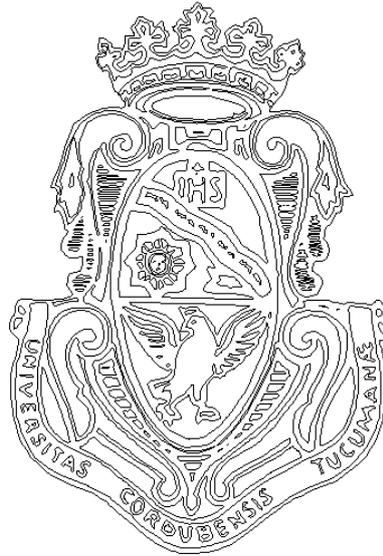


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Escuela de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Hidráulica



## PRÁCTICA SUPERVISADA

-INFORME FINAL-

**“Diseño de emisario submarino en el sistema Mar Chiquita  
(Mar de Ansenuza), Córdoba, Argentina”**

Por

**Jonathan Muchiut**

Tutor: **Dr. Ing. Paolo Gyssels**

Supervisora Externa: **Mg. Inga. Mariana Pagot**

**Año 2016**

## Agradecimientos

A mi madre Isabel, por iluminar día a día este camino.

A mi padre Carlos, por enseñarme lo que significa la palabra responsabilidad.

A mi hermano Mauricio, por ser mi guía desde el primer momento.

A mi hermana Belén, por demostrarme el valor de la dedicación cotidiana.

A mi hermano Iván, por su indiscutible presencia en todo lugar y siempre.

A mi hermana Laura, por educarme sin saberlo con aquel primer libro.

A mi hermana Pía, por sacarme una sonrisa aún en días imposibles.

A mis sobrinos Milagros y Daniel, por demostrarme que en cualquier momento es posible volver a la niñez.

A mis amigos de toda la vida, por apartarme de la rutina.

A mis amigos de la Facultad, por esos tiempos tan valiosos entre clases y, por qué no, dentro de las mismas.

Al Ingeniero Andrés Rodríguez, por abrirme las puertas del Laboratorio de Hidráulica, aun llegando tarde.

Al Ingeniero Paolo Gyssels, por su predisposición y acompañamiento en el desarrollo de mi Práctica Supervisada.

A la Ingeniera Mariana Pagot, por permitirme incluir en este proyecto.

Al Ingeniero Mariano Corral, por facilitarme su práctica ayuda para la solución de este trabajo.

A la Ingeniera María Lábaque, por su rápida ayuda en cuanto a la finalización del informe y recordarme la importancia que representan los recursos hídricos provinciales.

# **Diseño de emisario submarino en el sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenuza), Córdoba, Argentina**

## **Resumen**

Todos los usos posibles del agua suponen un impacto específico en los recursos hídricos existentes. Los diversos usos -doméstico, industrial y agrario- generan grandes cantidades de residuos para los cuales las vías fluviales naturales constituyen conductos de eliminación económicamente conveniente y siempre disponible. Debido a que en algunas circunstancias las aguas residuales de algunos individuos se pueden convertir en abastecimiento de agua para otros, el proceso de tratamiento antes y después de su consumo resulta fundamental para la sociedad moderna,

Asimismo, los recursos hídricos se ven afectados de manera indirecta por la relación tierra-agua: el uso de suelo para la construcción, agricultura, la repoblación forestal, la deforestación y la lixiviación de los residuos de los vertidos, influyen en su naturaleza.

El conjunto de estos factores mencionados hacen variar a la calidad del medio acuático, modificando sus condiciones físico-químicas, el estado de la flora y fauna y, principalmente los procesos de consumo directo y actividades humanas indirectas que utilizan el agua como recurso.

En definitiva, la calidad del agua representa un concepto relativo de difícil definición y totalmente cualitativo. No es posible establecerlo sin antes fijar un individuo que necesite de este fluido y determinar el uso particular que el mismo le dará ya que el agua puede ser de calidad para algún ser vivo y no para otro, o bien ser de calidad para alguna actividad pero no para otra. De esta manera, y tratando de cuantificar este concepto, se conciben los parámetros físico-químicos y biológicos a través de una vasta bibliografía que se diversifica según el tiempo y lugar de su producción.

El agua subterránea presente en los acuíferos es altamente contaminada por distintas fuentes sólidas o líquidas. Dentro de estas últimas se destaca el agua residual doméstica o industrial, que introducen al sistema altas concentraciones de DBO (demanda biológica de oxígeno), nitratos, químicos orgánicos, bacterias y diferentes tipos de virus. Si bien estas concentraciones pueden ser disminuidas mediante el

saneamiento rural, el aumento de la población –y por lo tanto la demanda de agua potable junto al residuo que la misma genera luego de ser usada en una actividad-; debe traer aparejada un estudio de factibilidad en cuanto a la proyección de una red cloacal que conduzca estos líquidos resultantes a una planta depuradora, donde se le pueden realizar diversos tratamientos con mayor eficiencia que el mero saneamiento antes expuesto.

Aun así, pensar en un efluente “totalmente descontaminado” es una utopía ya que representa una alternativa de difícil o hasta imposible solución técnica y económica. Por otro lado, la idea de “contener” todos estos líquidos deriva en un problema de almacenamiento que conduce a los mismos resultados. De este modo, los tratamientos que se dan en la planta depuradora son tales que su efluente debe ser conducido y volcado de una manera particular en un cuerpo de agua receptor. Es allí donde radica la importancia del emisario submarino.

Este trabajo plantea el estudio de una posible descarga en la laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina) basado en el análisis de la pluma contaminante que el efluente desarrolla en el interior del cuerpo de agua al que ha sido conducido desde la planta de tratamiento mediante una obra denominada *emisario submarino*. Para ello se hará uso de un modelo numérico denominado *Cornell Mixing Zone Expert System* (“CORMIX”), el cual permite analizar diversas alternativas en el diseño de cada detalle de esta última obra de saneamiento y optimizar ingenierilmente la solución.

# ÍNDICE

1.	Capítulo Primero: Marco Referencial.....	1
1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Planteamiento general.....	2
1.3.	Marco Teórico.....	3
1.3.1.	Procesos de Transporte Hidrológicos.....	3
1.3.2.	Emisarios submarinos.....	4
1.3.3.	Concentración.....	6
1.3.4.	Dilución.....	6
1.3.5.	Densidad.....	7
1.3.6.	Estratificación.....	7
1.3.7.	<i>Jet</i> (Chorro) y <i>Plume</i> (Pluma).....	8
1.3.8.	Flujos Másico, de Momentum y de Flotabilidad.....	9
1.3.9.	Decaimiento bacteriano.....	9
1.3.10.	T90.....	10
1.3.11.	Estudio de la dispersión de la pluma contaminante.....	11
1.4.	Calidad de aguas para baño y uso recreacional.....	13
1.5.	Antecedentes en la República Argentina.....	14
1.5.1.	Directiva 76/160/CEE.....	14
1.5.2.	Directiva 2006/7/CE.....	15
1.5.3.	Tabla 1.1 Parámetros microbiológicos estipulados por la Unión Europea. Directiva 2006/7/CE (2006).....	15
1.5.4.	Emisario Submarino de Puerto Madryn.....	15
1.5.5.	Emisario Submarino de Mar del Plata.....	17
1.6.	Marco Regulatorio en la Provincia de Córdoba.....	17
1.6.1.	Decreto 847.....	19
1.6.2.	ANEXO I: Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos.....	20
1.6.3.	ANEXO III: Reúso de efluentes líquidos y uso agronómico de efluentes.....	21
1.7.	Legislación usada.....	22

---

1.8.	Objetivos .....	23
1.8.1.	Objetivo general .....	23
1.8.2.	Objetivos específicos .....	23
1.9.	Metodología del informe .....	23
2.	Capítulo Segundo: Análisis de la zona de estudio .....	25
2.1.	Introducción .....	25
2.2.	Ubicación y breve descripción .....	25
2.3.	Localidades a servir .....	29
2.3.1.	Período de Proyecto .....	30
2.3.2.	Población Futura .....	30
2.3.3.	Caudal de Proyecto .....	32
3.	Capítulo Tercero: Modelo Numérico .....	34
3.1.	Introducción .....	34
3.2.	Breve descripción del modelo CORMIX .....	34
3.3.	Input del Modelo .....	36
3.4.	Diseño del emisario .....	38
3.4.1.	Parámetros de diseño para CORMIX1 .....	38
3.4.2.	Parámetros de diseño para CORMIX2 .....	39
3.5.	Inconvenientes del Modelo .....	40
3.6.	Análisis de datos .....	41
3.6.1.	Escalas de longitud para CORMIX1 y CORMIX2 .....	41
3.6.2.	Categorías de Clase de Flujos .....	42
3.7.	Output del Modelo .....	47
4.	Capítulo Cuarto: Modelización .....	49
4.1.	Introducción .....	49
4.2.	Parámetros de diseño .....	49
4.2.1.	Características del efluente .....	49
4.2.2.	Ubicación, longitud y profundidad del emisario .....	50
4.3.	Resumen de los valores adoptados .....	52
4.4.	Propuesta de alternativas .....	52
4.4.1.	Alternativa A .....	52
4.4.2.	Alternativa B .....	53
4.4.3.	Alternativa C .....	54

4.5.	Resultados .....	54
4.6.	Análisis y selección de alternativas .....	59
4.7.	Análisis de sensibilidad – Alternativa B -1 .....	60
4.8.	Evolución de la pluma contaminante .....	63
5.	Capítulo Quinto: Conclusiones.....	72
5.1.	Sobre la importancia de la calidad de aguas.....	72
5.2.	Sobre la importancia de un sistema de red cloacal, planta depuradora y emisario final.....	73
5.3.	Sobre el modelo CORMIX .....	74
5.4.	Sobre los resultados obtenidos .....	75
6.	Referencias .....	78
	ANEXO.....	80

## Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema general. ....	5
Figura 1.2 Estratificación en lagos. (Kiely, 1999: 323).....	8
Figura 1.3 <i>Campo Cercano</i> -Near Field- y <i>Campo Lejano</i> -Far Field-. Arriba en planta, abajo en corte. (Jirka, Donoker & Hinton, 1996). ....	12
Figura 1.4 Emisario de Puerto Madryn y su pluma contaminante. Fuente propia. ....	16
Figura 1.5 Emisario de Mar del Plata. Fuente propia.....	17
Figura 2.1 Ubicación de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Imagen Satelital – Google Earth.....	26
Figura 2.2 Batimetría de la Laguna Mar Chiquita. Cecilia Pozzi (2006).....	27
Figura 2.3 Campo vectorial de velocidades para el viento norte. Cecilia Pozzi (2006). 28	
Figura 2.4 Campo vectorial de velocidades para el viento sur. Cecilia Pozzi (2006)....	28
Figura 2.5 Localidades a servir. Imagen Satelital – Google Earth. ....	29
Figura 3.1 Subprogramas del modelo CORMIX. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996).....	36
Figura 3.2 Diagrama de variables para CORMIX1. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996)..	39
Figura 3.3 Diagrama de variables para CORMIX2. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996)..	40
Figura 3.4 Diagrama de clases de flujo S. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ....	44
Figura 3.5 Diagrama de clases de flujo V y H. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996).....	44
Figura 3.6 Diagrama de clases de flujo NV y NH. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ...	45
Figura 3.7 Diagrama de clases de flujo A. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996).....	45
Figura 3.8 Diagrama de clases de flujo MS. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996).....	46
Figura 3.9 Diagrama de clases de flujo MU. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ....	46
Figura 3.10 Diagrama de clases de flujo MNU. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ....	47
Figura 4.1 Ubicación de posibles puntos de descarga. Fuente propia.....	51
Figura 4.2 Campo Lejano para MU8. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ....	64
Figura 4.3 Perfil de concentraciones para flujos de clase 234 y 241. <i>Jirka, Donoker &amp; Hinton</i> (1996). ....	64
Figura 4.4 Pluma en el Campo Cercano. Arriba se puede observar el corte longitudinal, mientras que abajo está representada en planta. ....	65
Figura 4.5 Pluma en el Campo Lejano. a) Corte longitudinal; b) Vista en planta; .....	67
Figura 4.6 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para el modelo CORMIX, con viento sur. ....	70
Figura 4.7 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para viento norte.....	70
Figura 4.8 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para viento sur. ....	71

