la configuración de la playa. Adicionalmente, los resultados obtenidos muestran una zona de continuo movimiento de sedimento, caracterizada por la formación de rizaduras, localizada desde la línea de playa hasta una profundidad de 5.0 metros por debajo del nivel de bajamar medio (ver Figura 3.8). Evidentemente, si la conducción fuera colocada superficialmente, estas variaciones de la configuración del fondo implicarían continuos cambios en las condiciones de apoyo, con lo que se afectaría la estabilidad y por tanto la seguridad de la estructura; de lo anterior, resulta recomendable enterrar al emisor en el tramo definido por la zona de comportamiento dinámico.

Con referencia a los efectos previsibles en un evento extremal semejante al de diseño, los resultados de la modelación señalan un desplazamiento (tierra adentro) cercano a los 35 m en la cresta de la berma; así mismo, se observa una acumulación de material en los primeros 25 metros mar adentro como consecuencia de la pérdida de material en un espesor de 20 cm a lo largo de más de 50 m. Para fines de la instalación de la conducción, lo anterior se traduce en la necesidad de desplantar a la tubería por debajo del perfil de recesión esperado, con el objeto de garantizar que permanezca enterrada sin que se modifiquen las sollicitaciones de diseño. La Figura 3.9 muestra el detalle del comportamiento de la berma en ambas condiciones de oleaje.

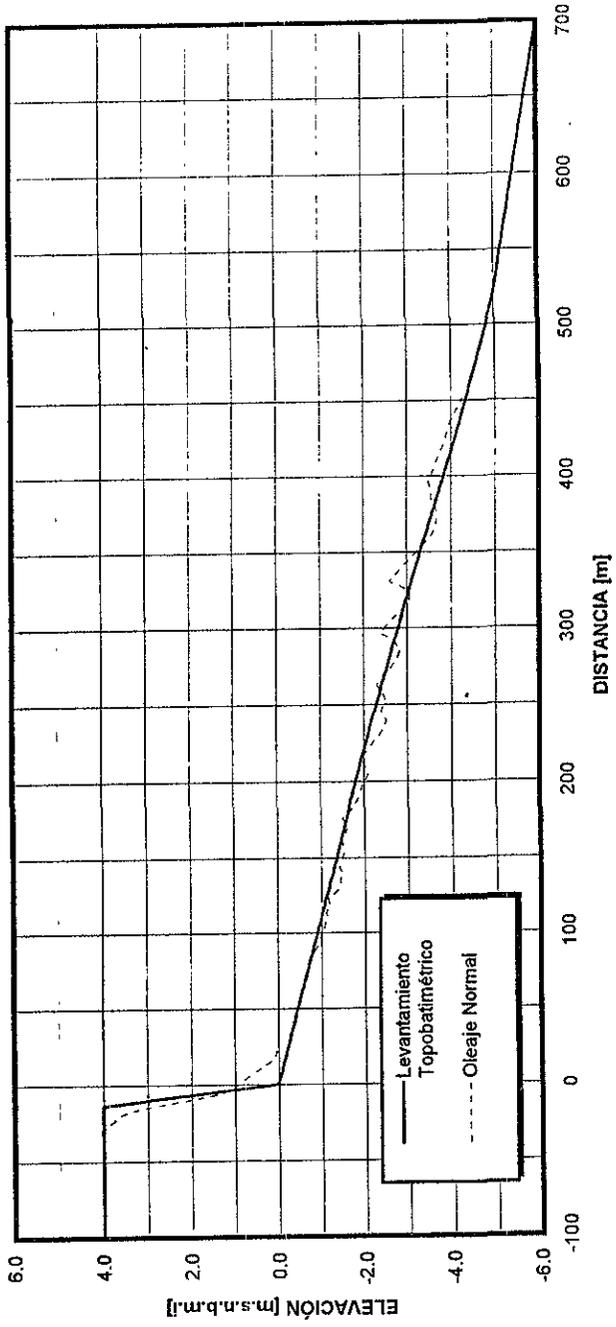


Figura 3.8 Simulación del Comportamiento del Perfil Playero

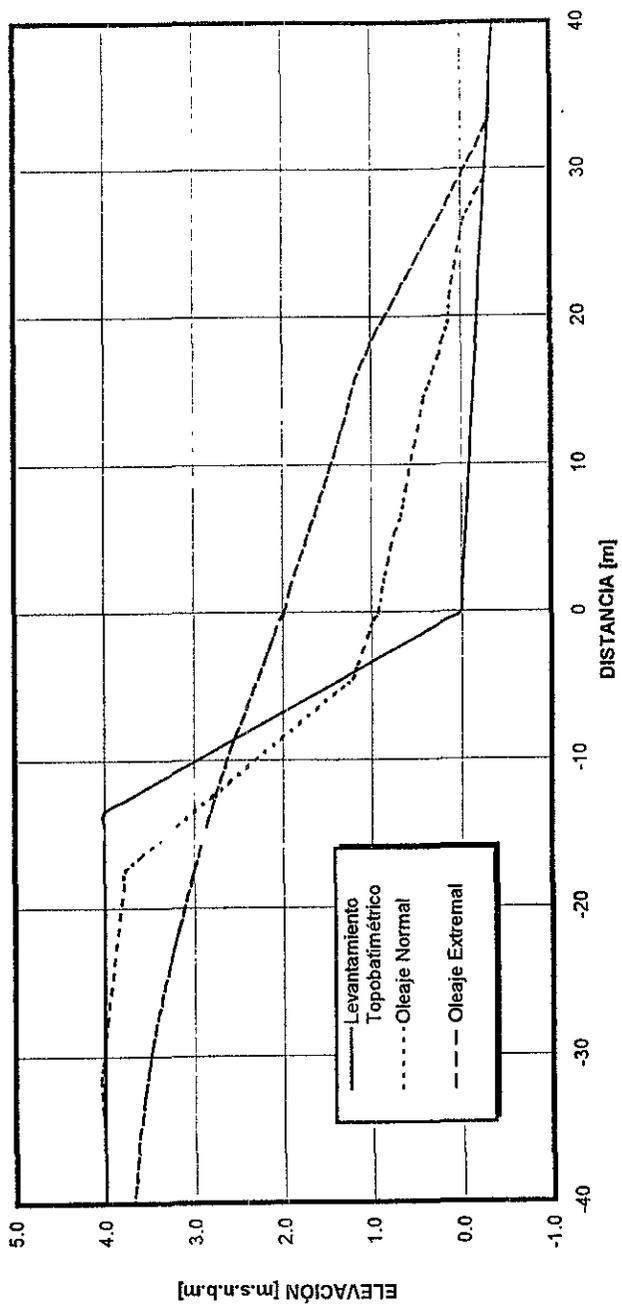


Figura 3.9 Detalle de las Variaciones en la Configuración de la Berma

### III.3.2 Análisis de estabilidad del perfil playero

Independientemente del comportamiento del perfil playero, otro aspecto relevante para el trazo de la línea de conducción es la evaluación de la estabilidad (conservación de la configuración media) del perfil playero, la cual depende fundamentalmente del equilibrio en la masa de suelo. Desde luego, para determinar si el perfil es estable o no, se requiere conocer previamente la configuración teórica de equilibrio para un terreno con características específicas. Una de las herramientas más accesibles para definir al perfil de equilibrio es el método simplificado de Dean para el diseño de rellenos playeros (Houston, 1996).

De acuerdo con este modelo teórico, las playas de arena o material fino tienden por naturaleza a una configuración de equilibrio en función de las características del sedimento, por lo que el comportamiento del perfil real puede intuirse dependiendo de la relación que guarde con el perfil teórico. Cabe aclarar que el concepto de la configuración estable esta basada en observaciones de campo y laboratorio, según las cuales el perfil tiene la forma definida por la siguiente expresión (Dean, 1987):

$$h = A(x)^{2/3} \quad (3.6)$$

en donde  $h$  es la profundidad a una distancia  $x$  de la línea de playa, en tanto que  $A$  es función de las características del material de la playa. Estudios más recientes (Dean, 1991) sugieren que el parámetro  $A$  depende de la velocidad de sedimentación:

$$A = 0.067 (w)^{0.44} \quad (3.7)$$

Aunque existen diversas opciones para el cálculo de esta velocidad, investigaciones específicas (Hallermeier, 1981) en agua con temperatura de 15° a 25° C. y sedimento de tamaño medio entre 0.15 y 0.85 mm, encontraron una expresión para relacionarla con el diámetro medio de la partícula ( $D$ ), según la cual:

$$w = 14 (D)^{1.1} \quad (3.8)$$

sustituyendo ecuaciones, finalmente se obtiene que el parámetro  $A = 0.21 (D)^{0.48}$ , con el cual es fácil construir el perfil teórico de la playa.

A partir de la comparación entre el perfil de equilibrio y el obtenido en el levantamiento topobatimétrico es posible inferir el comportamiento de la playa. Así pues, si el perfil teórico está por encima del terreno natural, seguramente la playa experimenta un proceso de recesión playera como consecuencia del desplazamiento de material seco hacia mar adentro para cubrir el déficit de material. Por el contrario, si la configuración teórica se encuentra debajo del perfil medido, el terreno sería propenso a perder el material sobrante, lo cual sucedería si se localiza en una saliente de la línea de costa de modo que el material pueda ser desplazado hacia los costados. En el siguiente capítulo se discute la influencia de los resultados de este análisis de estabilidad en el trazo altimétrico y el arreglo estructural del emisor submarino (punto IV.1).

En la Figura 3.10 se muestra la comparación del perfil observado en la Bahía de la Ventosa y la configuración estable definida con un tamaño medio ( $D_{50}$ ) de 0.35 milímetros. Considerando lo señalado en el párrafo precedente, existiría un exceso de material aunque no podría haber desplazamientos laterales de la masa de suelo sobrante pues la configuración de costa es prácticamente lineal. De lo anterior, es posible concluir que la línea de conducción puede ser colocada superficialmente pues no hay riesgo de que pierda sustento como consecuencia de desequilibrios en la masa de suelo.

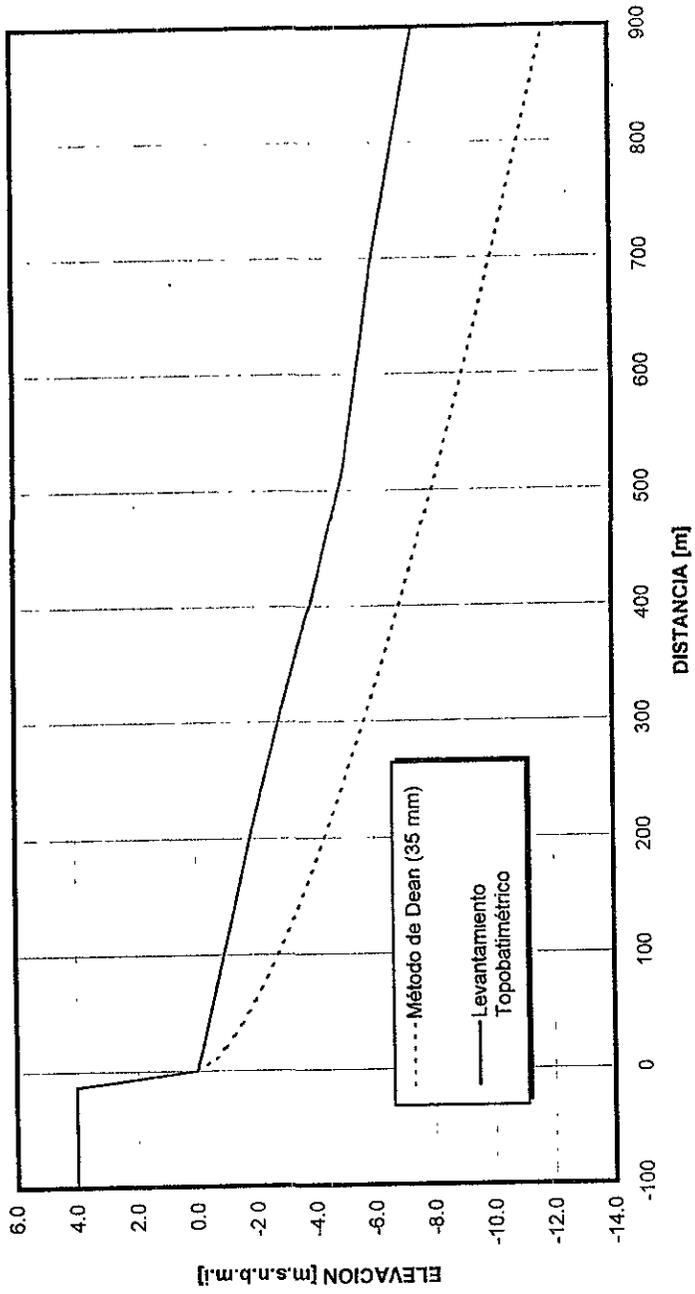


Figura 3.10 Comparación con el Perfil de Equilibrio

## **IV. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA LÍNEA DE DESCARGA**

Al completar la recopilación y el análisis de la información, la siguiente etapa en el proyecto corresponde al diseño estructural de la línea de descarga, para lo cual es necesario definir el trazo y conocer las características geométricas y mecánicas de la tubería. Además del cálculo de las fuerzas que actúan sobre la tubería, una parte importante del diseño estructural es la proposición de diferentes opciones de atraque, de entre las cuales es seleccionada la más adecuada en función de su desempeño mecánico, facilidad constructiva y costo.

### **IV.1 Trazo de la Línea de Conducción**

Según se comentó en la introducción, el trazo de la línea de descarga está sujeta en primer término a la localización de la fuente generadora del efluente o de la estación de bombeo, pero también a factores ajenos al diseño como la tenencia de la tierra, el uso de la zona costera y la opinión pública (la presencia de olores, ruido y/o la alteración del paisaje pueden motivar la oposición de la comunidad). Independientemente de la ubicación superficial del emisor, el trazo de la línea en el tramo submarino debe detallar las componentes altimétricas y planimétricas de la misma. El punto de partida para la selección del trazo es definido por la longitud del emisor.

#### **IV.1.1 Longitud del emisor**

Como primera aproximación es recomendable que la longitud del emisor sea calculada en función de una profundidad mínima de descarga (la normatividad de algunos países señala 15 m por debajo del nivel de bajamar; en México no existe ningún ordenamiento al respecto); aunque en todo caso, el criterio definitivo está en relación con los efectos de dispersión.

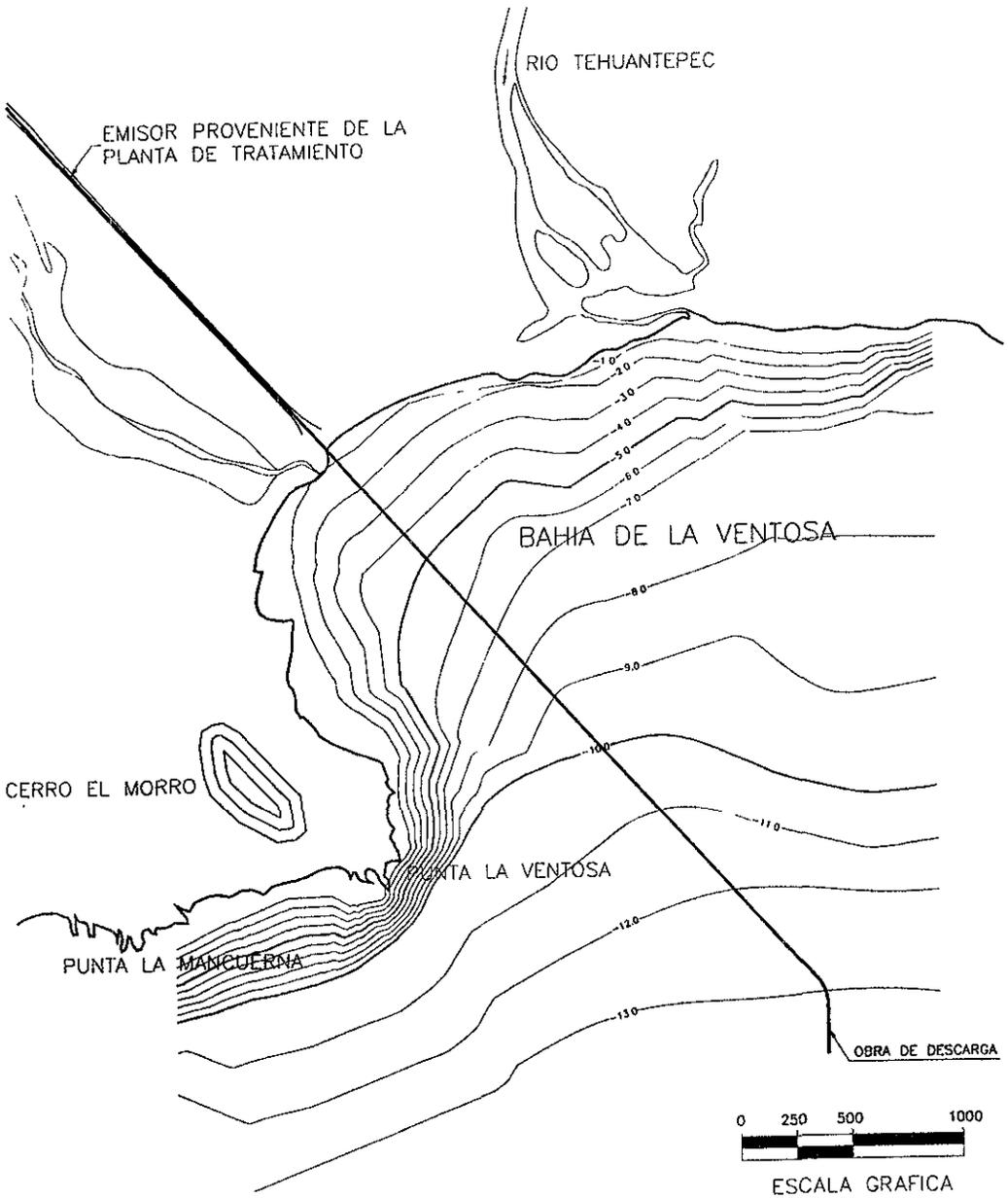
Igualmente importante resulta estudiar la morfología de la costa para prevenir la acumulación de contaminantes en lagunas, bahías, o puntas; si la obra se localiza en la cercanía de sitios con estas características, la longitud del emisor deberá ser la suficiente para evitar estos accidentes geográficos. Otra referencia útil en la determinación de esta dimensión es la de descargar preferentemente en la trayectoria de corrientes marinas, a fin de utilizarlas como vehículo dispersor.

Con base en lo anterior, el caso particular de PEMEX requiere que el efluente de la planta de tratamiento de la refinería sea descargado fuera de la bahía, de modo que pueda integrarse a la corriente costera sin ser obstruido por la Punta del Morro (Figura 4.1).

#### IV.1.2 Trazo Planimétrico

Aunque podría pensarse que el trazo planimétrico está simplemente definido por el punto de descarga y la conexión con el tramo superficial del emisor, es conveniente revisar si la tubería puede experimentar cargas accidentales relacionadas con la colocación, para en tal caso modificar el trazo o considerar dichas acciones en el cálculo estructural de la línea.

En particular, es importante identificar la localización de fracturas o fallas en el terreno, así como la posibilidad de deslizamientos de talud ocasionados por desequilibrios en la masa de suelo o por fuerzas instantáneas (e.g. sismo, impacto), pues lógicamente son eventos que ponen en riesgo la seguridad estructural de la obra. En el caso de fracturas del terreno, estas pueden ser detectadas a través de la inspección del sitio, permitiendo modificar el trazo o el diseño en un tramo bien definido. Respecto al movimiento de masas de suelo, las dimensiones y localización de estos tiene un alto grado de incertidumbre, por lo que la alternativa más viable para contrarrestar las fuerzas de empuje (proporcionales a la densidad del suelo fluidizado) que actuarían sobre la línea de conducción, es la de alinear a la tubería con la



**Figura 4.1** Trazo Planimétrico del Emisor Submarino

dirección del deslizamiento a fin de disminuir la componente perpendicular del mismo y por tanto la magnitud del empuje. Si se supone que los deslizamientos son paralelos a la pendiente de fondo predominante, resulta recomendable colocar la tubería paralelamente a dicha pendiente con el objeto de evitar los efectos descritos (Audibert, 1978).

Otro aspecto relevante en el trazo planimétrico es la orientación de la estructura de descarga, pues para facilitar la dispersión del efluente conviene que el eje longitudinal de la descarga sea perpendicular a la dirección de la corriente.

En la misma Figura 4.1 es posible apreciar que el trazo en planta del emisor de ejemplo es sensiblemente perpendicular a los contornos batimétricos, particularmente en la zona de pendiente más pronunciada, en tanto la estructura de descarga o difusor tiene una orientación norte-sur perpendicular a la corriente predominante en el lugar (sección II.5).

#### IV.1.3 Trazo Altimétrico

Con respecto a la colocación altimétrica de la línea de conducción el parámetro de referencia es la elevación del terreno natural, existiendo dos posibilidades: tubería enterrada o tubería superficial. La selección entre una u otra opción es función principalmente de las solicitaciones actuantes sobre la tubería, aunque las implicaciones constructivas y económicas no son despreciables.

Dentro de las ventajas de colocar enterrada la tubería destaca el que las fuerzas asociadas a oleajes, corrientes y flujos de lodo se vuelven despreciables en el cálculo estructural, por lo que el diseño del anclaje queda sujeto exclusivamente a las fuerzas gravimétricas; contrariamente, las tuberías superficiales requieren mayor resistencia mecánica y elementos de anclaje más pesados para soportar la acción de dichas fuerzas. Sin embargo, instalar tubería subterránea no siempre es la mejor alternativa;

además del costo del dragado y la dificultad constructiva, las fuerzas extraordinarias en la masa de suelo consecuencia de sismos y/o deslizamiento de taludes pueden ser más destructivas (por la incertidumbre en la magnitud de las mismas) que las acciones superficiales. En todo caso, si la conducción es enterrada, el colchón mínimo recomendable es de 1.0 m (Machemehl, 1978).

En general, la solución balanceada corresponde a dividir la línea de conducción en un tramo enterrado a lo largo de la región de intensas fuerzas hidrodinámicas y otro tramo superficial, desde el límite de dicha región hasta el punto de descarga. La extensión de la zona con comportamiento dinámico es determinada a través de la modelación del comportamiento del perfil playero (sección III.3.1). Con respecto a la colocación de tubería en la frontera tierra - mar, las consideraciones necesarias se incluyen en el tercer punto del presente Capítulo.

Para el caso práctico estudiado, se adoptó una solución balanceada con un primer tramo desplantado 1.5 metros por debajo del perfil medio en la región dinámica para emerger sobre el fondo marino a la profundidad de 5 metros, aproximadamente 500 m a partir de la línea de playa (Figura 4.2). Cabe comentar que el dragado tiene un elevado costo en esta obra como consecuencia del costo por suministro del equipo en relación con la dimensión de la misma (Anexo I), lo que refuerza la elección de enterrar la tubería tan solo en el tramo de comportamiento dinámico.

## **IV.2 Selección de la Tubería**

Al igual que en las conducciones terrestres, los emisores submarinos pueden ser de diferentes materiales dependiendo de diversos factores. En términos generales los materiales disponibles pueden ser clasificados en: metálicos, concreto y plásticos.

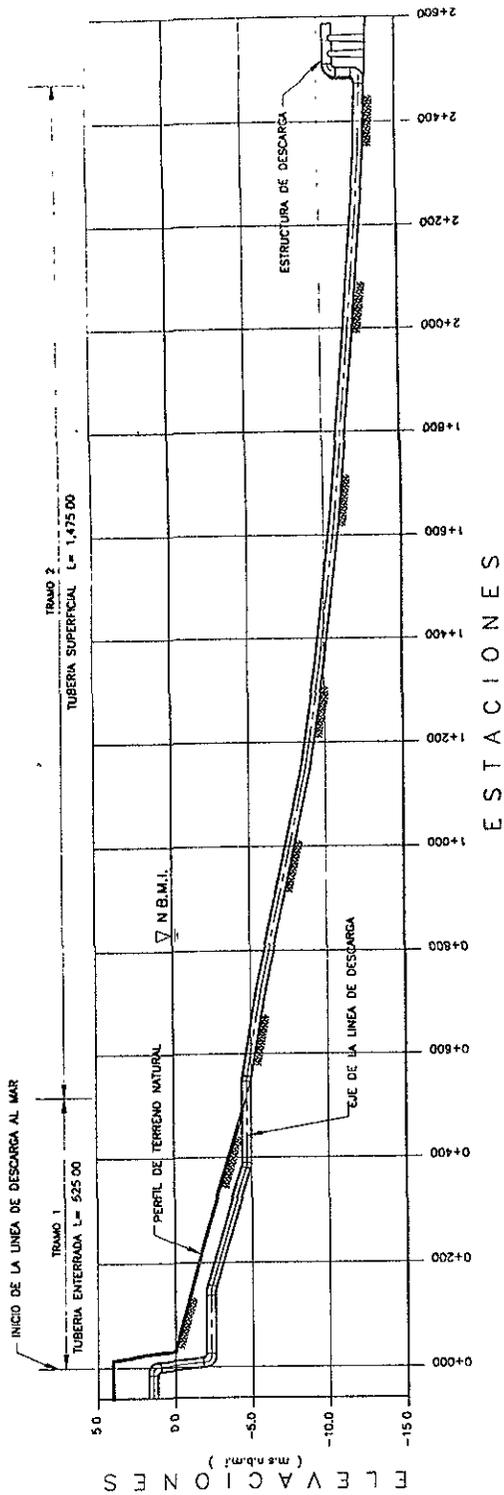


Figura 4.2 Perfil Longitudinal de la Línea de Conducción

La elección del material de la tubería esta condicionada fundamentalmente por la resistencia a las sollicitaciones mecánicas (oleaje, corrientes, presión, esfuerzos durante la construcción) y la adaptabilidad al terreno en función su peso, flexibilidad y opciones de ensamblado. Adicionalmente, la resistencia a la corrosión puede ser determinante en ambientes particularmente agresivos y/o cuando no hay condiciones (presupuesto limitado, falta de personal capacitado, etc.) para colocar protección anticorrosiva. Desde luego otro factor importante es el costo unitario de la tubería seleccionada y su compatibilidad con el resto del proyecto.

Los materiales metálicos, particularmente el acero o el hierro fundido, son adecuados para fondos rocosos e irregulares, aunque tienen el inconveniente de ser muy sensibles a la corrosión por lo que requieren de sistemas de protección (catódica, resinas epoxy, soluciones bituminosas, etc.). Constructivamente también son convenientes pues su alta densidad facilita la colocación, en tanto que las juntas a base de soldadura permiten cubrir largas distancias en poco tiempo. Hasta hace poco tiempo los materiales metálicos eran los más utilizados, y aunque las reparaciones son difíciles, en el largo plazo han mostrado buenos resultados.

La utilización de tuberías de concreto armado está limitada a diámetros grandes para los cuales no existen otros materiales o son muy costosos. Si bien tienen buen comportamiento mecánico, el proceso de instalación es delicado pues se realiza pieza a pieza a través de juntas flexibles (no bridas) con sellado de caucho o neopreno.

Recientemente, el uso de tuberías de plástico (PVC, polietileno de alta densidad, poliéster, etc.) se ha extendido como consecuencia de su bajo costo, alta flexibilidad y propiedades anticorrosivas; en particular, la experiencia ha demostrado que estas tuberías son muy convenientes para conducciones en suelos blandos y de diámetros pequeños y medianos. Sin embargo, es importante resaltar la importancia de la calidad en el diseño y la construcción del anclaje de la línea pues la baja densidad del material facilita la aparición de roturas asociadas a esfuerzos gravimétricos.

Con base en los aspectos técnico-económicos expuestos en los párrafos precedentes y considerando las características del terreno donde se colocará el emisor así como las dimensiones de la mismo, en el caso del ejemplo de esta se seleccionó una tubería de polietileno de alta densidad con diámetro exterior de 22" y relación RD igual a 17 (la determinación de las características geométricas es detallada en el Capítulo V). Otra alternativa sería utilizar tubería de acero; sin embargo, para el tamaño requerido, dicho material implicaría un costo considerablemente mayor que sería incompatible con las demás inversiones necesarias para la operación del sistema.

#### **IV. 3 Obras de protección playera**

En función de los resultados del estudio del comportamiento y la estabilidad del perfil playero, en algunos casos es recomendable la realización de obras que protejan a la configuración playera de la frontera tierra - agua en la zona por donde cruzará la conducción, aún cuando el perfil de desplante de la tubería se haya definido en función del nivel de recesión esperado (sección III.3); tales obras tienen por objetivo garantizar la estabilidad de la configuración playera, pues de lo contrario la tubería podría quedar expuesta, cambiándose las solicitaciones de diseño y poniendo en riesgo el adecuado funcionamiento de la conducción de descarga.