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Parámetros microbiológicos estipulados por la Unión Europea. Directiva 2006/7/CE (2006) .....	15
Tabla 1.2 Estándares del efluente vertido en cuerpos de agua superficiales. Decreto 847 (2016) .....	20
Tabla 1.3 Estándares del efluente para reúso. Decreto 847 (2016) .....	21
Tabla 2.1 Habitantes de las localidades. INDEC 1991, 2001 y 2010. ....	31
Tabla 2.2 Tasas intercensales y promediadas. ....	31
Tabla 2.3 Población futura por localidad.....	31
Tabla 4.1 Características del agua residual doméstica. Kiely (1999).....	50
Tabla 4.2 Valores adoptados para el modelizado mediante CORMIX .....	52
Tabla 4.3 Alternativa A: parámetros adoptados. ....	53
Tabla 4.4 Alternativa A: casos planteados. ....	53
Tabla 4.5 Alternativa B: parámetros adoptados. ....	53
Tabla 4.6 Alternativa B: casos planteados.....	54
Tabla 4.7 Alternativa C: parámetros adoptados. ....	54
Tabla 4.8 Alternativa C: casos planteados.....	54
Tabla 4.9 Comparación de alternativas .....	58
Tabla 4.10 Recomendaciones de diseño. Guía para el Diseño de Emisarios Submarinos (México, 2007) .....	60
Tabla 4.11 Análisis de sensibilidad en cuando a diámetros y número de bocas de salida. ....	62
Tabla 4.12 Comparación entre los casos posibles seleccionados.....	62
Tabla 4.13 Parámetros de la alternativa final .....	63

# 1. Capítulo Primero: Marco Referencial

## 1.1. Introducción

El agua es uno de los elementos principales que hacen a la supervivencia de cualquier ser vivo conocido. En cuanto a los movimientos y transformaciones que lleva a cabo, podríamos suponer la existencia de dos ciclos: el primero y más conocido no es otro que el hidrológico, donde el agua -bajo ciertas condiciones físico-químicas-, se desplaza a nivel atmosférico o a través de cuerpos de agua superficiales y subterráneos con los cambios de estado que le son propios, para volver al primer nivel a través de procesos como la evaporación, transpiración y evapotranspiración. El segundo ciclo es a menor escala, donde el agua es usada con alguna finalidad en particular, alterando su composición fisicoquímica y biológica para luego ser devueltas de alguna manera al ciclo anteriormente nombrado.

Es en este último ciclo donde cada organismo, según su necesidad, requiere agua no solo de diversas formas sino también bajo ciertas exigencias que pueden ser concebidos bajo la denominación de parámetros. De la misma manera y luego de su uso, estos parámetros varían y el fluido resultante termina de una u otra manera reingresando al sistema global hidrológico.

En particular, el agua de consumo domiciliario -usada tanto en alimentación como transporte de heces, lavado, entre otros- es devuelta a un cuerpo de agua receptor. En la actualidad es común encontrar para pequeñas poblaciones, sistemas de saneamiento rural como lo son los Pozos Negros Absorbentes y las Cámaras Sépticas proseguidas por Zanjias de Absorción o Pozos Absorbentes. El principal problema de esta configuración radica en que el agua potable utilizada por estas sociedades es proveniente de la napa freática e impulsada por el bombeo correspondiente, por lo que cualquier fuente de contaminación afecta directamente el servicio.

Por otro lado, el crecimiento demográfico conlleva -o al menos debería hacerlo- a la concepción de un sistema de red cloacal con su planta depuradora y emisario final. Evidentemente, el límite que separa una situación de la otra deberá ser estudiado en

cada caso mediante un estudio Costo/Beneficio, que no solo involucra análisis económico, sino también ecológico y social.

Las aguas cloacales resultan entonces de una combinación entre agua portadora y residuos procedentes de viviendas, instalaciones públicas, centros comerciales e industriales, con un alto contenido de materia orgánica, microorganismos patógenos, nutrientes y hasta sustancias tóxicas. La Planta Depuradora de estos residuos tiene la función de eliminar o al menos disminuir las concentraciones de estos componentes a fin de que el futuro vertido en el cuerpo receptor cumpla con ciertos requisitos. A su vez el vuelco de este efluente genera una mancha que comienza a propagarse en el cuerpo receptor, cuya evolución en tiempo y espacio define zonas aptas para cierto uso por parte de ciertos individuos y es el objeto de este trabajo.

## 1.2. Planteamiento general

El presente trabajo presenta un estudio de descargas en la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina, basado en el diseño de un *emisario submarino* y la evolución de la mancha del agua residual previamente tratada proveniente de las ciudades más importantes alrededor de este cuerpo receptor. Se trata, en definitiva, de estipular las ventajas de este sistema frente al actual, el cual está compuesto básicamente por cámaras sépticas donde el líquido llega también a la laguna pero no sin antes contaminar el agua subterránea.

Este análisis forma parte de un proyecto de investigación titulado “Estudio de descargas a la Laguna Mar Chiquita, Provincia De Córdoba, Argentina”, bajo la dirección de la Mg. Inga. Mariana Pagot; y es desarrollado por el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

## 1.3. Marco Teórico

### 1.3.1. Procesos de Transporte Hidrológicos

Desde el punto de vista geológico, el agua pura del planeta siempre ha transportado residuos desde la tierra hacia diversos cuerpos de agua, siendo los más usuales los océanos. Dentro de los residuos típicos, podemos mencionar: sedimentos y sales inorgánicas naturales, líquidos calentados como producto de un proceso de refrigeración, residuos orgánicos, metales, químicos orgánicos sintéticos, materiales radiactivos, entre otros.

Evidentemente, intentar contener todos los residuos en algún volumen generaría un problema de almacenamiento de imposible solución, por lo que el estudio de su desarrollo dentro de los cuerpos de agua receptores se vuelve fundamental a la hora de determinar aquellos parámetros importantes a tener en cuenta según los posibles usos a los cuales esté sometido y la delimitación de las zonas permisibles en las cuales éstos serán llevados a cabo.

Los procesos de transporte hidrológicos son aquellos que permiten el movimiento de distintos componentes, sustancias o propiedades dentro de un cuerpo de agua, disminuyendo a lo largo de la mancha la concentración de dichos elementos. Dentro de los procesos básicos existentes encontramos:

- Advección: transporte originado por el movimiento, expresado en su velocidad, del cuerpo de agua.
- Convección: transporte vertical inducido por inestabilidad hidráulica, debido a gradientes térmicos.
- Difusión: dispersión de las partículas según movimientos moleculares aleatorios.
- Dispersión por Corte: transporte debido a diferencias de velocidad del perfil transversal del cuerpo de agua.

- Evaporación: transporte de vapor de agua desde la superficie del cuerpo líquido.
- Radiación: flujo de energía radiante desde la superficie.
- Sedimentación y Resuspensión: transporte hacia el fondo -o desde el fondo- de partículas según su densidad y velocidad del cuerpo.

Si bien en la realidad se dan todos los procesos al mismo tiempo, algunos son más importantes que otras bajo ciertas circunstancias. Las ecuaciones diferenciales desarrolladas para encontrar una solución analítica al problema no resultan del todo prácticas y es por ello que se han creado diversos modelos numéricos capaces de computarizarse.

### 1.3.2. Emisarios submarinos

Un emisario submarino es una tubería sumergida que conduce aguas residuales desde la tierra hacia el mar. La localización del punto de descarga de ese emisario es de suma importancia ya que afecta la forma en la cual la dispersión tomará lugar y el tiempo requerido para que cualquier efluente alcance la línea costera.

Como se puede apreciar en la Figura 1.1, el sistema emisor consiste en una tubería principal junto a sus accesorios, rematando en su extremo final en una nueva tubería, denominada difusor, caracterizada por la presencia de puertos con diferentes configuraciones y desde los cuales el efluente es descargado en el cuerpo receptor.

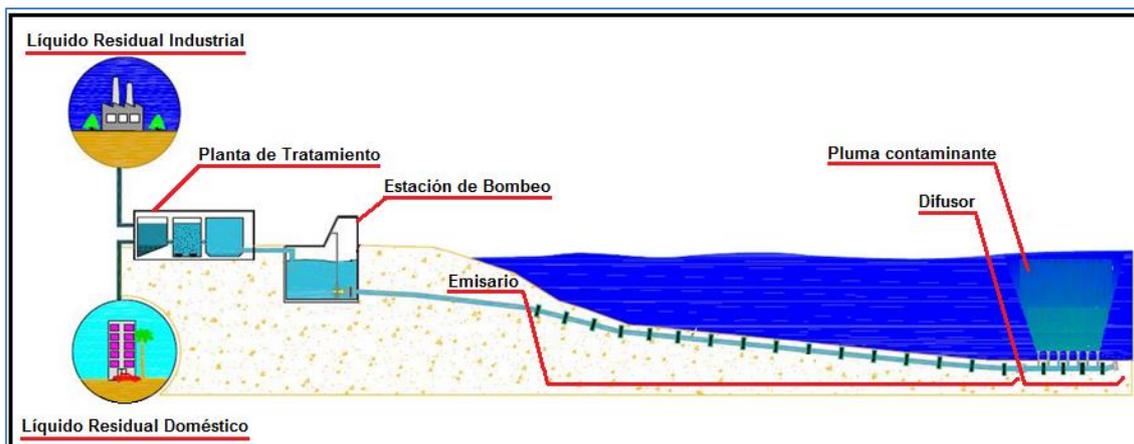


Figura 1.1 Esquema general.<sup>1</sup>

El tipo más común de tuberías para emisarios submarinos son fabricadas en concreto reforzado, aunque todavía es posible encontrar algunas de hierro fundido, hierro forjado, acero o plástico. Las ventajas de las primeras recaen en la flexibilidad en cuanto a su tamaño y resistencia a ataques fisicoquímicos tanto del agua del mar como de organismos marinos.

Los diversos parámetros que caracterizan la obra para abordar un proyecto consistente de un emisario submarino dependen de datos concernientes a la naturaleza del afluente, número de habitantes a servir, caudal vertido, tipo de tratamiento que recibe el efluente -en caso de planta depuradora de algún tipo-, vientos, oleaje, corrientes y uso de la zona de descarga, forma de la costa, flora y fauna, naturaleza del fondo, perfil batimétrico, hidrometeorología local, entre otros. Con estos parámetros propios de la naturaleza, se deben definir los parámetros de diseño como son la longitud y el diámetro del emisor, característica y número de puertos, velocidad del efluente en el emisor y en las bocas de salida, materiales, cimentación y anclaje.

El emisario tiene como finalidad introducir en el cuerpo receptor, en condiciones idóneas, un cierto caudal de aguas contaminadas de tal forma que, sanitaria y ecológicamente, esta inyección no sea perjudicial, destructiva u ofensiva.

El diseño apropiado de un sistema de emisario submarino puede lograr diluciones suficientes de la descarga de aguas residuales para reducir las concentraciones de

<sup>1</sup> Imagen extraída del documento "Clase de emisarios" de la materia Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas. Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Mención Recursos Hídricos. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

contaminantes a niveles generalmente establecidos como normas de calidad de agua. Una dilución mínima de 100:1 es común, permitiendo que la alternativa de un emisario submarino supere la de las plantas de tratamiento convencionales.

Existen varios mecanismos que controlan las características de dilución de un emisario submarino. Dichos mecanismos usualmente se consideran en tres fases: la dilución inicial, que ocurre durante los primeros minutos al salir las aguas residuales del emisario submarino y ascender en la columna de agua del cuerpo receptor; el transporte y la dispersión horizontal del campo de aguas residuales; y las reacciones cinéticas que ocurren en el mar. Respecto de la descarga de aguas negras, el mecanismo de mayor importancia para el diseño es el de la desaparición de organismos indicadores tales como coliformes fecales y coliformes totales.

Tres fenómenos afectan la dilución inicial: mezcla causada por el impulso de las aguas servidas al salir del emisario submarino; fuerza vertical originada por la diferencia de densidad entre las aguas residuales y las aguas de mar -diferencias en temperatura y salinidad-; finalmente, mezcla lateral producida por el efecto de la corriente. La pluma puede ascender a la superficie o llegar a un nivel sumergido, dependiendo del grado de estratificación de la columna de agua.