Las opciones de protección del perfil playero son diversas, aunque en primer instancia es posible diferenciarlas entre submarinas o superficiales. La elección del tipo de protección depende, particularmente, del evento que da origen a la inestabilidad del terreno costero.

Dentro de las obras de protección submarinas destacan los rompeolas sumergidos y los rellenos o excavaciones. Los primeros son utilizados para disminuir los efectos del oleaje en la configuración del fondo marino; la colocación y altura del rompeolas son determinadas en función de la energía a disipar. A su vez, las obras de movimiento de tierras son aplicables cuando se requiera construir artificialmente el perfil de equilibrio para solucionar problemas de desequilibrio en la masa de suelo.

En cuanto a las obras superficiales, en general están destinadas a proteger al terreno descubierto o seco contra la erosión provocada por la sobrelevación del nivel del mar y la acción de oleaje extraordinario. Este tipo de protección puede ser de pantallas de concreto, enrocamiento, bermas de arena, etc. Por lo general, un enrocamiento es el sistema más eficiente, pues ofrece un bajo costo (en comparación con las estructuras de concreto) con un margen de seguridad adecuado (evidentemente mayor que las bermas de arena); por lo anterior, a continuación se detalla el procedimiento para su diseño.

Al igual que los rompeolas, los enrocamientos colocados sobre el talud de la playa tienen la función de recibir la energía de oleaje y disiparla y, en este caso, evitar que afecte la configuración del terreno en el área de interés. Para resistir el empuje del oleaje las rocas deben tener un peso ( $W$ ) aproximado al definido por la fórmula de Hudson:

$$W = \gamma_s H^3 (\tan \theta) / K_D (S_s - 1)^3 \quad (4.1)$$

en donde:

$\gamma_s$  = el peso específico de la roca;  $S_s$  es el peso específico relativo.

$H$  = la altura de ola para diseño; para enrocamientos sobre la playa se puede considerar una altura igual al 78% de la profundidad definida por el nivel de pleamar mas la elevación de la marejada de tormenta

$\theta$  = el ángulo de inclinación del enrocamiento

$K_D$  = el coeficiente de estabilidad en condición de rompiente; función del tipo de roca seleccionada y el talud del enrocamiento.

Con respecto a las características geométricas del enrocamiento, el espesor puede ser calculado utilizando la expresión:  $r = n K_D (W / \gamma_D)^{1/3}$ ; siendo  $n$  el número de capas de material (es recomendable colocar al menos 2). Para garantizar la estabilidad de la obra conviene que el enrocamiento penetre en el terreno un metro por debajo del nivel de bajamar y que la cresta se ubique 0.50 m por encima de la elevación del agua mas el lamido (*runup*) de la ola, definiendo así los niveles de desplante. El *runup* o altura de lamido de la ola se obtiene gráficamente en función de la altura de ola, la inclinación del talud y la permeabilidad de la superficie.

En cuanto a los requerimientos para protección del emisor submarino en la Bahía de la Ventosa, la modelación del comportamiento del perfil mostró la recesión de la línea de playa en condiciones de oleaje extremal, haciendo conveniente la protección del talud playero a modo de garantizar que la tubería permanezca enterrada. De entre las opciones disponibles, la de colocar un enrocamiento resulta la más conveniente, por su facilidad constructiva y bajo costo acorde con las dimensiones de un emisor submarino.

Para el diseño de este enrocamiento la altura de ola es definida por una profundidad de 2.50 m (1.2 del nivel de pleamar + 1.3 de la sobrelevación por tormenta). Por otro lado, considerando la utilización de roca rugosa ( $K_D = 2.0$ ) con peso específico de  $2.3 \text{ T/m}^3$  y un talud con inclinación 3:1, al aplicar la formula de Hudson se determina que el peso requerido de las rocas es de 1.5 ton. Complementariamente, para darle mayor consistencia al terreno es conveniente colocar una malla geotextil entre la arena y el enrocamiento, tal como lo muestra la Figura 4.3. La Figura muestra también las características geométricas de la estructura de protección y la colocación preliminar de la tubería (definida en función del perfil de recesión esperado).

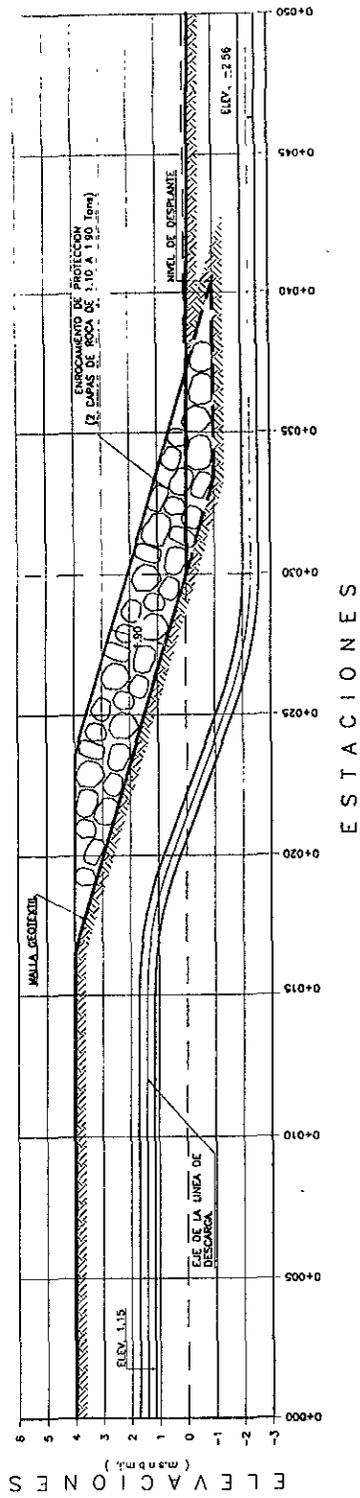


Figura 4.3 Sección Transversal del Entrocamiento

#### IV. 4 Análisis de Fuerzas

A partir de los datos obtenidos en la identificación de las condiciones físicas de diseño y los resultados del análisis del comportamiento costero, finalmente es posible determinar las fuerzas actuantes sobre la tubería para posteriormente diseñar los elementos de anclaje; la Figura 4.4 muestra de forma esquemática las fuerzas a considerar en el diseño. Para facilitar el cálculo conviene distinguir a las fuerzas entre hidrostáticas o gravimétricas e hidrodinámicas; en tanto las primeras actúan tanto sobre tuberías superficiales como enterradas, las segundas solo influyen en el diseño de tuberías expuestas.

##### IV.4.1 Fuerzas Gravimétricas

Como lo dice el nombre, las fuerzas gravimétricas son consecuencia de la acción de la gravedad sobre el conjunto formado por la tubería, el contenido de la misma y el medio en que se localiza; en otras palabras, la fuerza gravimétrica resultante corresponde al peso sumergido de la tubería (llena). De acuerdo con el principio de Arquímedes, para una longitud unitaria ( $L = 1.0 \text{ m}$ ) el cálculo está definido por la siguiente expresión:

$$W_S = W_T + W_C - W_D \quad (4.2)$$

en donde:

$W_S$  = peso sumergido de la tubería

$W_T$  = peso del material de la tubería

$W_T = \text{peso específico del material} * (\text{Área exterior} - \text{Área Interior})$

$W_C$  = peso del líquido contenido en la tubería

$W_C = \text{peso específico del efluente} * \text{área interior}$

Cabe señalar que de existir la posibilidad de que la tubería esté vacía en algún momento del periodo de proyecto,  $W_C$  debe considerarse nulo para prevenir fallas por esfuerzos gravimétricos.

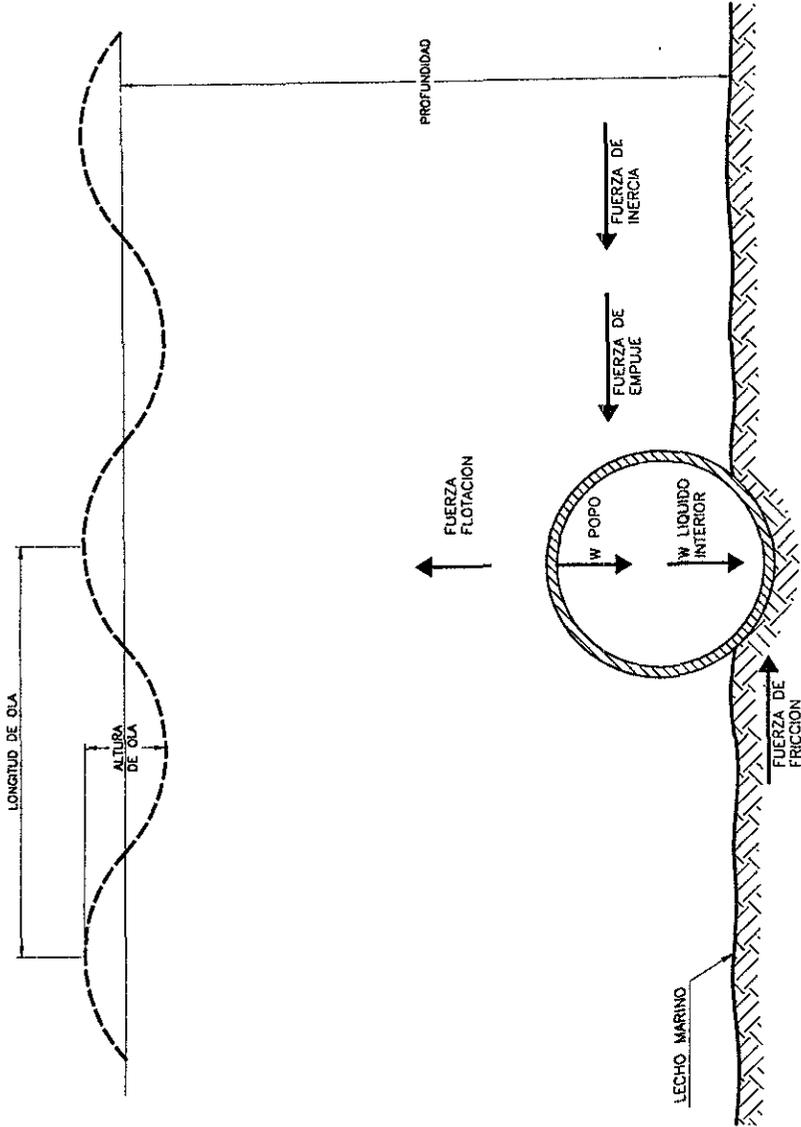


Figura 4.4 Fuerzas Actuantes sobre una Tubería Sumergida

$W_D$  = peso del volumen de desplazado; equivale al empuje de flotación.

$$W_D = \text{peso específico del agua de mar} * \text{Área exterior}$$

Es importante destacar que si la tubería está proyectada para ser enterrada, el cálculo de  $W_D$  debe considerar el peso específico del suelo saturado en lugar de la del agua, o de lo contrario sería muy probable que la tubería quedara expuesta y sujeta a las fuerzas hidrodinámicas para las cuales no estaría diseñada.

La obtención del peso sumergido permite identificar inmediatamente si la tubería permanece sumergida por sí sola en condiciones hidrostáticas ( $W_S$  positivo), o si por el contrario será necesario colocar al menos un anclaje para contrarrestar la fuerza ascendente de flotación.

De acuerdo con las características geométricas de la tubería seleccionada para el proyecto de la Bahía de la Ventosa y considerando los pesos específicos del polietileno de alta densidad ( $0.955 \text{ g/cm}^3$ , especificaciones ASTM), del agua de mar ( $1.025 \text{ g/cm}^3$ ), del efluente ( $1.022 \text{ g/cm}^3$ ) y del suelo fluidizado ( $1.300 \text{ g/cm}^3$ ), se obtienen las fuerzas gravimétricas mostradas más adelante (Tabla 4.1). Resalta que aún cuando la tubería siempre está llena (el arreglo del sistema de bombeo propuesto para este caso considera la construcción de un cárcamo de bombeo con nivel de paro automático, garantizando la sumergencia de la toma), la suma de las fuerzas gravimétricas es negativa lo cual implica que la tubería tendería a flotar y requerirá de lastre para su sujeción; esto independientemente de las fuerzas hidrodinámicas a las que está expuesta y que son objeto de discusión en las siguientes secciones.

#### IV.4.2 Fuerzas Hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas son consecuencia de la transformación de la energía cinética de un flujo al encontrar un cuerpo obstaculizando su trayectoria. Desde luego, en una obra submarina, las fuerzas son función de las componentes cinemáticas del oleaje y de las corrientes marinas. Para el caso de una sección circular, las fuerzas

predominantes son: la de arrastre ( $F_D$ ), la de inercia ( $F_I$ ) y la de levantamiento ( $F_L$ ); las primeras dos ocurren en el sentido horizontal ( $F_H$ ) en tanto la tercera actúa verticalmente. La fuerza horizontal puede calcularse mediante la expresión de Morrison (IMP, 1996).

$$F_H = F_D + F_I = 0.5\rho C_D D U^2 + \rho C_M A a_H \quad (4.3)$$

en donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido, (agua de mar =  $104.5 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ )
- $U$  es la suma de la velocidad horizontal máxima de las órbitas de oleaje y la velocidad de la corriente en  $\text{m/s}$ ; de acuerdo con lo expuesto en el punto III.1.2, las componentes cinemáticas son determinadas para cada profundidad.
- $D$  es el diámetro exterior del tubo, en metros.
- $a_H$  es la aceleración horizontal en  $\text{m/s}^2$ .
- $C_D$  es el coeficiente hidrodinámico de arrastre.
- $C_M$  es el coeficiente hidrodinámico de inercia.

Al igual que en el cálculo de las fuerzas estáticas, el valor de las fuerzas hidrodinámicas se determina para una longitud unitaria. En cuanto a la fuerza de levantamiento, Per Brunn (1993) propone la siguiente ecuación:

$$F_L = 0.5\rho C_L D U^2 \quad (4.4)$$

siendo  $C_L$  el coeficiente hidrodinámico de levantamiento.