### 1.3.3. Concentración

Se define *concentración* como la cantidad de masa de un elemento -en nuestro caso, un contaminante- por unidad de volumen -en nuestro caso, volumen de agua-.

$$\bar{C} = \Delta Masa / \Delta Volumen$$

En un punto, la concentración es la que se da cuando el volumen tiende a cero:

$$C = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta Masa / \Delta Volumen = dM / dV$$

### 1.3.4. Dilución

Se define *dilución* como el volumen total de una muestra en relación con el volumen del efluente –contaminante, en nuestro caso- contenido en dicha muestra.

$$S = \frac{\text{Volumen total de la muestra}}{\text{Volumen del efluente en la muestra}}$$

Es decir, para un volumen de agua con un contaminante, S tenderá a la unidad en el caso de que no esté diluido -volumen de agua muy pequeño respecto del contaminante- y tenderá a infinito para agua pura.

#### 1.3.5. Densidad

Se define *densidad* como la relación entre la masa de un determinado cuerpo y su volumen.

$$\rho = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

#### 1.3.6. Estratificación

La temperatura y la salinidad combinadas influyen en la densidad del agua y, en menor medida, también lo hace la presión -que aumenta con la profundidad-. Las variaciones térmicas son las más influyentes en el fenómeno de estratificación: durante el invierno las temperaturas son relativamente uniformes en todo el lago y los vientos provocan una mezcla en toda la columna de agua (ver Figura 1.2 (a) y (c)). En verano, por su parte, las aguas superficiales se calientan, disminuyendo su densidad y flotando sobre el agua más fría que se encuentra por debajo. Estas diferencias de densidad hacen que el viento no pueda generar una mezcla en toda la profundidad (ver Figura 1.2 (b) y (d)).

A medida que la temperatura aumenta, la discontinuidad de densidad crece hasta lograr la estratificación en tres zonas: la primera es el *epilimnion*, templada en la superficie; la segunda es el *hipolimnion*, fría en el fondo; la última es la *termoclina*, una capa que se forma entre las dos zonas mencionadas anteriormente donde la

temperatura varía rápidamente con la profundidad y es la que evita la mezcla entre la zona inferior y superior del cuerpo de agua.

Así, la estratificación se define a través de un perfil transversal de densidad, definida por una función  $\rho(z)$ . Dicha función puede representar un gradiente lineal distendido en la profundidad o bien presentar en algún punto un gradiente fuertemente marcado que provocará variaciones en cuanto a la evolución del contaminante y que puede quedar atrapado dentro del cuerpo de agua receptor.

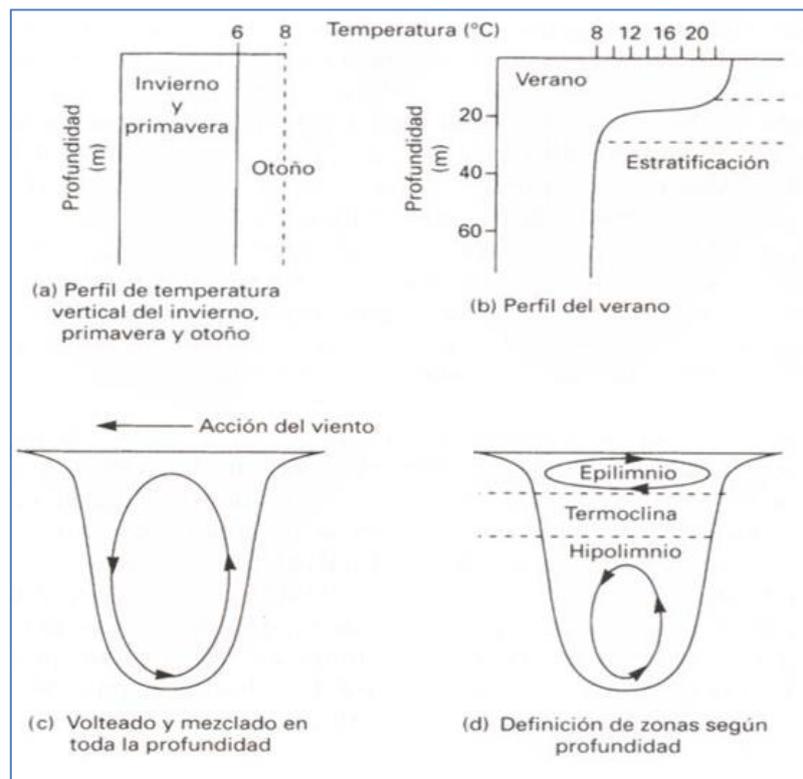


Figura 1.2 Estratificación en lagos. (Kiely, 1999: 323)

### 1.3.7. *Jet* (Chorro) y *Plume* (Pluma)

Un *jet* se define como una descarga de fluido desde un orificio hacia un cuerpo receptor líquido, lo caracteriza su gran velocidad de salida y el no estar influenciado por un potencial debido a diferencias de densidad efluente-cuerpo (flotabilidad). En algunos casos, la flotabilidad puede ser decisiva frente a la velocidad antes mencionada, este fenómeno se denomina *pluma*. En la mayoría de las situaciones se genera un fenómeno intermedio, llamado *pluma forzada*. Es de destacar que cualquier *jet* se comporta como *pluma* luego de cierta distancia característica.

### 1.3.8. Flujos Másico, de Momentum y de Flotabilidad

El *flujo másico* se define como la masa de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo:

$$\rho\mu = \int \rho w dA$$

El *flujo de momentum* se define como la energía cinética que pasa por una sección por unidad de tiempo:

$$\rho m = \int \rho w^2 dA$$

El *flujo de flotabilidad* se define como el peso sumergido de un fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo:

$$\rho\beta = \int g\Delta\rho w dA$$

Donde  $\rho$  es la densidad del líquido efluente;  $\mu$  es el flujo volumétrico o específico;  $w$  es la velocidad es la velocidad media del efluente;  $A$  es el área transversal del orificio de salida;  $m$  el momentum específico;  $\beta$  es la flotabilidad específica;  $g$  la gravedad y  $\Delta\rho$  la diferencia de densidad entre la del efluente y la del cuerpo receptor.

Las relaciones entre estos parámetros definen las denominadas *escalas de longitud* que, como se verá más adelante, representan distintas distancias a recorrer para que la evolución del contaminante adquiera diferentes formas.

### 1.3.9. Decaimiento bacteriano

El *decaimiento bacteriano* es un fenómeno que tiene como resultado una disminución de la cantidad de bacterias -y por lo tanto de la concentración- presentes en una muestra de agua. Cada tipo de bacteria necesita de ciertas condiciones para su

crecimiento, existencia y reproducción. Por lo tanto, cuando la situación no le es propicia, muere o escapa del volumen de control.

Para nuestro caso en particular, una vez descargado el efluente en el mar se produce con el tiempo una reducción adicional de la concentración de las bacterias fecales indicadoras debida a la pérdida de la viabilidad de las mismas que dependen de causas tales como: la lesión por la radiación solar, la depredación producida por la microbiota natural –protozoos-, el estrés osmótico -por paso de agua dulce a salada-, la destrucción o infección producida por bacteriófagos. Además, la desaparición de bacterias de la columna de agua puede ocurrir por sedimentación de las que se encuentran asociadas al material particulado.

Las causas dominantes de la disminución de la concentración de bacterias son la muerte de estos microorganismos producida por el estrés osmótico antes mencionado y el efecto de la radiación solar, en especial la ultravioleta de onda corta como lo es la UVB. Según varios estudios realizados un 50% de la mortandad es atribuida a los rayos UV – un 25% a los UV próximos y un 25% al azul – verde (Muñoz Hernández, 1990). Los otros procesos de inactivación -depredación, temperatura, deficiencia de nutrientes- aparecen como factores secundarios.

La tasa de inactivación es proporcional a la concentración  $C$  de la bacteria indicadora:

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

Donde  $k$  es la constante de inactivación y  $t$  es el tiempo. La concentración  $C$  al tiempo  $t$  es entonces:

$$C = C_0 e^{-kt}$$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial del sistema.

#### 1.3.10. $T_{90}$

Relacionado con el decaimiento bacteriano,  $T_{90}$  es el tiempo en el cual mueren el 90% de las bacterias. Es uno de los parámetros más importantes cuando hablamos de

líquidos residuales urbanos. Sin lugar a dudas estos dos últimos parámetros hacen del líquido residual doméstico en particular un efluente de tipo No Conservativo, es decir, uno cuyo contaminante -en este caso bacterias- sufre una disminución de su valor independientemente de los procesos de transporte hidrológicos antes señalados.

#### 1.3.11. Estudio de la dispersión de la pluma contaminante

El comportamiento de mezclado de cualquier descarga de aguas residuales se encuentra gobernado por la interacción de las condiciones del ambiente en el cuerpo de agua receptor y por las características de la descarga. Las condiciones ambientales están descritas por las características físicas y dinámicas de ese cuerpo, como lo son la forma de la costa, secciones transversales verticales y posición respecto de la descarga, como así también la velocidad de flujo y perfil de densidad.

Por otro lado, las condiciones de descarga se relacionan con la geometría y características del flujo en la instalación de la descarga sumergida. Para emisarios de único puerto, la geometría está definida por el diámetro del puerto, su elevación y su orientación. Para instalaciones de difusor de bocas múltiples el arreglo de los detalles de construcción representa características geométricas adicionales que le son propias. A su vez, las características del flujo estarán dadas por el gasto del efluente, cantidad de movimiento y flotación.

La hidrodinámica de un efluente descargando continuamente en el cuerpo receptor se puede conceptualizar como un proceso de mezclado que ocurre en dos regiones separadas. En la primera, y a partir de la boca del difusor, la cantidad de movimiento y la flotación influyen en la trayectoria y mezclado del chorro, conformando una zona denominada *Campo Cercano*. Es en esta región donde las características de mezclado inicial de la descarga se pueden modificar trabajando con las variables de diseño del emisario en sí. A medida que la pluma se desplaza, las características del emisario comienzan a perder valor en cuanto al proceso de mezcla, prevaleciendo las condiciones existentes en el medio receptor, las cuales controlarán la trayectoria y dilución de la pluma turbulenta a través del movimiento combinado flotación-dispersión y difusión pasiva debido a la turbulencia del ambiente. Esta región es conocida como *Campo Lejano*. Ambas zonas se pueden apreciar en la Figura 1.3.

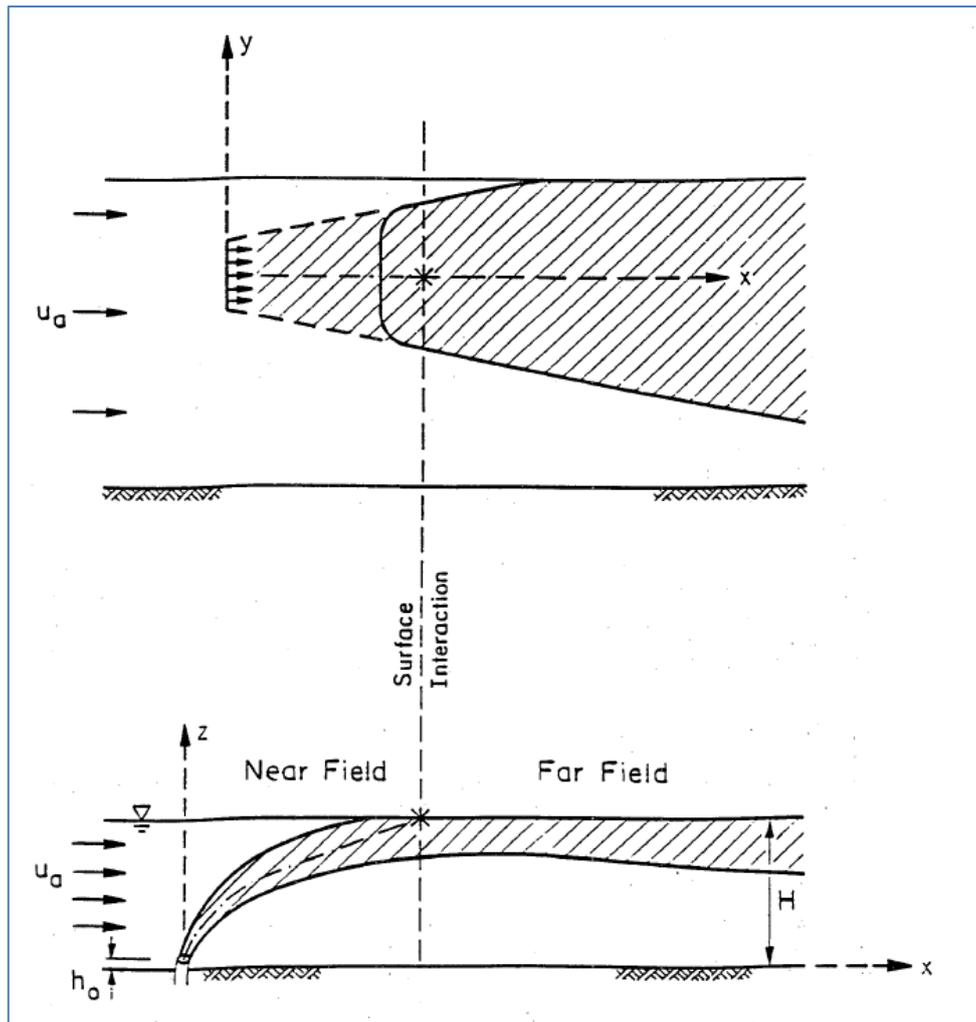


Figura 1.3 *Campo Cercano -Near Field- y Campo Lejano -Far Field-*. Arriba en planta, abajo en corte. (Jirka, Doneker & Hinton, 1996).

Cerca de la fuente el flujo del jet o la pluma está controlado usualmente solo por las condiciones iniciales que incluyen: la geometría de la boca de salida, la velocidad media de salida, la diferencia de densidad inicial entre el efluente y el cuerpo receptor y la intensidad de la turbulencia en la salida.

Dentro del Campo Cercano, podemos definir tres procesos importantes (Jirka, Doneker & Hinton, 1996).

- a) Mezcla sumergida -tipo *bouyant-jet*-: al salir por los puertos, la diferencia de velocidad entre el chorro y la perteneciente al cuerpo receptor causan una intensa dispersión por corte, lo que provoca una fuerte turbulencia y un incremento del ancho de la mancha. De esta manera el momentum y el contaminante decaen gradualmente. Según las relaciones entre el momentum

y la flotabilidad, se puede hablar de un *jet puro* –chorro- para momentum importante; una pluma pura, para flotabilidad importante; o bien una combinación de ambos, denominada pluma forzada -o *bouyant jet*-.

- b) Interacción con contornos: tales como la superficie del agua, el fondo y todos aquellos contornos internos provocados por procesos de estratificación, donde los gradientes de densidad del cuerpo receptor pueden atrapar la descarga. Generalmente la interacción con estos contornos generan una zona de transición entre el Campo Cercano y el Campo Lejano.
- c) Mezcla superficial: cuando por flotabilidad se llega a uno de los contornos horizontales antes mencionados, comienza un proceso de mezcla transversal bien diferenciado, pudiendo llegar la mancha a contornos horizontales, como lo son las costas.

Por su parte el Campo Lejano está caracterizado principalmente por el proceso de advección longitudinal del efluente, debido a la velocidad del cuerpo de agua receptor.

Paralelamente a estos procesos de transporte, se debe recordar el fenómeno de decaimiento bacteriano que se da por la falta de condiciones propicias para la existencia de esos organismos, lo que generalmente se presenta en la zona cercana a la superficie por la radiación solar.

#### 1.4. Calidad de aguas para baño y uso recreacional

Las normas locales de diferentes provincias o los valores de los niveles guías internacionales existentes para dar solución a los problemas de vertidos tienen en cuenta la concentración de bacterias Coliformes Totales. La gran mayoría de ellas establecen una concentración máxima que varía entre 500 y 1000 NMP -número más probable- de bacterias Coliformes Totales por cada 100 mL de agua cuando su uso es para baño y/o recreacional. En la actualidad casi toda la normativa ambiental internacional utiliza como indicadores de calidad microbiológicas, en aguas para baño, a las bacterias *Echerichi coli* para aguas dulces y a los *Enterococos* para aguas saladas (EPA, 2003).

## 1.5. Antecedentes en la República Argentina

Para este trabajo se tienen como antecedentes dos proyectos de características similares en la República Argentina. El primero es el emisario submarino de Puerto Madryn y el segundo se trata del emisario submarino de Mar del Plata. La normativa usada en ambos casos fue la Directiva 76/160/CEE de 1975, relativa a la calidad de las aguas de baño y fijada por la Unión Europea para la vigilancia, evaluación y gestión de la calidad de las aguas de baño con el objetivo de reducir y prevenir su contaminación.

### 1.5.1. Directiva 76/160/CEE

Esta directiva define en primer lugar el concepto de *aguas de baño* como:

“aguas o parte de estas, continentales, corrientes o estancadas, así como el agua de mar, en las que el baño: esté expresamente autorizado por las autoridades competentes de cada Estado miembro, o no esté prohibido y se practique habitualmente por un número importante de bañistas.” (1975).

Entendiendo por *Estados miembro* a aquellos países regidos por esta directiva, la cual culmina presentando una tabla, denominada “Requisitos de Calidad de las Aguas de Baño”, donde se establecen los parámetros Microbiológicos, Físico-químicos y Otras sustancias indicadoras y la forma de determinarlos. Respecto de este trabajo, nos interesan los parámetros del primer grupo y en particular los referidos a los Coliformes Totales. Para éstos se fija un límite máximo a través de un valor guía de 500 NMP por cada 100 ml de agua y un obligatorio de 1000 NMP por cada 100 ml de agua.

Sin embargo la Directiva 76/160/CEE queda derogada a partir del año 2014 fijándose la nueva Directiva 2006/7/CE, que es la que se tendrá en cuenta en este trabajo.

## 1.5.2. Directiva 2006/7/CE

Esta nueva directiva cuenta con mayores detalles que la anterior en cuanto a la gestión del recurso y su contaminación. Asimismo, la cantidad de Coliformes Totales y Fecales pasa a contarse a partir de dos nuevos parámetros: los Enterococos intestinales y los Escherichia coli, medidas en UFC -Unidades Formadoras de Colonias- por cada 100 ml de agua. A continuación se transcribe en la Tabla 1.1 los valores presentados en la directiva para aguas continentales:

Parámetro	Calidad Excelente	Calidad Buena	Calidad Suficiente	Métodos de análisis de referencia
Enterococos intestinales (UFC/100 ml)	200 (*)	400(*)	330(**)	ISO 7899-1 o ISO 7899-2
Escherinchia coli (UFC/100 ml)	500(*)	100(*)	900(**)	ISO 9308-3 o ISO 9308-1

1.5.3. Tabla 1.1 Parámetros microbiológicos estipulados por la Unión Europea.

Directiva 2006/7/CE (2006)

Donde el asterisco (\*) se refiere a una evaluación del percentil 95 y el doble asterisco (\*\*) a una evaluación del percentil 90.

Es de notar el gran cambio entre una directiva y otra: los límites en la segunda son menores a la mitad de los límites de la primera.

## 1.5.4. Emisario Submarino de Puerto Madryn

Proyectado como parte de un plan de contingencia previsto durante las emergencias, el emisario submarino realiza la disposición final en el mar de efluentes contaminados. En este caso en particular, las corrientes costeras se encuentran influenciadas por el régimen de mareas y la acción del viento, por lo que fueron analizados diferentes escenarios hidrodinámicos críticos para el diseño del emisario y de las obras accesorias.

Con el apoyo de modelos numéricos de dilución se han planteado diferentes alternativas de disposición, las que varían la longitud del emisario, la profundidad de la descarga y el tipo de descarga -puerto único o multipuerto-. Con los resultados

obtenidos se ha realizado el anteproyecto de la obra del emisario, el que consiste en una estación de bombeo ubicada en la costa, una tubería de impulsión que en principio se alojará en el conducto de servicios existente en el muelle Luis Piedrabuena (ver Figura 1.4) y una obra específica de descarga sumergida a la distancia y profundidad que ha surgido de los estudios de dilución. Se han trabajado con caudales de  $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figura 1.4 Emisario de Puerto Madryn y su pluma contaminante. Fuente propia.

Las obras propuestas básicamente se resumen en:

1. **Estación de Bombeo** ubicada en la costa
2. **Tubería de Impulsión o Emisario** de diámetro 350 mm, que se propone alojar en el conducto de servicios existente en el muelle Luis Piedrabuena, con una longitud de 800 m.
3. **Tubería del Difusor** a una distancia mínima de la costa de 800 m, longitud del difusor 28 m, profundidad de 18 m, con puertos de descarga cada 6 m y 2 bocas por puerto de diámetro 75 mm. Esta distancia coincide con el extremo final del muelle Luis Piedrabuena.

### 1.5.5. Emisario Submarino de Mar del Plata

Es una obra de mayor envergadura que la anterior (ver Figura 1.5). Se tuvieron en cuenta diversas variables como como en Puerto Madryn, pero sin embargo es de destacar la gran diferencia de caudales entre ambos proyectos: en este emisario se han corrido los modelos con caudales que van desde los  $1,60 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta los  $9,00 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figura 1.5 Emisario de Mar del Plata. Fuente propia.

La obra está compuesta básicamente por:

1. **Estación de Bombeo** ubicada en la costa
2. **Tubería de Impulsión o Emisario** de diámetro 2,00 m y longitud de 3.245 m.
3. **Tubería del Difusor** a una distancia de la costa de 3.245 m, longitud del difusor 520 m, profundidades variables entre 12,77 m a 14,33 m, con puertos de descarga cada 4 m y 1 boca por puerto de diámetro 150 mm.
4. **Obras de Protección** necesarias.

## 1.6. Marco Regulatorio en la Provincia de Córdoba

La organización federal de la República Argentina, consagrada en la Constitución Nacional de 1853, reconoce la preexistencia de las provincias que, por su voluntad, deciden conformar una Nación. Como consecuencia, los Estados Provinciales

conservan todas las competencias que no hayan delegado expresamente al Gobierno Federal, entre ellas la gestión de sus propios recursos. La reforma de 1994 mantiene y profundiza el federalismo al incorporar el artículo 124, donde se establece que “corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio” (Constitución de la Nación Argentina, 1994:37).

De esta manera se sanciona en el año 2014 la **Ley 10.208 sobre POLÍTICA AMBIENTAL PROVINCIAL**, y en su **artículo 1** establece que la misma *“complementa los presupuestos mínimos establecidos en la Ley Nacional N° 25.675 -General del Ambiente -, para la gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable que promueva una adecuada convivencia de los habitantes con su entorno en el territorio de la Provincia de Córdoba”*.

A su vez, el **artículo 2** define a esta Ley como *“de orden público y se incorpora al marco normativo ambiental vigente en la Provincia – Ley N° 7.343, normas concordantes y complementarias-, modernizando y definiendo los principales instrumentos de política y gestión ambiental y estableciendo la participación ciudadana en los distintos procesos de gestión”*.

El **artículo 7** declara al Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos o el organismo que en el futuro lo sustituyere como Autoridad de Aplicación de esta Ley.

El **artículo 8**, por su parte, menciona los instrumentos de política y gestión ambiental que se utilizarán en forma prioritaria:

- El ordenamiento ambiental del territorio;
- La evaluación de impacto ambiental;
- La evaluación ambiental estratégica;
- Los planes de gestión ambiental;
- Los sistemas de gestión ambiental;
- El control de las actividades antrópicas;
- La fijación de estándares y normas;
- La educación ambiental;
- La información y diagnóstico ambiental;
- La participación ciudadana para la convivencia ambiental;
- El seguro ambiental, y

- Las medidas de autogestión, incentivos y alicientes ambientales.
- 

No es objetivo de este trabajo definir cada uno de estos instrumentos. Sin embargo se observa que la fijación de estándares y normas es una de las competencias de la Autoridad de Aplicación. El artículo 51 de la Ley reconoce tres tipos de estándares:

- a) Estándares ambientales;
- b) Estándares de emisiones o efluentes, y
- c) Estándares tecnológicos.

Los pertenecientes al segundo tipo son los que nos interesan, y están actualmente desarrollados en el **Decreto 847** y sus anexos correspondientes.

#### 1.6.1. Decreto 847

El **artículo 1** de este decreto establece que el mismo *“tiene como objeto establecer los mecanismos de control, fiscalización y seguimiento de las actividades antrópicas que se vinculan a la gestión en materia hídrica, fijar estándares de emisión o fluente, estándares tecnológicos y ambientales para los vertidos de efluentes líquidos a cuerpos receptores del dominio público provincial, promoviendo el uso de los recursos hídricos con visión de sustentabilidad”*.