Los coeficientes hidrodinámicos  $C_D$ ,  $C_M$  Y  $C_L$  son función de múltiples factores como el número de Reynolds, la geometría del tubo, la rugosidad de material y la trayectoria de movimiento en el lecho marino. De lo anterior se comprende que para

cada tubería los valores son diferentes y solo podrían determinarse a través de mediciones en laboratorio; sin embargo, diversos estudios han encontrado que una aproximación segura se obtiene considerando  $C_D = C_L = 1.0$  y  $C_M = 2.5$  (Beckmann and Thibodeaux, 1972).

El cálculo de las fuerzas hidrodinámicas actuantes a lo largo del emisor esta incluido en la Tabla 4.1, al final de la siguiente sección.

#### IV.4.3 Fuerzas Resistentes

Lógicamente, para cumplir adecuadamente con los objetivos del diseño, la tubería requiere de una fuerza capaz de contrarrestar las fuerzas gravimétricas e hidrodinámicas referidas en los puntos anteriores. Dicha fuerza define el peso de los elementos de anclaje y es determinada a partir de las expresiones del equilibrio estático.

Con respecto al equilibrio vertical, este se logra al colocar una fuerza de sentido contrario pero de igual magnitud a la resultante vertical:

$$R_V = F_L - W_S \quad (4.5)$$

Cabe hacer notar que si la tubería es más densa que el agua ( $W_S$  positivo), el peso en exceso al del agua desplazada actúa para contrarrestar las fuerzas hidrodinámicas, disminuyendo los requerimientos de anclaje. Evidentemente, para tuberías enterradas la resultante vertical corresponde directamente a el peso sumergido (calculado según lo expuesto en el punto IV.4.1).

En cuanto a la fuerza resistente horizontal ( $R_H$ ), la magnitud depende de las fuerzas de arrastre ( $F_D$ ) y de inercia ( $F_I$ ) definidas en la sección anterior, en tanto la

resistencia es proporcionada por la fuerza normal (N) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) entre el tubo y el suelo.

$$R_H = \mu N = F_D + F_i \quad (4.6)$$

En tanto que al asentarse el tubo en el suelo aumenta el coeficiente de fricción, resulta válido utilizar un valor de  $\mu = 1.0$  (Machemehl, 1978). Por otro lado, si se considera que en general la pendiente del terreno tiene un ángulo pequeño con respecto a la horizontal, la fuerza normal puede asumirse igual a la reacción efectiva del anclaje. De lo anterior resulta que, para conducciones colocadas sobre el fondo marino, la reacción total (equivalente al peso sumergido) del anclaje está definido por:

$$R_T = R_H + R_V \quad (4.7)$$

Similarmente, para tuberías enterradas la fuerza resistente  $W_R$  corresponde únicamente a la resultante vertical ( $R_V$ ); conviene reiterar que si la  $R_V$  tiene un valor negativo la tubería no flota y por tanto no requiere de anclaje.

La Tabla 4.1 presenta los resultados del cálculo de las fuerzas de anclaje requeridas en el caso de la tubería submarina de la Bahía de la Ventosa, para el correcto funcionamiento del emisor.

#### **IV.5 Alternativas de Anclaje**

Una vez determinada la magnitud de las fuerzas gravimétricas e hidrodinámicas que actúan sobre la tubería, el siguiente paso en el diseño estructural de la línea de conducción lo constituye la selección del tipo de anclaje con que se contrarrestará la acción de las fuerzas antes referidas. A continuación se describen las características y el funcionamiento de las alternativas más comúnmente utilizadas.



#### IV.5.1 Relleno de zanjas

Tratándose de tuberías enterradas con tendencia a flotar, la fuerza de anclaje puede ser proporcionada por la resistencia del suelo ( $q$ ) utilizado para rellenar la zanja. Para el cálculo de la resistencia del suelo es válido aplicar la teoría de la capacidad de carga de Skempton (Machemehl, 1978):

$$W_R = q D = 5c (1 + 0.2d/D) D \quad (4.8)$$

en donde  $c$  es el esfuerzo cortante (obtenido de la prueba triaxial en condición sin drenaje) y  $d$  el espesor del estrato, medido entre el nivel del suelo y el eje de la tubería;  $D$  es el diámetro exterior del tubo. Como se aprecia, la expresión permite calcular el colchón requerido para que un suelo de características determinadas (material de fondo, grava, concreto, etc.) resista la fuerza de flotación.

Sin embargo, de existir incertidumbre sobre las propiedades mecánicas del suelo (como en el caso de la Bahía de la Ventosa), es recomendable despreciar la resistencia del suelo y colocar anclaje para resistir la flotación.

#### IV.5.2 Ademes

Dentro de las alternativas de anclaje, una de las más frecuentes es la utilización de ademes constituidos por tubos más pesados y resistentes (concreto, acero, etc.) o bien, por un recubrimiento de concreto reforzado. Debido a las dificultades en el tendido, esta opción es utilizada preferentemente en zonas de baja profundidad.

Un aspecto muy importante al considerar la instalación de ademes como elementos de anclaje es el incremento en el diámetro exterior de la tubería, el cual a su vez aumenta la magnitud de las fuerzas hidrodinámicas. En consecuencia, el diseño de este tipo de anclaje es definido a través de un cálculo iterativo hasta encontrar el peso

requerido para resistir tanto a las fuerzas propias de la tubería como a las asociadas al incremento de dimensiones.

#### IV.5.3 Muertos de Concreto

De introducción más reciente, los muertos de concreto tienen una versatilidad que los hace muy recomendables para solucionar la colocación de un emisor submarino como el ejemplificado en este trabajo. En particular, la posibilidad de prefabricar y colocar piezas independientes de la tubería es de gran interés, pues facilita la organización y programación de la obra, lo cual incluso puede significar la disminución de costos. Adicionalmente, las propiedades del concreto permiten diseñar piezas ensamblables y con geometría especial para interactuar con el suelo y las fuerzas hidrodinámicas; al respecto, pruebas de laboratorio han demostrado que la forma trapezoidal proporciona una mayor estabilidad al disminuir la magnitud de las fuerzas exteriores y de los esfuerzos en el suelo (Beckmann and Thibodeaux, 1972).

#### IV.5.4 Pilotes

Finalmente, otra opción de anclaje es la colocación de pilotes metálicos con abrazaderas para sujetar a la tubería. En función de las fuerzas que cada pilote debe resistir y de las características mecánicas del suelo, los pilotes pueden ser de fricción (la fuerza resistente es proporcionada por adherencia) o atracados con un muerto de concreto enterrado. Aunque teóricamente es una solución adecuada, la incertidumbre en cuanto a las características del suelo aunada a la posibilidad de deficiencias constructivas en la colocación de los pilotes o en el mantenimiento de las piezas (el acero es altamente corrosivo) no hacen muy recomendable esta alternativa.

## IV.6 Arreglo Estructural

El arreglo estructural de la línea hace referencia a la manera en que se colocaran los elementos de anclaje propuestos (cuyas dimensiones son función del mismo arreglo), a fin de resistir con seguridad las fuerzas gravimétricas e hidrodinámicas actuantes sobre la tubería.

Específicamente, la definición en el diseño radica en decidir si la colocación del anclaje es continua o semicontinua, o por el contrario cada elemento de anclaje se encontrará separado por una distancia suficiente para que la tubería libre experimente un comportamiento semejante al de una viga. Desde luego, si la tubería queda en posibilidad de comportarse como viga, deberá de ser capaz de resistir los esfuerzos de flexión y cortante que tal condición implica; sin embargo, la colocación de anclajes aislados ciertamente supone un trabajo menor en comparación con los soportes continuos.

Por otro lado, en tanto que las fuerzas hidrodinámicas dependen directamente de la profundidad, las dimensiones del anclaje correspondiente a cada una de éstas serían diferentes y en consecuencia complicarían el diseño así como el proceso constructivo. Por lo anterior, es conveniente proponer la división de la línea en tramos definidos por ámbitos de profundidad o longitud, a modo de utilizar un elemento de anclaje tipo en cada tramo.

Para solucionar el problema de anclaje de la línea de descarga submarina de la planta de tratamiento, se eligió construir elementos prefabricados de concreto. Desde luego, el peso sumergido de los elementos está determinado por las fuerzas actuantes sobre la tubería (Tabla 4.1) y el peso específico del concreto sumergido ( $1200 \text{ kg/m}^3$ ). En función del trazo altimétrico de la línea y de las fuerzas de anclaje requeridas a lo largo de la misma, se propuso un arreglo estructural a base de tres tramos con atraques de diferentes pesos (sumergidos) según se detalla en la tabla siguiente.

|         | Profundidad [m] |       | Condición   | Anclaje Propuesto | Volumen de Concreto |
|---------|-----------------|-------|-------------|-------------------|---------------------|
|         | Inicial         | Final |             |                   |                     |
| Tramo 1 | 0               | -5    | Enterrada   | 485 [kg/10m]      | 0.404 [m3/10m]      |
| Tramo 2 | -5              | -10   | Superficial | 570 [kg/m]        | 0.477 [m3/m]        |
| Tramo 3 | -10             | -13   | Superficial | 485 [kg/m]        | 0.404 [m3/m]        |

**Tabla 4.2** Peso de los elementos de anclaje en cada tramo

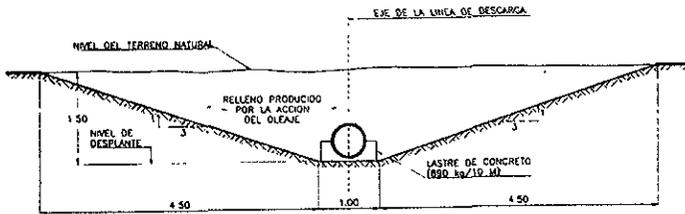
En cuanto a la geometría de los atraques, conviene proponer diferentes alternativas (Figura 4.5) y evaluarlas en función del costo de los materiales y del proceso constructivo requerido para su instalación (ANEXO I). De acuerdo con dicho análisis, la opción más eficiente para el caso de estudio es la colocación de lastres rectangulares de concreto.

#### **IV.7 Consideraciones Constructivas**

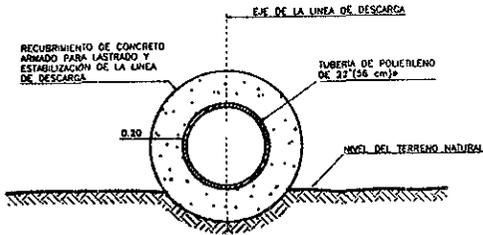
Como en toda obra de ingeniería, además de las dimensiones y especificaciones, un aspecto fundamental para el adecuado funcionamiento del emisor submarino es la selección del proceso de construcción. Si bien no entra dentro de los objetivos de este trabajo abundar sobre estos, a continuación se describen brevemente las características y consideraciones en la aplicación de los métodos más comunes.

##### **IV.7.1 Dragado de Zanjas**

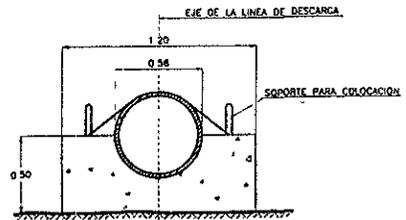
El dragado de zanjas submarinas es una labor bastante complicada y por tanto costosa (Machemehl, 1978). En primer instancia, la selección del método de dragado (chorro, corte mecánico, fluidización o arado) está condicionada por la naturaleza del fondo marino y las dimensiones de la zanja, consecuentemente no siempre hay disponibilidad inmediata del equipo necesario. Otro aspecto a tener en cuenta es que las zanjas pueden cegarse con rapidez, por lo cual conviene elegir un talud apropiado



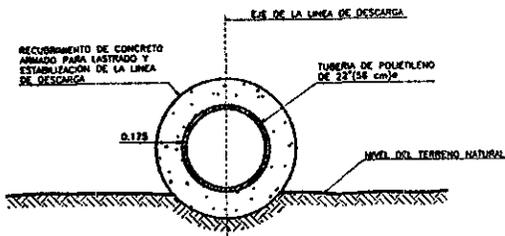
TUBERIA ENTERRADA  
TRAMO 1



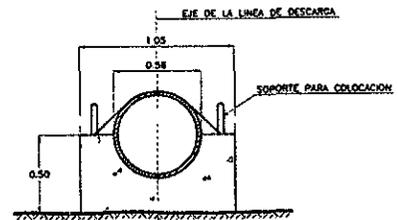
ADEME DE CONCRETO (1050 kg/m)  
TRAMO 2



LASTRE DE CONCRETO (1050 kg/m)  
TRAMO 2



ADEME DE CONCRETO (890 kg/m)  
TRAMO 3



LASTRE DE CONCRETO (890 kg/m)  
TRAMO 3

Figura 4.5 Alternativas de Anclaje

(1:5 para materiales sueltos) o bien utilizar un tablaestacado recuperable. Finalmente, si el relleno es de un material diferente al del fondo marino, también se debe revisar la elección del equipo para su colocación

#### IV.7.2 Construcción e instalación de los elementos de anclaje

Cuando los elementos de anclaje son independientes de la tubería resulta altamente recomendable diseñarlos como elementos prefabricados, de modo que puedan ser construidos y almacenados en tiempo y/o lugar diferente al de la obra. Por el contrario, si el anclaje es tipo ademe y requiere ser instalado en la superficie, al momento del tendido de la línea todas las piezas deberán estar terminadas y almacenadas en un lugar cercano.

Con respecto a la colocación, el método más eficiente es a través de una grúa adaptada a una embarcación y con el apoyo de un equipo de buzos. Aunque el ideal sería disponer de una plataforma para el movimiento de los elementos de anclaje (para no inducir esfuerzos en los mismos), comúnmente solo se utiliza el gancho de la grúa por lo que resulta obligado incluir asas de izaje adecuadamente diseñadas para soportar el peso propio del elemento.

#### IV.7.3 Tendido de la Línea

El tendido del emisor submarino depende fundamentalmente del tipo de tubería, los medios disponibles y la disponibilidad de espacio en tierra. Los procedimientos de colocación más frecuentes son: a) tubo a tubo, b) por tracción y c) desde barcaza; sin embargo, el ingeniero tiene la opción de proponer otras alternativas.

### *A. Colocación tubo a tubo*

Este procedimiento es empleado para la colocación de tuberías con grandes diámetros y materiales pesados y poco flexibles como el concreto. Cuando las profundidades son pequeñas se utiliza un chalán de acompañamiento, en tanto que para profundidades mayores las plataformas son los equipos más adecuados.

### *B. Por tracción*

La colocación por tracción es apropiada para tuberías armadas en la playa y posteriormente llevadas hasta su posición utilizando la tracción de un chalán. Aunque ha mostrado mejores resultados en aguas tranquilas, dependiendo de las condiciones de agitación de la superficie del mar, el proceso de tendido puede facilitarse sumergiendo o emergiendo la tubería.

### *C. Desde una barcaza*

Las barcazas son convenientes para colocar tuberías muy flexibles y de pequeño diámetro que pueden bobinarse en un carrete para luego ser extendidas paulatinamente. Otra posibilidad es realizar la conexión de las piezas de tubería dentro de la misma barcaza y luego dejarla caer en forma de S (por lo cual también es conocida como el método S).

Cabe señalar que para el tendido de tubería es necesario que esta incluya el lastre suficiente para vencer el empuje de flotación; tal contrapeso puede ser parte o la totalidad del recubrimiento de anclaje, o bien algún otra alternativa propuesta por el diseñador o constructor.

Cualquiera que sea el método seleccionado, es importante vigilar los radios de curvatura a fin de que permanezcan dentro de los valores permisibles y no se generen

esfuerzos elevados que puedan provocar la fractura del material o accidentes por deformaciones bruscas.

Desde luego, el proceso constructivo debe ser compatible con el sistema de anclaje propuesto (Figura 4.5) Así por ejemplo, si en el emisor de la Bahía de la Ventosa se utilizan lastres rectangulares independientes de la tubería, ésta puede colocarse por tracción; en tanto, de seleccionarse lastres cilíndricos, el método más adecuado es por lanzamiento desde barcaza, pues permite ensamblar los tramos de tubería simultáneamente con la colocación de las piezas de lastre

## **V. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO DE LA DESCARGA AL MAR**

Después de determinarse las características estructurales requeridas para garantizar la estabilidad del emisor submarino, el diseño retoma el objetivo fundamental del proyecto: definir las condiciones necesarias para mitigar los efectos ambientales adversos provocados por la descarga del flujo de agua residual en el mar. Independientemente de los estudios y obras detalladas en los capítulos anteriores, las condiciones de la descarga están determinadas por el comportamiento del flujo, tanto dentro de la tubería como al integrarse al ambiente marino. De lo anterior resulta evidente la necesidad de analizar el comportamiento hidráulico de la línea de descarga y el fenómeno de dispersión del flujo, con la finalidad de definir un diseño capaz de proporcionar los resultados esperados.

### **V.1 Datos de Diseño**

Como primer paso en el diseño hidráulico de cualquier línea de conducción se deben establecer claramente los datos de diseño. Para el caso de un emisor submarino, los datos de interés son: densidad del efluente, gastos de operación, presión disponible, niveles principales y longitud de la línea de descarga.

El gasto está definido directamente por el sistema de tratamiento de aguas residuales e indirectamente por el aprovechamiento realizado. En cuanto a la presión de operación, ésta debe ser suficiente para definir una línea piezométrica que permita el adecuado funcionamiento hidráulico de la conducción y la descarga. El procedimiento más adecuado es realizando el cálculo en contrasentido al flujo a modo de determinar la presión mínima requerida; sin embargo, en algunas ocasiones la presión puede estar predeterminada por el equipo disponible.

En la Tabla 5.1 se resumen los datos de diseño empleados en el cálculo hidráulico de la descarga al mar del caso práctico estudiado en esta tesis.

| <b>Dato</b>              | <b>Valor</b>                 |
|--------------------------|------------------------------|
| Gasto Normal             | 768.0 [m <sup>3</sup> /hr]   |
| Gasto Máximo             | 1,568.0 [m <sup>3</sup> /hr] |
| Presión de Operación     | 5.50 [kg/cm <sup>2</sup> ]   |
| Densidad del Efluente    | 1.022 [gr/cm <sup>3</sup> ]  |
| Longitud de la Línea     | 2500 [m]                     |
| Elevación Inicial        | 1.50 [m.s.n.b.m]             |
| Elevación de la Descarga | -11.50 [m.s.n.b.m]           |

**Tabla 5.1** Datos de Diseño

Cabe señalar que la diferencia entre los valores de gasto no corresponde a variaciones en el efluente de la planta de tratamiento, sino a la mezcla de dicho efluente con el generado de manera intermitente por los dispositivos de enfriamiento de la refinera. Por otro lado, resalta la existencia de una presión de operación predeterminada, la cual es proporcionada por un equipo instalado con anterioridad.

## **V.2 Características Geométricas de la Tubería**

La determinación de las características geométricas de la tubería inicia por la selección del espesor adecuado (dependiendo del material del tubo) para resistir las presiones de trabajo, existiendo la posibilidad de dividir a la conducción en tramos con diferentes espesores, si las variaciones en la presión lo justifican.

Posteriormente, a partir de los catálogos de productos disponibles, se deben identificar las tuberías con diámetro interior acorde con los gastos de operación. Lo anterior se logra al proponer diferentes secciones (A) y revisar las velocidades asociadas a cada gasto utilizando la ecuación de continuidad.

$$V = Q / A \quad (5.1)$$

De acuerdo con las normas de proyecto para líneas de conducción (CNA, 1996), las velocidades aceptables están delimitadas por un límite inferior de 0.6 m/s y una

velocidad máxima de 3.0 m/s. Dichos valores tienen por objeto evitar por un lado la sedimentación de partículas y por el otro, la generación de fuerzas hidrodinámicas por turbulencia.

En caso de identificarse más de un diámetro que permita cumplir con el ámbito de velocidades, la elección del diámetro más adecuado está en función de la presión requerida y la revisión de costos. En sistemas a gravedad la dimensión óptima está definida por la menor para la carga disponible. Cuando se utiliza bombeo la elección de la tubería depende de la comparación entre el costo de: 1) colocar tubería de menor diámetro e incrementar el bombeo (mayores pérdidas de energía), o 2) aumentar la sección y reducir la potencia del equipo; adicionalmente, se deben revisar los espesores requeridos para resistir las sobrepresiones asociadas a transitorios hidráulicos que pudieran presentarse durante la operación del equipo.

Como se menciona en la sección V.1, el proyecto del emisor de la Bahía de la Ventosa tiene preasignado una presión de operación de  $5.5 \text{ kg/cm}^2$ , proporcionada por el equipo de bombeo disponible en la planta de tratamiento, por lo que para una tubería de polietileno de alta densidad el espesor recomendable corresponde a una relación  $RD = 17.0$ , capaz de resistir hasta  $100 \text{ psi}$  ( $70.4 \text{ kg/cm}^2$ ) de presión; aunque dicho valor tiene un alto margen con respecto a la presión de operación, en caso de utilizarse el tubería más delgada ( $RD=21$ ) ésta trabajaría al límite de su resistencia y estaría en un riesgo de falla al experimentar un transitorio hidráulico. En cuanto a las dimensiones de la tubería, de acuerdo con los gastos de operación, la variación de velocidades permisibles y las pérdidas de energía, el diámetro nominal recomendable es de 22" (56 cm), por lo que el espesor ( $de/RD$ ) es de 3.28 cm.

### **V.3 Análisis Hidráulico de la Conducción**

A partir de las características geométricas del tubo seleccionado, el siguiente paso corresponde a la revisión del comportamiento hidráulico de la línea de descarga en el tramo de la conducción, comprendido entre la conexión con la planta de bombeo y el

inicio de la estructura de descarga, antes del primer puerto de salida. El objetivo de este análisis es determinar las condiciones hidráulicas disponibles para descargar el flujo de aguas residuales.

La herramienta fundamental para la realización de la revisión hidráulica es sin duda el principio de la conservación de la energía representado por la expresión:

$$z_A + P_A/g + V_A^2/2g = z_B + P_B/g + V_B^2/2g + hf + h_e \quad (5.2)$$

en donde los subíndices A y B hacen referencia a dos puntos de consecutivos en el sentido del flujo (inicio y final de la conducción), en tanto:

- $z$  es la elevación en metros sobre el plano de referencia; es conveniente que el nivel 0.0 sea en la posición del eje de la estructura de descarga.  $Z$  también es conocida como energía de posición
- $P$  es la presión en el interior de la tubería,  $[\text{kg}/\text{m}^2]$ . La división de  $P/\gamma$  representa la energía de presión.
- $\gamma$  denomina al peso específico del fluido  $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- $V$  representa la velocidad del flujo en metros por segundo. El término  $V^2/2g$  se denomina carga de velocidad.
- $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $h_f$  corresponde a las pérdidas por fricción entre el punto A y el B
- $h_e$  son las pérdidas locales de energía

Para fines del análisis de la línea de descarga, la incógnita es la presión en el punto B, pues las elevaciones y gastos son conocidos en tanto las pérdidas son determinadas como se explica a continuación.

En cuanto al cálculo de las pérdidas por fricción, el método más recomendable es la utilización de la ecuación de Darcy-Weisbach (Sotelo, 1990):

$$hf = f (D/L) (v^2/2g) \quad (5.3)$$

siendo  $D$  el diámetro interior de la tubería,  $L$  la longitud total del tramo analizado y  $f$  un coeficiente de fricción. Este último valor es función del comportamiento del fluido y de las características del tubo (dimensiones y material); para su obtención es posible utilizar el diagrama universal de Moody (conociendo la rugosidad relativa y el número de Reynolds), o bien, alguna de las expresiones específicas para determinados materiales y/o tipo de flujo. En el caso de tuberías de material liso (como el polietileno) con flujo en zona de transición o zona turbulenta, resulta conveniente aplicar la propuesta de Blasius para la determinación del coeficiente de fricción:

$$f = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (5.4)$$

En la expresión anterior  $Re$  el Número de Reynolds, definido por la siguiente fórmula:

$$Re = VD / 0.0929E-5 \quad (5.5)$$

Con respecto a pérdidas de energía en piezas especiales (válvulas, cambios bruscos de dirección, bifurcaciones, etc.), éstas pueden ser calculadas en función de la carga de velocidad y un coeficiente de pérdida local  $k_s$  que depende de las características geométricas de la pieza.

$$he = k_s (v^2/2g) \quad (5.6)$$

La Tabla 5.2 muestra los datos y resultados de la revisión del comportamiento hidráulico de la línea de conducción ejemplificada, tanto en condición de gasto normal

| PARAMETRO            | UNIDAD              | GASTO NORMAL |          | GASTO MAXIMO |          |
|----------------------|---------------------|--------------|----------|--------------|----------|
|                      |                     | Conexión     | Descarga | Conexión     | Descarga |
| Diámetro Interior    | [m]                 | 0.489        | 0.489    | 0.489        | 0.489    |
| Area Hidráulica      | [m <sup>2</sup> ]   | 0.188        | 0.188    | 0.188        | 0.188    |
| Longitud             | [m]                 |              | 2500     |              | 2500     |
| Gasto                | [m <sup>3</sup> /s] | 0.213        | 0.213    | 0.436        | 0.436    |
| Velocidad            | [m/s]               | 1.135        | 1.135    | 2.318        | 2.318    |
| No. de Reynolds      |                     | 6.94E+05     | 6.94E+05 | 1.42E+06     | 1.42E+06 |
| Coef. de Fricción    |                     | 0.011        | 0.011    | 0.009        | 0.009    |
| <b>Energía</b>       |                     |              |          |              |          |
| Posición             | [m]                 | 13.00        | 0.00     | 13.00        | 0.00     |
| Presión              | [m]                 | 53.82        | 63.14    | 53.82        | 53.98    |
| Velocidad            | [m]                 | 0.07         | 0.07     | 0.27         | 0.27     |
| Perdida por Fricción | [m]                 |              | 3.68     |              | 12.84    |
| Energía disponible   | [m]                 |              | 51.70    |              | 42.75    |

**Tabla 5.2** Revisión Hidráulica de la Línea de Conducción

como de gasto máximo. En la última fila se muestra la energía disponible al inicio de la obra de descarga; destaca que en ambos casos los valores obtenidos (51.70 y 42.75 m.c.a. respectivamente) son más que suficientes para vencer los aproximadamente 13.0 metros de carga estática definida por el nivel de la superficie libre del agua.

#### **V.4 Diseño Hidráulico de la Descarga**

Descrita en forma general, la obra de descarga es una tubería de la cual se desprende un número determinado de puertos de salida o difusores, con separación y características geométricas bien definidas, cuya función es facilitar la rápida dispersión del flujo de aguas residuales en el ambiente marino. El diseño de esta estructura es a través de un proceso iterativo en el que se combina el análisis hidráulico en el interior de la tubería y en los puertos de salida con el comportamiento del flujo al entrar al ambiente marino (Fisher, 1979).

El punto de partida para el diseño lo constituye la proposición del tamaño y número de difusores, de acuerdo con las siguientes recomendaciones:

- Las áreas de los difusores deben sumar un total entre  $1/3$  y  $2/3$  partes de la sección interior del emisor, con el objeto de incrementar la velocidad de salida y formar chorros más altos.
- En cuanto al tamaño de los orificios, con la finalidad de disminuir el riesgo de obstrucciones, es conveniente utilizar secciones con al menos 4" (10 cm) de diámetro.
- Para garantizar la seguridad de la tubería, se sugiere aplicar la expresión de continuidad y verificar que la velocidad máxima de salida sea aproximada a 5 m/s.

El arreglo de los puertos de salida depende directamente del número de orificios y por tanto de los gastos en el emisor. En general, las alternativas son colocarlos sobre una misma línea o bien, bifurcar al emisor en dos ramales y sobre ellos colocar los orificios; sin embargo, tratándose de gastos grandes es posible recomendar la colocación de más de dos ramales. Con el objeto de obligar al flujo a salir por los orificios; todos los ramales debe terminar en una tapa ciega.

Posteriormente, se debe revisar la capacidad de descarga en función de la geometría y la energía disponible en cada puerto de salida. El cálculo de dicha capacidad se deriva de la ecuación de la energía según la expresión:

$$Q = C_d A (2gH)^{1/2} \quad (5.7)$$

donde  $C_d$  es un coeficiente de descarga función de las características geométricas del puerto de salida,  $A$  es el área del orificio y  $H$  es la carga disponible. El diseño propuesto es adecuado si el gasto obtenido con la última expresión es mayor al definido por continuidad, es decir, si el puerto de salida trabaja por debajo de su capacidad; por el contrario, si el gasto máximo del orificio es menor, entonces es necesario colocar más orificios o aumentar el diámetro de los mismos.