El **artículo 4** presenta los diversos tipos de cuerpo receptor al que es aplicable el Decreto:

- Cursos de agua superficiales
- Conductos pluviales
- Canales de desagüe o avenamiento
- Canales de riego
- Sistemas de aguas subterráneas
- Subsuelo
- Suelo, para el reúso de efluentes líquidos o uso agronómico de efluentes.

El **artículo 15** del decreto establece que *“las descargas realizadas a los cuerpos receptores deberán reunir las condiciones de calidad (físicas, químicas y microbiológicas) fijadas en la presente reglamentación y las condiciones de caudal,*

frecuencia, periodicidad y ubicación del punto de descarga que determine la Autoridad de Aplicación, a través de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación. En caso de corresponder, y cuando no esté especificado en los anexos, y según el tipo de actividad que desarrolla el establecimiento, la Autoridad de Aplicación, a través de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación podrá exigir el cumplimiento de estándares de calidad considerando normativa comparada como referencia para su evaluación”.

El artículo 25 establece que “**se promoverá el reúso de aguas residuales**. La Autoridad de Aplicación podrá indicar el estándar tecnológico a cumplir para actividades varias, siempre y cuando las mismas cumplan con los estándares de calidad especificados en el Anexo III para cada caso en particular, el que podrá modificar para actualizarlo a los cambios tecnológicos, siempre con el espíritu de incorporar nuevas formas de reúso”.

A continuación se extraerán algunos fragmentos del ANEXO I y del ANEXO III, que tratan de los estándares del agua residual y de los tipos de reúsos posibles de dar a la misma, respectivamente.

#### 1.6.2. ANEXO I: Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos

En este anexo se presentan los estándares de calidad para el caso de vertidos a cuerpos de agua superficiales y para reúso.

##### 1. Efluentes líquidos vertidos a CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Dentro de los estándares, el que nos interesa para el proyecto son los de tipo microbiológicos y, en especial, los referidos a Coliformes. La Tabla 1.2 expresa los valores máximos permitidos.

Estándares	Unidades	Valor máximo permitido
DBO5	mg/L	≤ 40 o 30 (*)
DQO	mg/L	≤ 250
Coliformes Totales	NMP/ 100 mL	5000
Coliformes Termotolerantes (**)	NMP/100 mL	1000

Tabla 1.2 Estándares del efluente vertido en cuerpos de agua superficiales. Decreto 847 (2016)

(\*) Para lagos, embalses o lagunas y ríos o arroyos tributarios a estos cuerpos de agua.

(\*\*) Para vertidos en cuerpo de agua de contacto directo deberá además analizarse *Escherichia coli*.

## 2. Efluentes líquidos para REÚSO

Nuevamente nos interesan los Coliformes. Para este caso se presentan dos valores máximos permitidos por parámetro, resumidos en la Tabla 1.3, según el Tipo de Reúso, que son ocho en total y se explican más abajo, en el ANEXO III.

Estándar	Unidades	Valor máximo permitido	
		Tipo 1-3-6	Tipo 2-4-5-7-8
DBO <sub>5</sub>	mg/L	30	≤ 30
Nematodos intestinales <sup>a</sup>	Media aritmética n <sup>o</sup> de huevos por litro <sup>b</sup>	<1	≤1
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	<200	≤1000

Tabla 1.3 Estándares del efluente para reúso. Decreto 847 (2016)

a: Especies *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostomas

b: Durante el período de riego

**Además se establece una distancia mínima de 500 metros desde una playa o área destinada a deportes náuticos, menor de la cual deberán cumplirse los valores máximos permitidos.**

### 1.6.3. ANEXO III: Reúso de efluentes líquidos y uso agronómico de efluentes

Para el caso de reúso de efluentes líquidos, el efluente deberá ser tratado previamente a su reutilización, obteniéndose así un agua regenerada que cumpla con los estándares de calidad establecidos para cada caso en particular. Queda totalmente prohibido reutilizar efluentes crudos. En el caso de uso agronómico de efluentes, el mismo deberá estabilizarse previamente a su aplicación.

De acuerdo a la presente normativa, se clasifica a los efluentes según el tipo de reúso de efluentes líquidos en:

- Reúso urbano (tipo 1): Riego de todo tipo de zonas verdes, lavado de automóviles, inodoros, combate de incendios y otros de usos con similar acceso o exposición al agua.
- Reúso para riego con acceso restringido (Tipo 2): Cultivo de césped, silvicultura y otras áreas donde el acceso público es prohibido, restringido o poco frecuente.
- Reúso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesas comercialmente (Tipo 3): Riego de cualquier cultivo comestible, incluyendo aquellos que se consumen crudos.
- Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesas comercialmente (Tipo 4): Estos cultivos son aquellos que, previo a su venta al público, han recibido el procesamiento físico o químico necesario para la destrucción de los organismos patógenos que pudieran contener.
- Reúso agrícola en cultivos no alimenticios (Tipo 5): Riego de pastos para ganado lechero, forrajes, cultivos de fibras y semillas y otros cultivos no alimenticios.
- Reúso recreativo (Tipo 6): Contacto incidental y contacto primario con aguas regeneradas.
- Reúso paisajístico (Tipo 7): Aprovechamientos estéticos donde el contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición este claramente rotulada.
- Reúso en la construcción (Tipo 8): Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

## 1.7. Legislación usada

Para este informe se tendrán en cuenta lo estipulado en la Ley Provincial 10.208 y en el Decreto 847 complementario a la misma. Se hace mención que la tendencia actual para la solución de problemas de volcamiento de líquidos residuales no es la de hacerlo en cuerpos de agua, sino que ambientalmente se justifica la reutilización del

efluente, bajo ciertos tratamientos y controles, en alguno de los ocho tipos de reúsos propuestos en el ANEXO III del Decreto antes mencionado.

## 1.8. Objetivos

### 1.8.1. Objetivo general

El objetivo global del trabajo es presentar un diseño óptimo de un emisario submarino en la laguna Mar Chiquita, en cuanto a su capacidad y eficiencia en la descarga, a fin de utilizarse como una base para una futura concepción de un sistema de red cloacal en las localidades más importantes alrededor de este cuerpo de agua, y una planta depuradora del líquido residual doméstico que utilice la laguna como medio receptor.

### 1.8.2. Objetivos específicos

Son aquellos a partir de los cuales se alcanza el objetivo general:

- Análisis de la zona de estudio y obtención de los parámetros necesarios para el trabajo;
- Comprensión y utilización del modelo numérico CORMIX para la estimación de la evolución de la pluma contaminante;
- Propuesta de alternativas de desarrollo. Selección y ajuste final.

## 1.9. Metodología del informe

En este capítulo se ha presentado una introducción a la problemática en general en cuanto a la contaminación de cuerpos de agua y la dificultad de su estudio, mediante la definición de diversos conceptos básicos asociados, como así también las normativas europeas usadas y antecedentes argentinos en lo que respecta a este tema.

En el próximo capítulo se analiza la zona de estudio, compuesta por el cuerpo de agua receptor (Laguna Mar Chiquita) y por las localidades vecinas más relevantes alrededor de la misma, caracterizándola según diversos parámetros que son usados más adelante.

En el tercer capítulo se presenta el modelo numérico que se usará para el diseño del emisario, denominado *Cornell Mixing Zone Expert System* y más conocido como “CORMIX”, su funcionamiento, usos, ventajas e inconvenientes.

En el cuarto capítulo se plantean y valoran las variables del cuerpo receptor necesarias para la ejecución del programa CORMIX ya presentado, y luego se proponen una serie de alternativas basadas en diversos parámetros de diseño en lo que respecta al difusor y sus puertos. Se resumen y discuten a continuación los resultados obtenidos para cada caso, y se selecciona una configuración que es evaluada nuevamente mediante un último análisis de sensibilidad, para definir la solución final al problema.

El quinto y último capítulo cierra el informe con una serie de conclusiones a partir de las distintas etapas del desarrollo de este trabajo.

En el ANEXO se presenta un plano con los detalles del emisario.

## 2. Capítulo Segundo: Análisis de la zona de estudio

### 2.1. Introducción

En este capítulo se caracterizará resumidamente el cuerpo de agua receptor y su configuración hidrodinámica, como así también las localidades vecinas más importantes que se tendrán en cuenta para la realización del servicio de red cloacal, planta potabilizadora y, por último, diseño del emisario final, objetivo de este informe.

### 2.2. Ubicación y breve descripción

La laguna Mar Chiquita (o Mar de Ansenúza) es el cuerpo salado endorreico más grande de Sudamérica. Este sistema tiene tres afluentes: al sur los Ríos Suquía y Xanaes, y al norte el Río Dulce o Petri. Este importante sistema lagunar se ubica al noreste de la provincia de Córdoba, Argentina (ver Figura 2.1). Actualmente, su gran extensión alcanza una superficie de aproximadamente  $6.500\text{km}^2$  y una profundidad media de 4m (Pozzi, 2006).

La cuenca en la que se encuentra inserta la Laguna Mar Chiquita abarca cinco provincias de Argentina: Catamarca, Salta, Tucumán, Córdoba y Santiago del Estero, con mayor participación de las tres últimas, tanto en los aportes hídricos como en los derechos de uso y las obligaciones de conservación del recurso. Este complejo sistema posee una gran biodiversidad. Se han censado más de 317 especies y subespecies de aves que representan el 90% de todas las conocidas para Córdoba y el 30% de la avifauna argentina, 51 especies de mamíferos, 17 de reptiles, 9 de anfibios, 31 de peces y 133 de vegetales, sin contar que la diversidad de invertebrados y muy especialmente de insectos, supera en varios órdenes de magnitud el total de especies de vertebrados y plantas verdes (Pozzi, 2006).

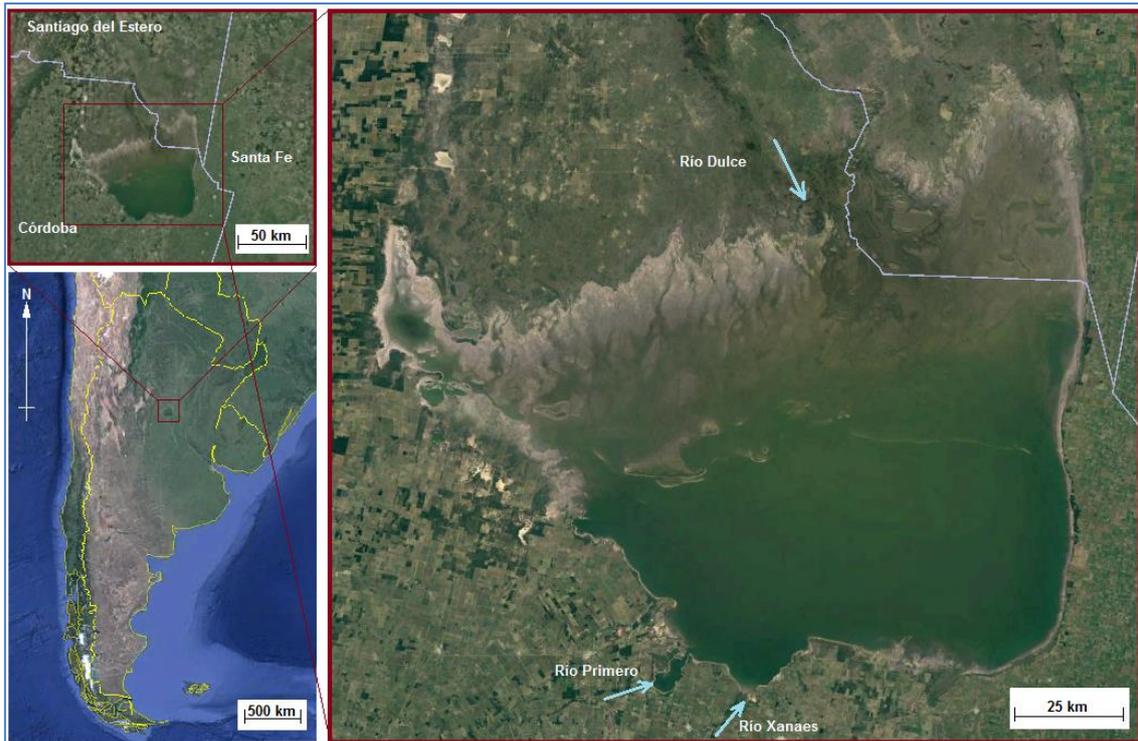


Figura 2.1 Ubicación de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Imagen Satelital – Google Earth.