En la expresión anterior la carga disponible es calculada como la diferencia entre la carga de presión dentro de la tubería en la posición del difusor y la profundidad de descarga ( $E$ ):

$$H = P/g - E \quad (5.8)$$

A su vez,  $P$  es determinada al aplicar la ecuación de la energía (sección V.3) al flujo entre dos puertos de salida consecutivos; previamente, es imperativo tomar en cuenta las siguientes observaciones.

- En tanto que existe una descarga en cada puerto (definida por continuidad), el cálculo en cada tramo debe considerar al gasto remanente, verificando que las velocidades se conserven dentro del ámbito recomendado en la sección V.2; en caso de obtenerse velocidades menores es conveniente disminuir la sección de la línea para evitar que se pueda presentar sedimentación dentro de la misma.
- Además de las pérdidas por fricción, aquí se deben incluir las provocadas en la bifurcación de la corriente, las cuales son función del ángulo de la pieza y la relación de áreas; cabe comentar que en general el flujo experimenta un alivio de presión (coeficiente de pérdida negativo) como resultado del cambio en el gasto, por lo que el efecto de la pieza especial es prácticamente despreciable.
- La separación entre los puertos de salida se determina por el análisis de dispersión, lo que implica un proceso de simultáneo con el cálculo expuesto en la siguiente sección.

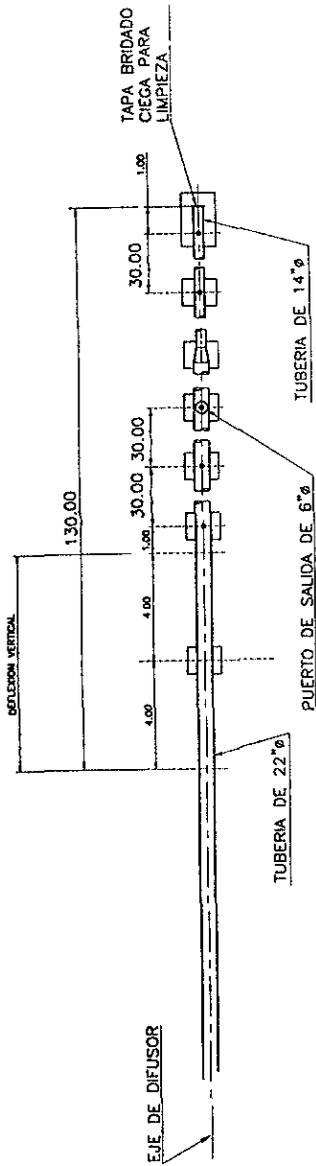
Bajo estas consideraciones, se evaluaron diferentes arreglos para la estructura de descarga del emisor de la refinería de Salina Cruz, de entre los cuales el más adecuado corresponde a la instalación de 5 puertos de salida (constituidos por silletas de polietileno de alta densidad) con diámetro de 6" (147 mm), equivalentes al 45% del área del emisor. Las velocidades de salida obtenidas con esta geometría son de 2.50 y 5.11 m/s para las condiciones de gasto normal y máximo, respectivamente. En cuanto al diseño hidráulico de la línea, en los dos últimos tramos se reduce el diámetro a 14" a fin de mantener las velocidades dentro de los límites recomendables. Las Tablas 5.3 y 5.4 muestran el comportamiento hidráulico de la línea de difusores en flujo normal y máximo. El arreglo geométrico se puede apreciar en la Figura 5.1.

| PARAMETRO              | UNIDAD              | PUERTO DE SALIDA |          |          |          |          |
|------------------------|---------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
|                        |                     | 1                | 2        | 3        | 4        | 5        |
| Diámetro Interior      | [m]                 | 0.489            | 0.489    | 0.489    | 0.311    | 0.311    |
| Area Hidráulica        | [m <sup>2</sup> ]   | 0.188            | 0.188    | 0.188    | 0.076    | 0.076    |
| Longitud               | [m]                 | 30               | 30       | 30       | 30       | 30       |
| Diámetro del Difusor   |                     | 0.147            | 0.147    | 0.147    | 0.147    | 0.147    |
| Area del Difusor       |                     | 0.017            | 0.017    | 0.017    | 0.017    | 0.017    |
| Gasto de Salida        | [m <sup>3</sup> /s] | 0.043            | 0.043    | 0.043    | 0.043    | 0.043    |
| Velocidad de Salida    | [m/s]               | 2.504            | 2.504    | 2.504    | 2.504    | 2.504    |
| Gasto en la Línea      | [m <sup>3</sup> /s] | 0.213            | 0.171    | 0.128    | 0.085    | 0.043    |
| Velocidad en la Línea  | [m/s]               | 1.135            | 0.908    | 0.681    | 1.121    | 0.561    |
| No. de Reynolds        |                     | 6.94E+05         | 5.55E+05 | 4.16E+05 | 4.36E+05 | 2.18E+05 |
| Coef. de Fricción      |                     | 0.011            | 0.012    | 0.012    | 0.012    | 0.015    |
| Coef. de pérdida local |                     | (0.06)           | (0.04)   | (0.04)   | (0.04)   | (0.04)   |
| Energía                |                     |                  |          |          |          |          |
| Posición               | [m]                 | 0.00             | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     |
| Presión                | [m]                 | 63.09            | 63.06    | 63.04    | 62.97    | 62.94    |
| Velocidad              | [m]                 | 0.07             | 0.04     | 0.02     | 0.06     | 0.02     |
| Pérdida por Fricción   | [m]                 | 0.04             | 0.03     | 0.02     | 0.08     | 0.02     |
| Pérdida Local          | [m]                 | (0.00)           | (0.00)   | (0.00)   | (0.00)   | (0.00)   |
| Energía Disponible     | [m]                 | 51.66            | 51.60    | 51.57    | 51.53    | 51.46    |

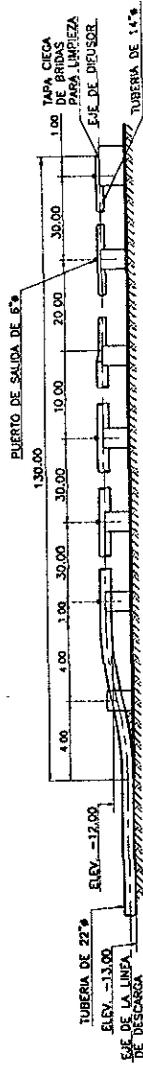
Tabla 5.3 Diseño Hidráulico de la Línea de Difusores.  
Condición de Gasto Normal

| PARAMETRO              | UNIDAD              | PUERTO DE SALIDA |          |          |          |          |
|------------------------|---------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
|                        |                     | 1                | 2        | 3        | 4        | 5        |
| Díámetro Interior      | [m]                 | 0.489            | 0.489    | 0.489    | 0.311    | 0.311    |
| Area Hidráulica        | [m <sup>2</sup> ]   | 0.188            | 0.188    | 0.188    | 0.076    | 0.076    |
| Longitud               | [m]                 | 30               | 30       | 30       | 30       | 30       |
| Díámetro del Difusor   |                     | 0.147            | 0.147    | 0.147    | 0.147    | 0.147    |
| Area del Difusor       |                     | 0.017            | 0.017    | 0.017    | 0.017    | 0.017    |
| Gasto de Salida        | [m <sup>3</sup> /s] | 0.087            | 0.087    | 0.087    | 0.087    | 0.087    |
| Velocidad de Salida    | [m/s]               | 5.113            | 5.113    | 5.113    | 5.113    | 5.113    |
| Gasto en la Línea      | [m <sup>3</sup> /s] | 0.436            | 0.348    | 0.261    | 0.174    | 0.087    |
| Velocidad en la Línea  | [m/s]               | 2.318            | 1.854    | 1.391    | 2.290    | 1.145    |
| No. de Reynolds        |                     | 1.42E+06         | 1.13E+06 | 8.50E+05 | 8.91E+05 | 4.45E+05 |
| Coef. de Fricción      |                     | 0.009            | 0.010    | 0.010    | 0.010    | 0.012    |
| Coef. de pérdida local |                     | (0.06)           | (0.04)   | (0.04)   | (0.04)   | (0.04)   |
| <b>Energía</b>         |                     |                  |          |          |          |          |
| Posición               | [m]                 | 0.00             | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     |
| Presión                | [m]                 | 53.83            | 53.72    | 53.66    | 53.39    | 53.32    |
| Velocidad              | [m]                 | 0.27             | 0.18     | 0.10     | 0.27     | 0.07     |
| Pérdida por Fricción   | [m]                 | 0.15             | 0.10     | 0.06     | 0.27     | 0.08     |
| Pérdida Local          | [m]                 | (0.02)           | (0.01)   | (0.00)   | (0.01)   | (0.00)   |
| Energía Disponible     | [m]                 | 42.60            | 42.40    | 42.26    | 42.16    | 41.88    |

**Tabla 5.4** Diseño Hidráulico de la Línea de Difusores.  
Condición de Gasto Normal



P L A N T A



P E R F I L

Figura 5.1 Arreglo Geométrico de la Obra de Descarga

## V.5 Análisis de Dispersión

Para poder cumplir con el objetivo de evitar la afectación del ambiente costero por efecto de la descarga de un flujo con características diferentes al agua de mar, el difusor debe ser capaz de propiciar un rápido mezclado entre ambos líquidos; tal fenómeno es conocido como dilución.

El estudio de la dilución del efluente está dividido en dos etapas: 1) la dilución inicial o aquella que ocurre sobre el punto de descarga y 2) la dilución superficial sobre el plano horizontal definido por la superficie libre del mar.

Dentro de los factores que influyen el comportamiento de la dilución destacan la profundidad de la descarga, la longitud de la línea de difusores y su orientación con respecto a la dirección de la corriente marina, así como la velocidad de la misma. En consecuencia, un valor de dilución predeterminado (por norma o contrato) puede obtenerse a través de diferentes arreglos, haciendo muy conveniente la evaluación de las alternativas.

En particular es importante comparar entre las implicaciones constructivas y económicas de dos profundidades de descarga diferentes. Dicho de otro modo, mientras una descarga somera requiere una menor longitud del emisor pero también un difusor más largo, las descargas más profundas permiten disminuir la dimensión del difusor a costa de aumentar la longitud del emisor.

La dilución inicial del efluente corresponde al modelo de la pluma ascendente definido por la expresión:

$$S_i = 0.38 g^{1/3} d / q_i^{2/3} \quad (5.9)$$

en donde:

- $S_i$  corresponde al valor de la dilución inicial; en la normatividad ambiental de algunos países  $S$  tiene un valor bien definido (ej. la norma española propone un valor de 150).
- $g'$  es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>) multiplicada por el diferencial de densidad relativo ( $\Delta\rho/\rho$ )
- $d$  es la profundidad de descarga, y
- $q$  el gasto por unidad de longitud, es decir, el cociente del gasto de salida en cada puerto y la separación entre estos.

Con respecto a la dispersión horizontal por efecto de la corriente esta puede ser calculada aplicando la ecuación de Brooks (1960):

$$S_h = (((1+13(L/u)/b^{2/3})^3 - 1) / 1.5)^{1/2} \quad (5.10)$$

siendo  $u$  la velocidad de la corriente (m/s),  $L$  la distancia de recorrido en metros desde un punto cualquiera en la superficie marina hasta el sitio de descarga, y  $b$  la proyección de la línea de difusores, en metros, sobre la perpendicular a la dirección de la corriente.

Evidentemente, la dispersión superficial no es independiente de la inicial, sino que actúa sobre la misma por lo que en realidad la dilución es definida por la siguiente expresión:

$$S = S_i \times S_h \quad (5.11)$$

y el resultado debe ser interpretado como en número de unidades de cuerpo receptor por unidad de efluente. Para facilitar la comprensión del comportamiento del flujo contaminante conviene utilizar el concepto de concentración según el cual:

$$\text{Concentración} = (1 / S) * 100 [\%]$$

(5.12)

Cabe comentar que justo a la salida del difusor la concentración de efluente es del 100%. Por otro lado, en algunos casos el principal criterio de diseño de la obra de descarga lo constituye un valor predeterminado de concentración de contaminantes en un punto diferente al de la descarga, como lo puede ser una playa cercana, o una zona de producción pesquera, etc.

En cuanto al fenómeno de dispersión del efluente tratado en la Bahía de la Ventosa, este es definido fundamentalmente por una dilución inicial de referencia con valor de 100 (concentración de 1.0%) y una profundidad mínima de 11.50 m (la tubería se colocó 1.0 m por encima del lecho marino para disminuir el riesgo de que la descarga sea afectada por movimiento de material de fondo y/o la acción de fauna o flora marina).

A partir de estos criterios de diseño señalados en el párrafo anterior se obtuvo la separación de 30 metros entre puertos de salida (ver Figura 5.1), con la cual es posible alcanzar concentraciones aceptables con respecto al valor de referencia, tanto en condiciones de gasto normal como gasto máximo. La Tabla 5.5 detalla la evolución en la concentración del efluente al nivel de la superficie del mar.

## **V.6 Arreglo Estructural del Difusor**

A diferencia del diseño estructural de la línea de conducción que tiene por único objetivo resistir las solicitaciones estáticas e hidrodinámicas, el arreglo geométrico del difusor tiene además la función de proporcionar la elevación requerida y la resistencia a las fuerzas hidrodinámicas por cambio de sección (IMP, 1996).

|                        | Concentración de Efluente en el Cuerpo Receptor [%] |   |
|------------------------|---|---|
|                        | Descarga Normal<br>(Q = 768.0 [m <sup>3</sup> /hr]) | Descarga Máxima<br>(Q=1,568.0 [m <sup>3</sup> /hr]) |
| Concentración Inicial  | 100.00  | 100.00  |
| Dispersión Superficial |   |   |
| Distancia de 0.0 m     | 0.65  | 1.04  |
| Distancia de 250 m     | 0.45  | 0.72  |
| Distancia de 500 m     | 0.39  | 0.63  |
| Distancia de 1,000 m   | 0.33  | 0.52  |
| Distancia de 1,500 m   | 0.28  | 0.45  |
| Distancia de 2,000 m   | 0.25  | 0.40  |
| Distancia de 2,500 m   | 0.22  | 0.35  |
| Distancia de 3,000 m   | 0.14  | 0.22  |

**Tabla 5.5** Variación de la concentración de acuerdo a la distancia

La elevación requerida puede proporcionarse por un atraque diseñado en función del peso requerido para contrarrestar las sollicitaciones externas actuando sobre una longitud determinada de tubería. Por otro lado, las dimensiones de atraque requeridas para resistir las fuerzas hidrodinámicas interiores son definidas a partir de la ecuación del impulso y cantidad de movimiento (Sotelo, 1990):

$$-Fx + P_1A_1 - P_2A_2\cos\theta = \rho Q(V_2\cos\theta - V_1) \quad (5.13)$$

cuando no hay cambio de dirección ( $\cos\theta = 1.0$ ) y el gasto es del orden de algunos litros por segundo, la expresión puede simplificarse a:

$$F = P_2A_2 - P_1A_1 \quad (5.14)$$

si además se considera que las secciones son inmediatas, prácticamente la presión (P) es igual y entonces la fuerza depende de la diferencia de áreas, es decir, del área sólida.

$$F = P(A_2 - A_1) \quad (5.15)$$

En el caso de la línea de difusores en estudio, suponiendo que los atraques contra fuerzas externas están colocados a cada 5 metros (centro a centro), el peso resistente debe ser de aproximadamente 1,500 kg equivalentes a un volumen de concreto de 1.28 m<sup>3</sup>. Con respecto a las fuerzas internas en el arreglo propuesto se identifican dos puntos: en la reducción del diámetro (de 22" a 14") y en la tapa ciega; de acuerdo con las presiones obtenidas en el análisis hidráulico, los pesos requeridos son de 7,250 y 5,000 kg respectivamente.

## CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han presentado los elementos técnicos necesarios para la integración del proyecto de un emisor submarino, partiendo desde la recolección y análisis de información hasta su posterior utilización en el diseño estructural e hidráulico de la obra. Sin embargo, a diferencia de otros proyectos de ingeniería, el de una línea de descarga al mar aún tiene amplios márgenes de indefinición e incertidumbre que deben ser resueltos por los ingenieros responsables del diseño.

Probablemente uno de los aspectos más preocupantes para el ingeniero civil, sobre todo en países como el nuestro, es la disponibilidad y confiabilidad de la información recopilada para conformar la base de datos de diseño. Comúnmente, la falta de disponibilidad de datos reales al momento de iniciar el proyecto, implica destinar una etapa del mismo exclusivamente a la recopilación y análisis de información, en la cual generalmente se requiere la realización de trabajos de medición directa en campo, con el consecuente incremento del costo del proyecto.

Considerando lo anterior y en tanto que por lo general este tipo de obra formará parte de un desarrollo más amplio (industrial, comercial, turístico, etc.) con diversas obras costeras que requieren de aproximadamente los mismos datos, particularmente las características de oleaje y corrientes, resulta muy recomendable la existencia de una instancia encargada de obtener y administrar dicha información, a modo de facilitar la labor de los equipos de diseño y disminuir los costos y riesgos subsecuentes de las empresas interesadas en invertir. Más aún, no es difícil imaginar la posibilidad de conformar una referencia nacional (similar a la regionalización sísmica o de vientos contenida en manuales técnicos de diseño) con información como las características de oleaje para diferentes periodos de retorno.

Desde luego, mientras no se disponga de valores preestablecidos, el ingeniero debe utilizar los modelos matemáticos y/o numéricos disponibles para conformar un método balanceado entre las limitaciones de los primeros y la complejidad de las simulaciones numéricas, a fin de definir un punto medio al modelar fenómenos como el comportamiento del perfil playero, el oleaje extremal y la marejada de tormenta. Por otro lado, lo anterior pone de manifiesto un amplio campo para el desarrollo de la ingeniería costera: la investigación de diversos fenómenos a fin de perfeccionar a la par de hacer más accesibles los modelos de predicción.

Con respecto al comportamiento del perfil playero en la frontera tierra - mar, la diversidad de factores que influyen en él sugieren por sí mismos tomar las debidas precauciones, sobre todo si se sospecha la ocurrencia de recesión playera. Como se menciona en el capítulo III, la colocación de un enrocamiento de protección ha mostrado buenos resultados en la práctica; si además se considera que dicha obra tiene un bajo costo con respecto a las estructuras submarinas o de concreto, es una alternativa recomendable en prácticamente cualquier ocasión.

Igualmente en función de los resultados de la modelación del comportamiento playero, es bastante conveniente que la línea sea colocada subterránea en el tramo del terreno con comportamiento dinámico, lo que además permite disminuir el riesgo de fuerzas accidentales derivadas de objetos flotantes, así como la alteración del paisaje.

Otro aspecto discutible es la determinación de las fuerzas, particularmente por la incertidumbre con respecto a los valores de los coeficientes hidrodinámicos (arrastre, inercia y levantamiento) y el coeficiente de fricción entre el suelo y la estructura, como lo demuestra la divergencia entre diferentes referencias; inclusive, conviene recordar que las condiciones extraordinarias suponen en sí un factor considerable con respecto a condiciones normales. Si bien la utilización de valores conservadores es una práctica común para aumentar la seguridad de la obra, también puede conducir a coeficientes de seguridad muy elevados y en consecuencia obras sobradas (y costosas) con

respecto a las solicitaciones reales. Por lo anterior, resulta recomendable evitar redundar los factores de seguridad, pues aún en el caso de que se superen las fuerzas de diseño, el efecto más probable (al menos en tuberías flexibles) es el desplazamiento de la línea en una distancia proporcional a la duración de tal condición, lo que no implica la falla total del emisor sino que puede continuar funcionando mientras se repara.

Los procesos constructivos del emisor son otra parte del proyecto que conviene revisar, pues los propuestos en las referencias bibliográficas parecen más bien enfocados a tuberías rígidas o semi-rígidas. En el caso de tuberías flexibles (de plástico) sin anclaje incluido, la colocación con métodos convencionales puede complicarse por la baja densidad del material, haciendo conveniente evaluar alternativas como el llenado de la tubería con fluidos de mayor densidad al agua o disponer de una tubería o cable piloto conectado a la línea que sirva de guía.

En cuanto al diseño hidráulico de la línea de conducción y de la estructura de descarga, la conclusión inmediata es que este debe formar parte de un diseño integral que permita la adecuada conexión con el sistema de tratamiento y/o alimentación. En particular, resalta la importancia de que la carga hidráulica del bombeo sea determinada en función del requerimiento real de la descarga (definido por el gasto así como por el número y tamaño de los orificios de salida), con el objeto de lograr una operación eficiente; de lo contrario, si se utiliza una presión predeterminada, se corre el riesgo de que ésta no sea suficiente para eliminar el flujo o bien, que se encuentre sobrada (como en el caso estudiado en esta tesis) con el consecuente desperdicio de energía y por tanto de recursos económicos.

También, en lo que se refiere al diseño y construcción del emisor submarino, no se debe olvidar la posibilidad de que la comunidad muestre un rechazo al proyecto, por lo que es recomendable llevar a cabo una campaña de difusión sobre los beneficios que la obra tendrá en la comunidad.

Con relación al objetivo fundamental de la obra, es decir, el facilitar la dispersión del flujo de agua residual en el ambiente marino, vale la pena comentar lo siguiente: más que los aspectos técnicos que deben ser resueltos eficientemente en el diseño, el elemento central lo constituye la naturaleza del problema de vertido de aguas residuales y los lineamientos normativos para enmarcar la eficiencia del diseño del emisor submarino, o aún más, la implantación de políticas ambientales enfocadas a la solución del problema independientemente de la construcción de la obra de descarga.

Destaca en primer término la necesidad de complementar la normatividad ambiental aplicable al vertido de aguas residuales (NOM-001-ECOL-1996) con criterios específicos para evaluar la forma de la descarga en la zona costera (e.g. profundidad de vertido, relación de gasto por unidad de longitud de la descarga, etc.). Inclusive a largo plazo, a partir de una cultura ambiental y la asimilación de la normatividad, podría considerarse la mejora de los sistemas de descarga a través de regular los porcentajes de dilución del efluente en función de la distancia recorrida desde el punto de vertido y el tipo de zona afectada.

Además de las normas de calidad en el efluente de aguas residuales, las estrategias para el control de la contaminación en el cuerpo marino pueden incluir la creación de zonas protegidas, la autorización y promoción del reuso de las aguas tratadas (riego, sistemas de enfriamiento, lavado, etc.) y la aplicación de políticas fiscales especiales (subsidios, reducción de impuestos, créditos blandos, etc.) para los generadores de las descargas.

Sin embargo, se debe tener cuidado en los métodos de implantación de los planes y programas, pues el desconocimiento y la falta de educación en conjunto con la poca experiencia normativa y la incongruencia o ambigüedad de algunos aspectos del marco legal, pueden propiciar efectos adversos al permitir la utilización de dichas estrategias como herramientas de manipulación en otras áreas ajenas al proyecto, ocasionando

diversos problemas sociopolíticos y económicos. Por ejemplo: una desmedida aplicación de sanciones administrativas o fiscales podrían desembocar en el incremento de los costos de vida e incluso en el cierre de empresas y la pérdida de empleos; en tanto, las políticas enfocadas a solo algunos de los actores implicados puede propiciar esquemas de competencia desleal; así mismo, la simple operación de los programas supone la asignación de recursos públicos que seguramente son necesarios en otros rubros. Por otro lado, las estrategias de control y mitigación de la contaminación de la zona costera tampoco deben ser flexibles al grado que a los generadores de la descarga les resulte más conveniente continuar contaminando que aplicar medidas preventivas y correctivas.

Finalmente, aunque el marco legal no sea el más apropiado y la política ambiental aún presente algunas deficiencias, nada exime al ingeniero Civil de asumir su responsabilidad ética en el problema y *buscar la mejor alternativa* para que la obra cumpla eficientemente el objetivo de proteger al medio ambiente; de este modo, se sentarán bases sólidas para revertir el deterioro de la zona costera.

## BIBLIOGRAFÍA

American Society of Civil Engineers "*Pipelines in Adverse Environments, A State of the Art*". Proceeding of the ASCE Pipeline Division Specialty Conference, 1978. New Orleans, Louisiana.

1. Machemehl, Jerry L. (1978) "*Pipelines in the Coastal Ocean*"
2. Audibert, J..M., Lai, N.W. and Bea R.G. (1978) "*Design of Pipelines - Sea Bottom Loads and Restraints*"

American Society for Testing Materiales "*Standard Specification for Polyethylene Pipe and Fittings Materiales*" Designation: D 3350-96. ASTM.

Aparicio Mijares, F. (1994) "*Fundamentos de Hidrología de Superficie*". Editorial Limusa. México.

Bruun, Per (1993). "*Port Engineering, 1*". 4 ed. Gulf Publishin Company.

Coastal Engineering Reserch Center (1984) "*Shore Protection Manual, I & II*". CERC-US Army Corps of Engineers. Washington, D.C.

Comisión Federal de Electricidad (1983) "*Hidráulica Marítima*". Manual de Diseño de Obras Civiles. CFE. México.

Comisión Nacional del Agua (1996). "*Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario*". Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CNA. México.

Dirección General de Oceanografía Naval (1988) "*Compendio Oceanográfico del Golfo de Tehuantepec*". Secretaría de Marina. México.

Dirección General de Oceanografía Naval (1998). "*Tablas Numéricas de Predicción de Mareas*". Secretaria de Marina. México.

Dominguez Mora, R., Caloz G., T. (1981) "*Análisis Estadístico*". Manual de Diseño de Obras Civiles. CFE. México.

Fisher, Hugo B. *et al.* (1979). "*Mixing in Inland and Coastal Waters*". Academic Press Inc. Orlando, FL.

1. Brooks, N. H. (1960) "*Difussion of sewage effluent in an ocean current*". Proc. Int. Conf. Waste Disposal 1st. Pergamon, Oxford.

- Gynn Hery, J. and Heinke, G.W. (1989) *"Environmental Science and Engineering. Pollution Control Strategies"*. Prentice Hall. Englewood N.J.
- Herbieh, John B. (1992) *"Handbook of dredging engineering"* McGraw Hill.
- Houston, James R. (1996) *"Simplified Dean's Method Beach Fill Design"*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. ASCE. Vol. 122, No. 3.
1. Dean, R.G (1991) *"Coastal sediment process: Toward engineering solutions"*
  2. Dean, R.G. (1987) *"Equilibrium beach profiles: Characteristics and Applications"*
  3. Hallermeier, R.J. (1981) *"Fall Velocity of beach sands"*
- Instituto Mexicano del Petróleo (1996). *"Diseño, Selección e Instalación de Tubería de Acero para Líneas de Conducción de Agua Potable"*. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua. México.
- Juarez Badillo, E. y Rico Rodríguez A. (1995) *"Mecánica de Suelos, I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos"*. Limusa-Noriega. México
- Larson, Magnus and Kraus, Nicholas C. (1992) *"SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change, Numerical Formulation and Model Test"*. CERC-US Army. Vicksburg, Miss.
- Navarro Pineda, J.M. y Rodríguez Zormoza F.M. (1998) *"El Conflicto Ambiental en la Zona Costera y El Ordenamiento por Cuencas como Propuesta Alternativa"*. 2do Congreso Internacional sobre Ingeniería Marítima y Portuaria. AMIP. Veracruz.
- Nelson Leonard N. (1991) *"Stream, Lake, Estuary and Ocean Pollution"* 2 ed. Van Nostrand Reinold. New York.
1. Osterberg, C.L. (1982) IAEA Bulletin 24
- Neumann, G. (1968) *"Ocean Currents"*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam
- Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996). *"Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales"* Diario Oficial de la Federación, Enero 6, 1997.
- Silvester. R. (1974). *"Coastal Engineering, 1"* Elsevier Scientific Publishing Company.
1. Beckmann and Thibodeaux
- Sotelo Ávila, Gilberto (1990) *"Hidráulica General"* Editorial Limusa. México.

## ANEXO I

### ***Análisis de Costo Directo***

### ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO

|              |   |
|--------------|---|
| <b>Obra:</b> | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz. Oax |
|--------------|---|

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Concepto:</b> | Instalación del emisor submarino con anclaje a base de lastres rectangulares de concreto; colocación de la tubería por tracción |
|                  | <b>Unidad:</b> <b>Lote</b>  |

| Clave                      | Descripción   | Unidad | Costo   | Cantidad | Importe             |
|----------------------------|---|--------|---------|----------|---------------------|
| 01-A                       | Dragado de zanja de 1,50 m de prof. y taludes 1:3 (sección de 8,25 m <sup>2</sup> ), hasta 5 m de profundidad, con draga de succión de 10". Incluye disposición del material. | mL     | 1676 33 | 525      | 880,073.25          |
| 02-A                       | Suministro de tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17 Colocación por tracción.   | mL     | 1068.08 | 2500     | 2,670,200.00        |
| 03-A                       | Fabricación y colocación de lastres rectangulares de concreto de 1,050 kg (0,477 m <sup>3</sup> ) para anclaje de la tubería.   | mL     | 712 03  | 875      | 623,026.25          |
| 04-A                       | Fabricación y colocación de lastres rectangulares de concreto de 890 kg (0,404 m <sup>3</sup> ) para anclaje de la tubería.   | mL     | 624 54  | 1145     | 715,098 30          |
| <b>COSTO DIRECTO TOTAL</b> |   |        |         |          | <b>4,888,397.80</b> |

### ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO

|              |  |
|--------------|--|
| <b>Obra:</b> | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax. |
|--------------|--|

|                  |   |                |             |
|------------------|---|----------------|-------------|
| <b>Concepto:</b> | Instalación del emisor submarino con anclaje a base de lastres cilíndricos de concreto; colocación de la tubería por lanzamiento desde barcaza. | <b>Unidad:</b> | <b>Lote</b> |
|------------------|---|----------------|-------------|

| Clave | Descripción   | Unidad | Costo   | Cantidad | Importe      |
|-------|---|--------|---------|----------|--------------|
| 01-A  | Dragado de zanja de 1,50 m de prof. y taludes 1:3 (sección de 8,25 m <sup>2</sup> ), hasta 5 m de profundidad, con draga de succión de 10" Incluye disposición del material | mL     | 1676.33 | 525      | 880,073.25   |
| 02-B  | Suministro de tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17. Colocación por tracción.  | mL     | 1122.32 | 2500     | 2,805,800.00 |
| 03-B  | Fabricación y colocación de lastres cilíndricos de concreto de 1,050 kg (0,477 m <sup>3</sup> ) para anclaje de la tubería.   | mL     | 856.10  | 928      | 794,460.80   |
| 04-B  | Fabricación y colocación de lastres cilíndricos de concreto de 890 kg (0,404 m <sup>3</sup> ) para anclaje de la tubería.   | mL     | 762.94  | 1090     | 831,604.60   |

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| <b>COSTO DIRECTO TOTAL</b> | <b>5,311,938.65</b> |
|----------------------------|---------------------|

**ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO**

|                  |   |                |      |
|------------------|---|----------------|------|
| <b>Obra:</b>     | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax   |                |      |
| <b>Concepto:</b> | Dragado de zanja de 1,50 m prof y taludes 1:3 (sección 8,25 m <sup>2</sup> ) hasta 5 m de profundidad, con draga de succión de 10" Incluye disposición del material |                |      |
| <b>01-A</b>      |   | <b>Unidad:</b> | m.L. |

| Descripción | Unidad | Costo | Cantidad | Importe |
|-------------|--------|-------|----------|---------|
|-------------|--------|-------|----------|---------|

**MATERIAL**

**EQUIPO Y HERRAMIENTA**

|  |      |           |        |         |
|--|------|-----------|--------|---------|
| Suministro y habilitado de draga hidráulica de succión de 10"                      | lote | 800000.00 | 0.0019 | 1520.00 |
| Draga hidráulica de succión de 10" con bombeo para descarga a 500 m                | hr   | 620.00    | 0.055  | 34.10   |
| Retroexcavadora de 70 H.P.   | hr   | 475.00    | 0.167  | 79.33   |
| Habilitado y operación de área para disposición del material producto del dragado. | m3   | 5.20      | 8.25   | 42.90   |

|                      |  |  |  |                |
|----------------------|--|--|--|----------------|
| <b>COSTO DIRECTO</b> |  |  |  | <b>1676.33</b> |
|----------------------|--|--|--|----------------|

**ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO**

|                  |   |             |  |
|------------------|---|-------------|--|
| <b>Obra:</b>     | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax |             |  |
| <b>Concepto:</b> | Suministro de tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17. Colocación por tracción                               |             |  |
| <b>02-A</b>      | <b>Unidad:</b>  | <b>m.L.</b> |  |

| Descripción   | Unidad | Costo   | Cantidad | Importe        |
|---|--------|---------|----------|----------------|
| <b>MATERIAL</b>   |        |         |          |                |
| Tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17. | m      | 997.00  | 1.00     | 997.00         |
| <b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>                             |        |         |          |                |
| Equipo de termofusión                                   | hr     | 150.00  | 0.0235   | 3.53           |
| Chalán de 600 Ton                                       | hr     | 660.00  | 0.04     | 26.40          |
| Grúa de 45 Ton  | hr     | 495.00  | 0.04     | 19.80          |
| Compresor de Buceo                                      | hr     | 70.00   | 0.04     | 2.80           |
| Equipo de Buceo   | hr     | 35.00   | 0.08     | 2.80           |
| <b>MANO DE OBRA</b>                                     |        |         |          |                |
| Cuadrilla 1 Oficial + 1 Ayudante                        | Jor    | 684.00  | 0.0029   | 1.98           |
| Cuadrilla. 2 Buzos + Cabo vida                          | Jor    | 2755.00 | 0.005    | 13.78          |
| <b>COSTO DIRECTO</b>                                    |        |         |          | <b>1068.08</b> |

**ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO**

|              |   |
|--------------|---|
| <b>Obra:</b> | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax |
|--------------|---|

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Concepto:</b> | Suministro de tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17 Colocación por lanzamiento desde barcaza |
| <b>02-B</b>      | <b>Unidad:</b> m.L.   |

| Descripción | Unidad | Costo | Cantidad | Importe |
|-------------|--------|-------|----------|---------|
|-------------|--------|-------|----------|---------|

**MATERIAL**

|   |   |        |      |        |
|---|---|--------|------|--------|
| Tubería de polietileno de alta densidad de 22" y RD=17. | m | 997.00 | 1.00 | 997.00 |
|---|---|--------|------|--------|

**EQUIPO Y HERRAMIENTA**

|                       |    |        |       |       |
|-----------------------|----|--------|-------|-------|
| Equipo de termofusión | hr | 150.00 | 0.067 | 10.05 |
| Chalán de 600 Ton     | hr | 660.00 | 0.067 | 44.22 |
| Grúa de 45 Ton        | hr | 495.00 | 0.067 | 33.17 |
| Compresor de Buceo    | hr | 70.00  | 0.067 | 4.69  |
| Equipo de Buceo       | hr | 35.00  | 0.133 | 4.66  |

**MANO DE OBRA**

|                                   |     |         |        |       |
|-----------------------------------|-----|---------|--------|-------|
| Cuadrilla: 1 Oficial + 1 Ayudante | Jor | 684.00  | 0.0083 | 5.68  |
| Cuadrilla: 2 Buzos + Cabo vida    | Jor | 2755.00 | 0.0083 | 22.87 |

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| <b>COSTO DIRECTO</b> | <b>1122.32</b> |
|----------------------|----------------|

## ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO

|              |  |
|--------------|--|
| <b>Obra:</b> | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax. |
|--------------|--|

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Concepto:</b> | Fabricación y colocación de lastres rectangulares de concreto de 1050 kg (0,477 m3) con bandas de sujeción para anclaje de la tubería de 22". |
| <b>03-A</b>      | <b>Unidad:</b> m.L.   |

| Descripción | Unidad | Costo | Cantidad | Importe |
|-------------|--------|-------|----------|---------|
|-------------|--------|-------|----------|---------|

### MATERIAL

|  |      |         |        |        |
|--|------|---------|--------|--------|
| Habilitado y armado de acero de refuerzo<br>Fy=4200 kg/cm2 con diámetro de 3/8".                             | Ton  | 5300.00 | 0.0315 | 166.95 |
| Concreto premezclado F'c=200 kg/cm2, TMA<br>de 3/4", revenimiento de 14 cm. Vaciado por<br>medios mecánicos. | m3   | 850.00  | 0.485  | 412.25 |
| Colocación y desmonte de cimbra metálica.  | m2   | 25.00   | 1.95   | 48.75  |
| Banda de nylon o similar para sujeción   | pza. | 18.50   | 1.00   | 18.50  |

### EQUIPO Y HERRAMIENTA

|                    |    |        |      |       |
|--------------------|----|--------|------|-------|
| Chalán de 600 Ton  | hr | 660.00 | 0.04 | 26.40 |
| Grúa de 45 Ton     | hr | 495.00 | 0.04 | 19.80 |
| Compresor de Buceo | hr | 70.00  | 0.04 | 2.80  |
| Equipo de Buceo    | hr | 35.00  | 0.08 | 2.80  |

### MANO DE OBRA

|                                |     |         |       |       |
|--------------------------------|-----|---------|-------|-------|
| Cuadrilla: 2 Buzos + Cabo vida | Jor | 2755.00 | 0.005 | 13.78 |
|--------------------------------|-----|---------|-------|-------|

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| <b>COSTO DIRECTO</b> | <b>712.03</b> |
|----------------------|---------------|

## ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO

|              |   |
|--------------|---|
| <b>Obra:</b> | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax |
|--------------|---|

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>Concepto:</b> | Fabricación y colocación de lastres cilíndricos (espesor 20 cm) de concreto de 1,050 kg (0,4775 m <sup>3</sup> ) para anclaje de la tubería. |
| <b>03-B</b>      | <b>Unidad:</b> m.L.  |

| Descripción | Unidad | Costo | Cantidad | Importe |
|-------------|--------|-------|----------|---------|
|-------------|--------|-------|----------|---------|

**MATERIAL**

|   |                |         |        |        |
|---|----------------|---------|--------|--------|
| Habilitado y armado de acero de refuerzo<br>Fy=4200 kg/cm <sup>2</sup> con diámetro de 3/8".                        | Ton            | 5300.00 | 0.0315 | 166.95 |
| Concreto premezclado F'c=200 kg/cm <sup>2</sup> , TMA de 3/4", revestimiento de 14 cm Vaciado por medios mecánicos. | m <sup>3</sup> | 850.00  | 0.485  | 412.25 |
| Colocación y desmonte de cimbra metálica (tubería).   | m <sup>2</sup> | 35.00   | 4.78   | 167.30 |

**EQUIPO Y HERRAMIENTA**

|                    |    |        |       |       |
|--------------------|----|--------|-------|-------|
| Chalán de 600 Ton  | hr | 660.00 | 0.067 | 44.22 |
| Grúa de 45 Ton     | hr | 495.00 | 0.067 | 33.17 |
| Compresor de Buceo | hr | 70.00  | 0.067 | 4.69  |
| Equipo de Buceo    | hr | 35.00  | 0.133 | 4.66  |

**MANO DE OBRA**

|                                |     |         |        |       |
|--------------------------------|-----|---------|--------|-------|
| Cuadrilla: 2 Buzos + Cabo vida | Jor | 2755.00 | 0.0083 | 22.87 |
|--------------------------------|-----|---------|--------|-------|

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| <b>COSTO DIRECTO</b> | <b>856.10</b> |
|----------------------|---------------|

## ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO

|                  |  |                |             |
|------------------|--|----------------|-------------|
| <b>Obra:</b>     | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax. |                |             |
| <b>Concepto:</b> | Fabricación y colocación de lastres rectangulares de concreto de 890 kg (0,404 m3) con bandas de sujeción para anclaje de la |                |             |
| <b>04-A</b>      | tubería de 22".  | <b>Unidad:</b> | <b>m.L.</b> |

| Descripción  | Unidad | Costo   | Cantidad | Importe       |
|--|--------|---------|----------|---------------|
| <b>MATERIAL</b>  |        |         |          |               |
| Habilitado y armado de acero de refuerzo<br>Fy=4200 kg/cm2 con diámetro de 3/8".                             | Ton    | 5300.00 | 0.0267   | 141.51        |
| Concreto premezclado F'c=200 kg/cm2, TMA<br>de 3/4", revenimiento de 14 cm. Vaciado por<br>medios mecánicos. | m3     | 850.00  | 0.412    | 350.20        |
| Colocación y desmonte de cimbra metálica.  | m2     | 25.00   | 1.95     | 48.75         |
| Banda de nylon o similar para sujeción   | pza.   | 18.50   | 1.00     | 18.50         |
| <b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>  |        |         |          |               |
| Chalán de 600 Ton  | hr     | 660.00  | 0.04     | 26.40         |
| Grúa de 45 Ton   | hr     | 495.00  | 0.04     | 19.80         |
| Compresor de Buceo   | hr     | 70.00   | 0.04     | 2.80          |
| Equipo de Buceo  | hr     | 35.00   | 0.08     | 2.80          |
| <b>MANO DE OBRA</b>  |        |         |          |               |
| Cuadrilla: 2 Buzos + Cabo vida   | Jor    | 2755.00 | 0.005    | 13.78         |
| <b>COSTO DIRECTO</b>   |        |         |          | <b>624.54</b> |

**ANÁLISIS DE COSTO DIRECTO**

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Obra:</b>     | Emisor submarino en la Bahía de la Ventosa para la descarga de la planta de tratamiento de la refinería de Salina Cruz, Oax   |
| <b>Concepto:</b> | Fabricación y colocación de lastres cilíndricos (espesor 17,5 cm) de concreto de 890 kg (0,404 m3) para anclaje de la tubería |
| <b>04-B</b>      | <b>Unidad:</b> m.L.   |

| Descripción   | Unidad | Costo   | Cantidad | Importe       |
|---|--------|---------|----------|---------------|
| <b>MATERIAL</b>   |        |         |          |               |
| Habilitado y armado de acero de refuerzo<br>Fy=4200 kg/cm2 con diámetro de 3/8"                         | Ton    | 5300.00 | 0.0267   | 141.51        |
| Concreto premezclado F'c=200 kg/cm2, TMA de 3/4", revestimiento de 14 cm. Vaciado por medios mecánicos. | m3     | 850.00  | 0.412    | 350.20        |
| Colocación y desmonte de cimbra metálica (tubería).   | m2     | 35.00   | 4.618    | 161.63        |
| <b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>   |        |         |          |               |
| Chalán de 600 Ton   | hr     | 660.00  | 0.067    | 44.22         |
| Grúa de 45 Ton  | hr     | 495.00  | 0.067    | 33.17         |
| Compresor de Buceo  | hr     | 70.00   | 0.067    | 4.69          |
| Equipo de Buceo   | hr     | 35.00   | 0.133    | 4.66          |
| <b>MANO DE OBRA</b>   |        |         |          |               |
| Cuadrilla: 2 Buzos + Cabo vida  | Jor    | 2755.00 | 0.0083   | 22.87         |
| <b>COSTO DIRECTO</b>  |        |         |          | <b>762.94</b> |