La única población ribereña de este mar interior se ubica en la costa sur y es el centro balneario de Miramar. A unos 10 km hacia el sur se encuentra la ciudad de Balnearia, y a 12 km en línea recta hacia el oeste de dicha ciudad, también al sur de la laguna, encontramos la pequeña Marull. Por último sobre la margen suroeste, aproximadamente a 15 km de la costa, se localiza la ciudad de La Para. Las cuatro mencionadas (ver Figura 2.5 ) conforman un polo turístico y habitacional cada vez más importante, por lo que resulta de suma importancia el estudio de la reincorporación de las aguas residuales a la laguna, que en la actualidad no posee más tratamiento que el proceso de filtrado desde las cámaras sépticas hacia la napa de agua inmediatamente inferior.

En lo que respecta al cuerpo de agua en sí, la zona norte se corresponde con pendientes pequeñas, mientras sobre las márgenes restantes los gradientes topográficos son mucho más pronunciados. Las profundidades máximas registradas rondan los 9 metros, y a unos 18 kilómetros al norte de Miramar, como se puede apreciar en la batimetría del año 2006 de la Figura 2.2. Se remarca que la laguna sufre de ciclos húmedos y secos, por lo que los niveles varían de año a año.

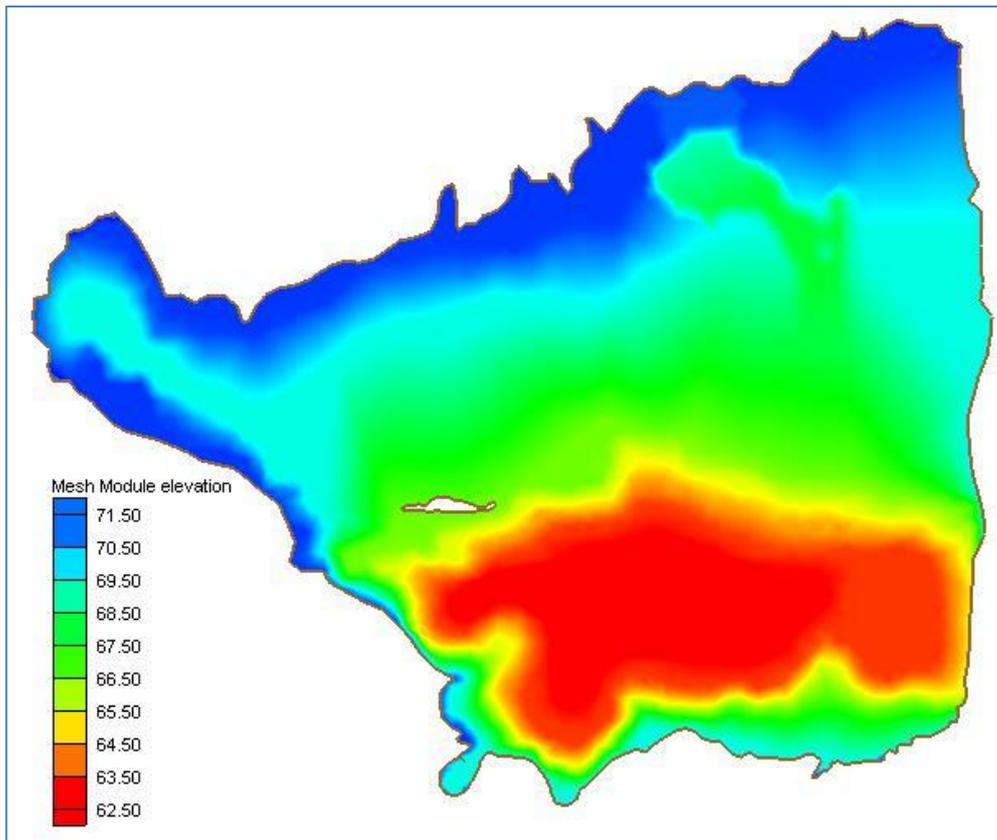


Figura 2.2 Batimetría de la Laguna Mar Chiquita. Cecilia Pozzi (2006)

El viento predominante es el proveniente del Norte. Con una intensidad media de 5 m/s, genera junto a los flujos de entrada un campo de velocidades del orden de 0,10 m/s en el que se pueden apreciar dos celdas principales de circulación, una en sentido horario ubicada en la franja este de la laguna, y otra en sentido antihorario, con eje en la Isla del Mistolar, en la franja centro-oeste de la laguna. Se observan también patrones de circulación paralelos a la costa muy marcados debido al efecto de la condición de borde. Además, esta circulación provoca un elevamiento de la superficie del agua en la costa sur, que se va atenuando hacia el norte hasta tal punto que existe un retroceso de la costa, como se ve en la Figura 2.3.

Por otro lado el viento sur, con intensidades del mismo orden, genera los mismos efectos pero en sentido contrario, por lo que a costa norte presenta un elevamiento y la costa sur un retroceso, lo que podemos apreciar en la Figura 2.4.

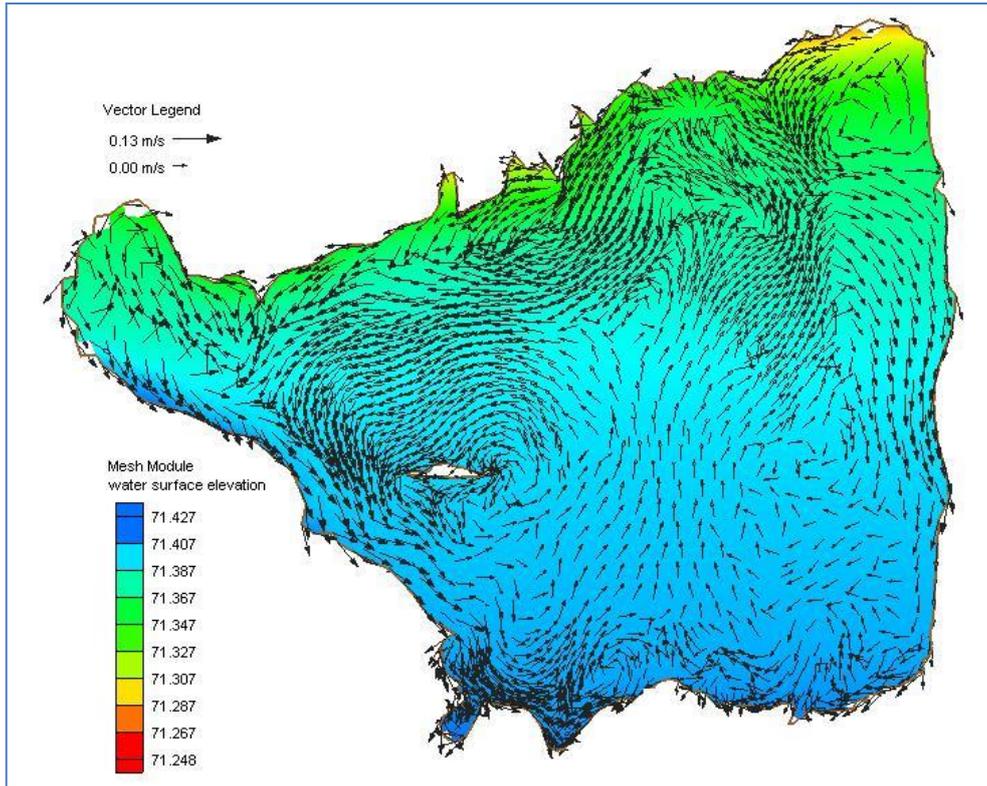


Figura 2.3 Campo vectorial de velocidades para el viento norte. Cecilia Pozzi (2006)

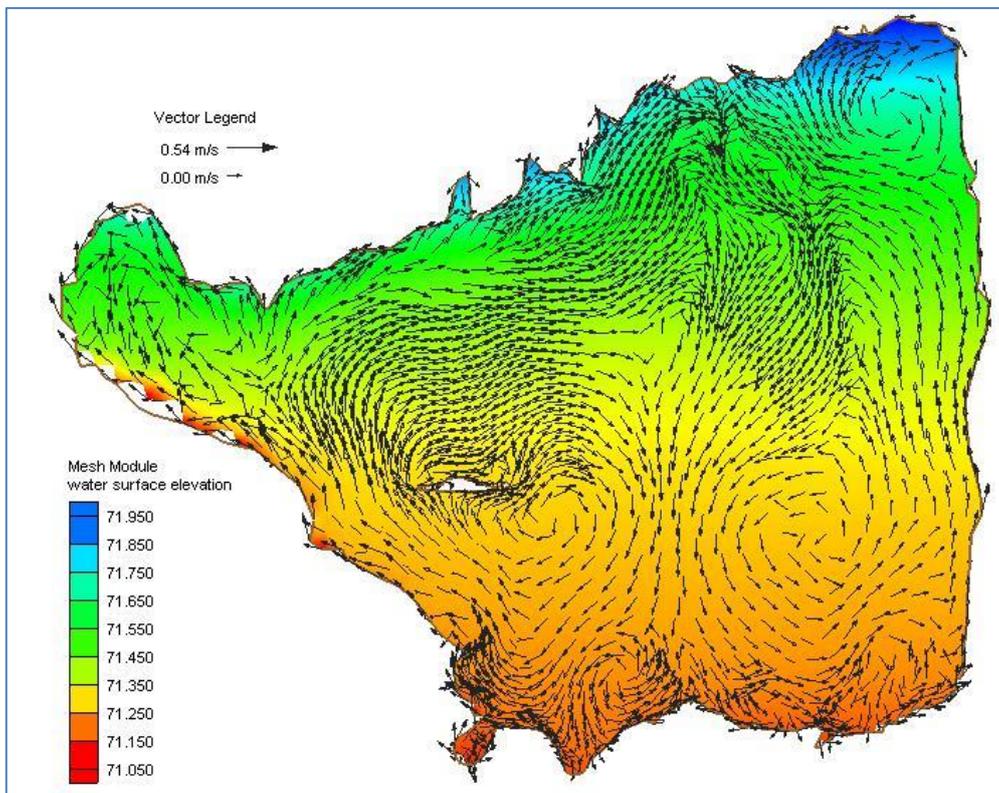


Figura 2.4 Campo vectorial de velocidades para el viento sur. Cecilia Pozzi (2006)

La laguna se caracteriza por su alto nivel de salinidad, comparable con la de los mares (de ahí su nombre), del orden de 28 gramos por litro de agua, lo que le confiere una densidad media aproximada de 1.022 kilogramos por metro cúbico. Debido a su poca profundidad el fenómeno de estratificación es despreciable, por lo que puede suponerse un gradiente de densidad lineal entre el fondo y la superficie.

### 2.3. Localidades a servir

Como se ha mencionado anteriormente, las cuatro ciudades para las cuales se proyectará la obra de saneamiento, localizadas en la Figura 2.5, serán:

- Miramar - ( $30^{\circ} 55' S$ ,  $62^{\circ} 40' O$ , elevación: 71 m)
- Balnearia - ( $31^{\circ} 00' S$ ,  $62^{\circ} 39' O$ , elevación: 87 m)
- Marull - ( $30^{\circ} 59' S$ ,  $62^{\circ} 49' O$ , elevación: 91 m)
- La Para - ( $30^{\circ} 53' S$ ,  $63^{\circ} 00' O$ , elevación: 92 m)



Figura 2.5 Localidades a servir. Imagen Satelital – Google Earth.

La zona se caracteriza por un evidente perfil turístico debido a su oferta natural y paisajística, por lo que el número total de habitantes crece rápidamente en la temporada diciembre-febrero (junto a la dotación media por persona y por hora), como así también los fines de semana largos.

Sin lugar a dudas el caudal de diseño del emisario será proporcional a la población del a abastecer, calculada para año futuro propuesto según la obra y el tipo de polo habitacional. Para este trabajo se cuenta con los Censos Nacionales de los años 1991, 2001 y 2010 de cada una, y se estimó la población turística en base a los hospedajes, cabañas y hoteles de la zona.

### 2.3.1. Período de Proyecto

El plazo de previsión del proyecto del emisario es el tiempo en años durante el cual el mismo podrá verter el caudal de diseño de manera eficiente y segura, variando fundamentalmente con el tipo y grado de desarrollo de la comunidad.

En este caso, se preverá un período de proyecto de 30 años, contados a partir del último **Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas**, del año 2010.

### 2.3.2. Población Futura

Como se ha mencionado con anterioridad, se estimará el número de habitantes a servir para el año 2040. Para hacerlo se procede a utilizar el método de crecimiento a interés compuesto:

$$P_f = P_a x (1 + r)^n$$

Donde **P<sub>f</sub>** es la población futura a calcular; **P<sub>a</sub>** es la población actual; **r** es la tasa de crecimiento; **n** el período de diseño (30 años).

El valor de la tasa **r** no es otra cosa que un promedio de tasas intercensales:

$$r_i = \left( \frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{1/m} - 1$$

Donde  $r_i$  es la tasa intercensal del período  $i$ ;  $P_{i+1}$  es la población en el período  $i+1$ ;  $P_i$  es la población del período  $i$ ;  $m$  es la cantidad de años transcurridos entre el período  $i$  y el período  $i+1$ .

Los Censos Nacionales de los años 1991, 2001 y 2010 realizados en cada una de las localidades se resumen en la Tabla 2.1. Aplicando lo visto, los índices intercensales y promediados se muestran en la Tabla 2.2, y los valores de población futura en la Tabla 2.3.

Localidad	Población (INDEC 1991)	Población (INDEC 2001)	Población (INDEC 2010)
Marull	1404	1765	1799
La Para	2263	3021	3489
Miramar	1800	1979	2012
Balnearia	4783	5585	6171

Tabla 2.1 Habitantes de las localidades. INDEC 1991, 2001 y 2010.

Localidad	Tasas intercensales		Tasa promedio
	relación 91/01	relación 01/10	
Marull	0,0231	0,0021	0,0126
La Para	0,0293	0,0161	0,0227
Miramar	0,0095	0,0018	0,0057
Balnearia	0,0156	0,0111	0,0134

Tabla 2.2 Tasas intercensales y promediadas.

Localidad	Población futura
Marull	2622
La Para	6846
Miramar	2385
Balnearia	9196

Tabla 2.3 Población futura por localidad

Sumando a estos valores una población turística estimada en 2.000 habitantes en base a la actual máxima más un porcentaje del 50% para prever la situación futura, la población futura será:

$$P_f = 23.048 \text{ habitantes}$$

### 2.3.3. Caudal de Proyecto

El caudal cloacal de diseño se calcula en este caso a partir de la dotación de agua por habitante y día, mediante la siguiente fórmula:

$$Q_c = 0,80xQ_a$$

Donde  $Q_c$  es el caudal cloacal de diseño; **0,80** representa un factor de corrección para tener en cuenta que no todo el caudal de agua suministrada termina en la red cloacal;  $Q_a$  es el caudal de agua suministrada a la población.

Por su parte, este caudal de agua debe ser el caudal horario pico del día de mayor consumo, y se calcula como sigue a partir de la dotación media anual:

$$Q_a = \alpha_1 x \alpha_2 x D x P_f$$

Donde  $\alpha_1$  es un coeficiente que permite pasar del consumo medio anual al consumo medio diario del día de mayor consumo (toma valores entre 1,2 y 1,5);  $\alpha_2$  es un coeficiente que permite pasar del consumo medio del día de máximo consumo al consumo máximo horario del día de mayor consumo (toma valores entre 1,3 y 1,6);  $D$  representa la dotación media anual de agua potable suministrada;  $P_f$  es la población futura, al año de 2040.

Del producto entre los coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  resulta un nuevo coeficiente,  $\alpha$ , que en forma general permite pasar del consumo medio anual al consumo máximo horario del día de máximo consumo, que es el que debe tenerse en cuenta. Varía entre 1,56 y 2,4.

De esta manera, el caudal de agua residual será:

$$Q_c = 0,80 Q_a = 0,80 \times 1,8 \times 350 \frac{\text{litros}}{\text{hab. día}} \times 23.048 \text{ hab}$$

Donde **1,8** es el coeficiente  $\alpha$  previamente mencionado, **350 litros por habitante y por día** es la dotación típica supuesta en asentamientos de este tipo en situación de verano y **23.048 la población futura** calculada anteriormente. Con estos valores:

$$Q_c = 11.616.332 \frac{\text{litros}}{\text{día}} = 0,14 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

El caudal evidentemente es bajo respecto de los calculados para otros emisarios más importantes, como lo es el de Mar del Plata, que se han verificado con caudales de hasta  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ . En este informe se utilizará, a fin del diseño del emisario, un caudal mínimo de  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ , similar al máximo de cálculo para el emisario de Puerto Madryn presentado en el capítulo anterior

### 3. Capítulo Tercero: Modelo Numérico

#### 3.1. Introducción

El modelo numérico que se utilizará en el presente trabajo es conocido como *Cornell Mixing Zone Expert System* ("CORMIX"), desarrollado en la Universidad Cornell, Estados Unidos, y descrito en detalle por *Jirka, Donoker & Hinton* (1996).

El sistema CORMIX representa una metodología robusta y versátil computarizada para predecir tanto las características cualitativas como cuantitativas de los procesos hidrodinámicos de mezclado, resultantes de las diferentes configuraciones o escenarios de descarga planteados y en una variedad de tipos de ambiente de cuerpos de agua. La metodología ha sido extensamente verificada por los autores a través de la comparación de los resultados de simulaciones con datos de campo y laboratorio. Ha experimentado revisión independiente en procedimientos y publicaciones para *journals* y es igualmente aplicable a un amplio rango de problemas, desde una simple descarga por tubería sumergida dentro de una pequeña corriente con un rápido mezclado en la sección transversal hasta la instalación de un complicado difusor multipuerto en aguas costeras profundamente estratificadas.

#### 3.2. Breve descripción del modelo CORMIX

El programa CORMIX está compuesto por diversos subprogramas, mencionados a continuación:

- a) DATIN: programa de entrada de datos e inicializador de los demás programas;
- b) PARAM: programa que utiliza los datos de input de DATIN para obtener parámetros físicos y escalas de longitud;
- c) CLASS: programa que realiza una clasificación hidrodinámica;

- d) HYDRO: programa que ejecuta una predicción numérica detallada de las características de la pluma del efluente;
- e) SUM: programa que, a partir de la clasificación y predicción, interpreta los resultados, brinda algunas recomendaciones y permite un análisis de sensibilidad.

Por sus requerimientos, CORMIX está escrito en dos lenguajes de programación: *VP-Expert* y *FORTTRAN*. *DATIN*, *PARAM*, *CLASS* y *SUM* están escritos con el primero, mientras que *HYDRO*, si bien también está escrito mediante el *VP-Expert*, utiliza el *FORTTRAN* en el uso de modelos hidrodinámicos denominados *HYDRO1*, *HYDRO2* e *HYDRO3* para el detallado de las características de la pluma. Los resultados son posibles de graficar mediante el programa *CMXGRAPH*, escrito en C++.

Por último encontramos dos programas finales, el *CORJET* y el *FFLOCATR*. Ambos pueden ejecutarse en paralelo y ofrecen un análisis más preciso del campo cercano y del campo lejano, respectivamente.

En la Figura 3.1 se puede observar los subprogramas mencionados y la relación entre los mismos.

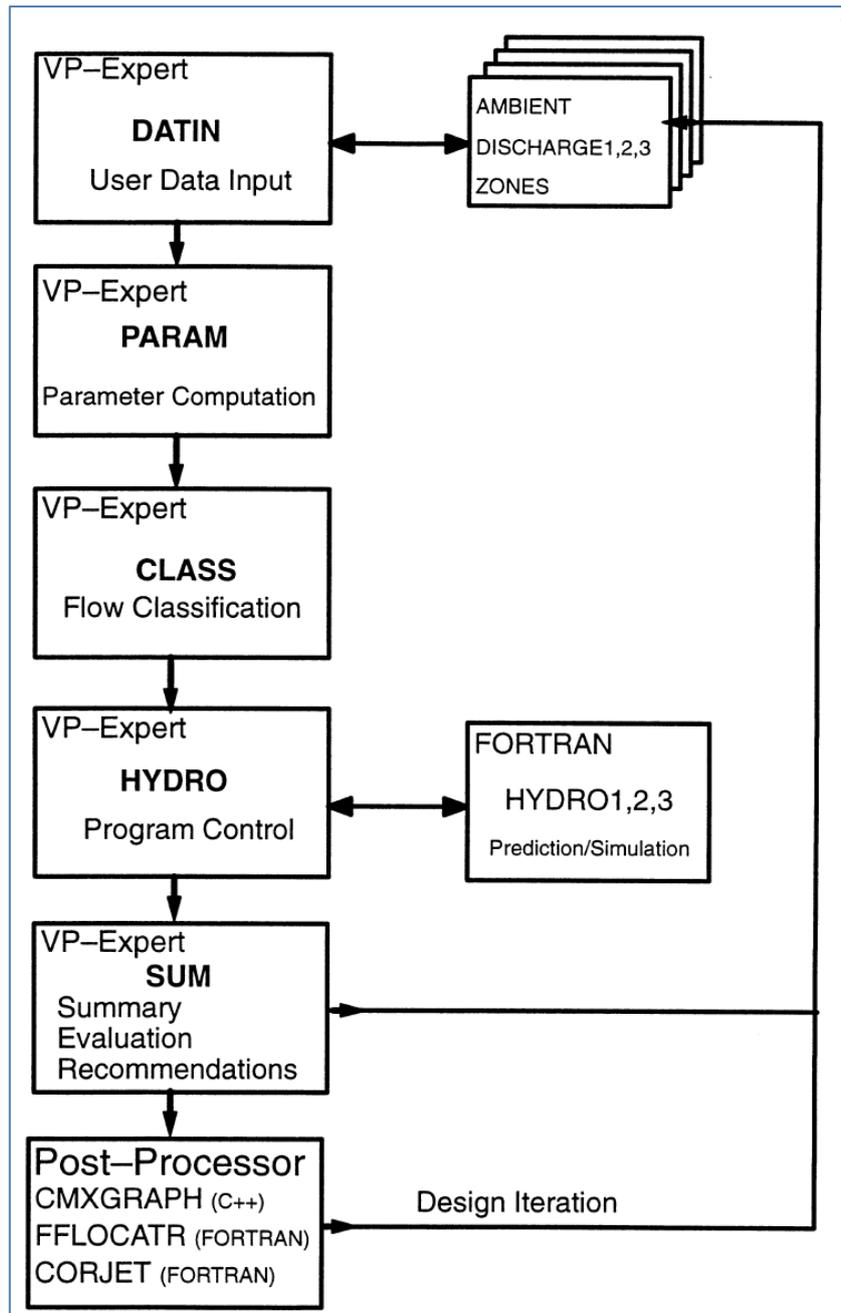


Figura 3.1 Subprogramas del modelo CORMIX. *Jirka, Donoker & Hinton (1996)*

### 3.3. Input del Modelo

El comportamiento de mezclado de cualquier descarga de agua residual está gobernado por la interacción entre las condiciones ambientales del cuerpo de agua receptor y las características de la descarga.

Las condiciones ambientales en el cuerpo de agua son descritas por la geometría y dinámica del mismo, entre los que se puede mencionar su forma en planta, sección

transversal, batimetría, velocidad de flujo, distribución de densidades, velocidad de viento, entre otros.

EL sistema CORMIX se divide en tres subsistemas para el modelado en cuanto a la forma en que el líquido tratado llega al cuerpo receptor:

- CORMIX1, donde se realiza una simulación de descargas sumergidas a través de un puerto único;
- CORMIX2, para descargas sumergidas con difusores de bocas múltiples, y
- CORMIX3, para descarga a superficie libre.

De esta forma, las condiciones de descarga están relacionadas con las características geométricas y de flujo del emisario en sí. Para una descarga de único puerto (CORMIX1) la geometría está dada por el diámetro del puerto, su elevación y orientación. Para difusores tipo multipuerto (CORMIX2) se deberá tener en cuenta, además, con el arreglo de los puertos individuales a lo largo de la línea difusora, la orientación y longitud del difusor, entre otros. Por último, para descargas superficiales (CORMIX3) la sección transversal y su orientación respecto del flujo del cuerpo receptor son muy importantes.

Asimismo, la descripción del tipo de efluente se basa en su caudal, densidad, concentración y tipo de contaminante (Conservativo, No Conservativo, con Carga Térmica o Sedimento). Por último es posible definir una zona, denominada Zona de Mezcla, donde se pueden estipular ciertos parámetros en cuanto a la concentración máxima permitida. De esta manera, el *Output* del programa contendrá avisos para remarcar la coordenada en la cual se ha llegado a dichos valores.

Es de señalar que la descarga superficial (CORMIX3) no se tendrá en cuenta en este análisis, ya que se busca un emisario que descargue dentro de la laguna y a una cierta profundidad, evitando de esta forma la contaminación en las inmediaciones de la costa sur de la laguna o un emisario suspendido (ya que una descarga tipo CORMIX3 también incluye tuberías al nivel de la superficie de agua, no del todo sumergido).

Por lo anterior mencionado solo se hablarán de las descargas tipo CORMIX1 y CORMIX2. La eficiencia del primero es menor que la del segundo, debido a que éste

último no es otra cosa que la suma de varias bocas distribuidas por donde el efluente escapa con menores caudales, con la evidente ventaja de presentar una mancha más amplia y, a priori, capaz de dispersar más rápido el contaminante.

### 3.4. Diseño del emisario

Se plantean a continuación los parámetros básicos en cuanto al diseño de la descarga para CORMIX1 y para CORMIX2, que serán utilizados y valorados en el capítulo siguiente.

#### 3.4.1. Parámetros de diseño para CORMIX1

Se deberán definir, como se ve en la Figura 3.2, los siguientes parámetros:

- Velocidad media del cuerpo receptor ( $U_a$ )
- Profundidad media al fondo del cuerpo receptor (HA)
- Densidad del cuerpo receptor ( $\rho_a$ )
- Ancho entre costas (BS)
- Distancia a la costa más cercana (DISTB)
- Coordenadas (X, Y, Z) de la boca
- Diámetro de la boca (D)
- Velocidad de salida por la boca ( $U_0$ )
- Coeficiente de contracción de la boca ( $C_0$ )
- Altura del puerto ( $h_0$ )
- Diferencia inicial de densidades entre el efluente y el cuerpo receptor ( $\Delta\rho_0$ )
- Ángulo horizontal entre el eje del puerto y el vector de velocidad media del cuerpo receptor ( $\sigma$ )
- Ángulo vertical entre el eje del puerto y el fondo ( $\theta$ )

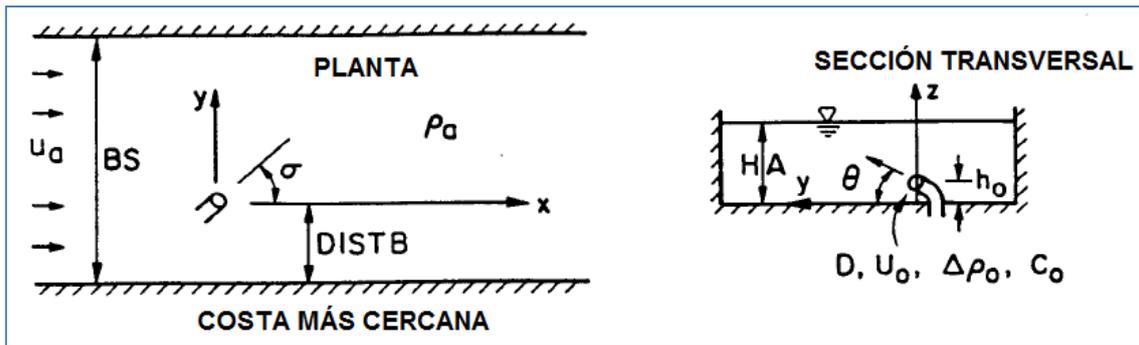


Figura 3.2 Diagrama de variables para CORMIX1. *Jirka, Donoker & Hinton (1996).*

### 3.4.2. Parámetros de diseño para CORMIX2

Como en el caso anterior, se deberá definir según la Figura 3.3:

- Velocidad media del cuerpo receptor ( $U_a$ )
- Profundidad media al fondo del cuerpo receptor ( $H$ )
- Densidad del cuerpo receptor ( $\rho_a$ )
- Ancho entre costas ( $WS$ )
- Distancia a la costa más cercana ( $DISTB$ )
- Coordenadas ( $X, Y, Z$ ) del centro del difusor
- Longitud del difusor ( $L_D$ )
- Diámetro de las bocas ( $D$ )
- Velocidad de salida por cada boca ( $U_0$ )
- Coeficiente de contracción de las bocas ( $C_0$ )
- Altura de los puertos ( $h_0$ )
- Diferencia inicial de densidades entre el efluente y el cuerpo receptor ( $\Delta\rho_0$ )
- Ángulo horizontal entre el eje del puerto y el vector de velocidad media del cuerpo receptor ( $\sigma$ )
- Ángulo horizontal entre el eje del difusor y el vector de velocidad media del cuerpo receptor ( $\gamma$ )
- Ángulo horizontal entre el eje del difusor y el eje de los puertos ( $\beta$ )
- Ángulo vertical entre el eje del puerto y el fondo ( $\theta$ )

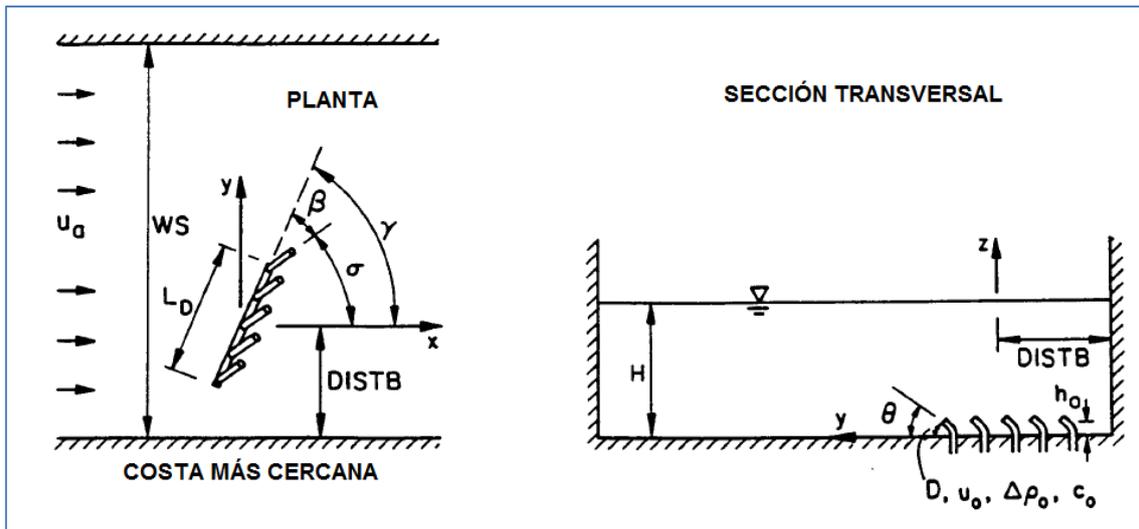


Figura 3.3 Diagrama de variables para CORMIX2. *Jirka, Donoker & Hinton (1996).*

### 3.5. Inconvenientes del Modelo

Las principales desventajas de CORMIX se pueden prever desde la concepción de las variables de input que utiliza. La suposición de velocidad constante a lo largo tanto de todo el cuerpo de agua como así también en su altura obliga a trabajar con velocidades medias que no representan la situación real. De la misma manera sucede con las profundidades, que sin duda varían (recordar la batimetría de la Figura 2.2), se debe optar por seleccionar la local en el punto de descarga para todo el desarrollo de la pluma. De forma análoga, otros parámetros se ven afectados por las mismas condiciones: coeficiente de Manning, velocidad de viento y densidades (aunque es posible definir hasta tres casos de estratificación). En general todas estas simplificaciones hacen que el modelo no sea del todo preciso a la hora de estimar el Campo Lejano de la pluma contaminante (si bien se recuerda que CORMIX ha sido ensayado y ajustado en reiteradas oportunidades).

Por otro lado, las simplificaciones de las variables que intervienen en el Campo Cercano, como por ejemplo suponer que todas las bocas tienen los mismos diámetros, direcciones ya establecidas, mismas alturas, mismas distancias entre dos puertos contiguos, entre otros, son el resultado de una facilidad técnica en cuanto a la construcción del emisario y difusor en sí, por lo que es propio de la realidad y la precisión es la necesaria.

### 3.6. Análisis de datos

Las características del flujo están dadas por el caudal de la descarga, su momentum y su flotabilidad. La relación entre estos caudales permite rápidamente clasificar el flujo en distintas zonas (por ejemplo, prever cuándo se comporta como jet y cuándo comienza a hacerlo como pluma). A su vez, los parámetros propios del cuerpo de agua receptor y de diseño del difusor en cuestión permiten realizar una clasificación en cuanto al comportamiento de la mancha. A continuación se presentan las escalas de longitudes usadas en los subsistemas CORMIX1 y CORMIX2, y una lista de las clases de flujo de ambos.

#### 3.6.1. Escalas de longitud para CORMIX1 y CORMIX2

- Escala de longitud de la transición jet/plume:  $L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2}$

Interpretación: para un flujo combinado jet/plume, es la distancia en la cual la transición entre el jet y la pluma toma lugar, en ambiente uniforme y estacionario.

- Escala de longitud de la transición jet/crossflow:  $L_m = M_0^{1/4} / U_a$

Interpretación: cuando se tiene un flujo cruzado (crossflow), la distancia de la penetración transversal por encima de la cual el jet es fuertemente deflectado (advechado) por el flujo cruzado.

- Escala de longitud plume/crossflow:  $L_b = J_0 / U_a^3$

Interpretación: es la distancia más allá de la cual la pluma es fuertemente advechada por el flujo cruzado.

- Escala de longitud jet/stratification:  $L_m' = M_0^{1/4} / \varepsilon^{1/4}$

Interpretación: en un ambiente estacionario linealmente estratificado, es la distancia a la cual el jet es fuertemente afectado por la estratificación, provocando la formación de una capa con un flujo horizontal.

- Escala de longitud plume/stratification:  $L_b' = J_0^{1/4} / \varepsilon^{3/8}$

Interpretación: en un ambiente estacionario linealmente estratificado, es la distancia a la cual la pluma es fuertemente afectada por la estratificación, provocando la formación de una capa con un flujo horizontal.

Notas:

$M_0 = U_0 Q_0$ , flujo cinemático de momentum

$J_0 = g'_0 Q_0$ , flujo de flotabilidad cinemática

$Q_0 = U_0 a_0$ , flujo volumétrico de la descarga

$a_0$  = área del puerto

$U_a$  = velocidad del cuerpo receptor

$U_0$  = velocidad de descarga (en el puerto)

$E$  = gradiente de densidad en el cuerpo receptor

$g'_0 = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$ , flotabilidad de la descarga

### 3.6.2. Categorías de Clase de Flujos

Los subsistemas CORMIX1 y CORMIX2 están compuestos por 66 clases de flujo. Para cada una de ellas se presentan más abajo los diagramas de clasificación que el programa sigue según varios parámetros para su selección:

#### CORMIX1 – 35 clases de flujo:

Clases S: flujos atrapados en capa con estratificación lineal (Figura 3.4)

Clases V, H: flujos de flotabilidad positivas en capa de densidad uniforme (Figura 3.5)

Clases NV, NH: flujos de flotabilidad negativa en capa de densidad uniforme (Figura 3.6)

Clases A: flujos afectados por el fondo (Figura 3.7)

CORMIX2 – 31 clases de flujo:

Clases MS: flujos atrapados en capa con estratificación lineal (Figura 3.8)

Clases MU: flujos de flotabilidad positiva en capa de densidad uniforme (Figura 3.9)

Clases MNU: flujos de flotabilidad negativa en capa de densidad uniforme (Figura 3.10)

Según sea la clase de flujo prevista, el desarrollo de la pluma en espacio-tiempo tendrá lugar bajo distintas formas, denominadas MODS (Modelos). Para cada MOD se presentan diversas fórmulas a aplicar para el cálculo de los parámetros más importantes para el estudio:

- Coordenadas de la línea central;
- Dilución;
- Concentración;
- Espesor;
- Ancho;
- Tiempo acumulado desde el origen de la descarga.

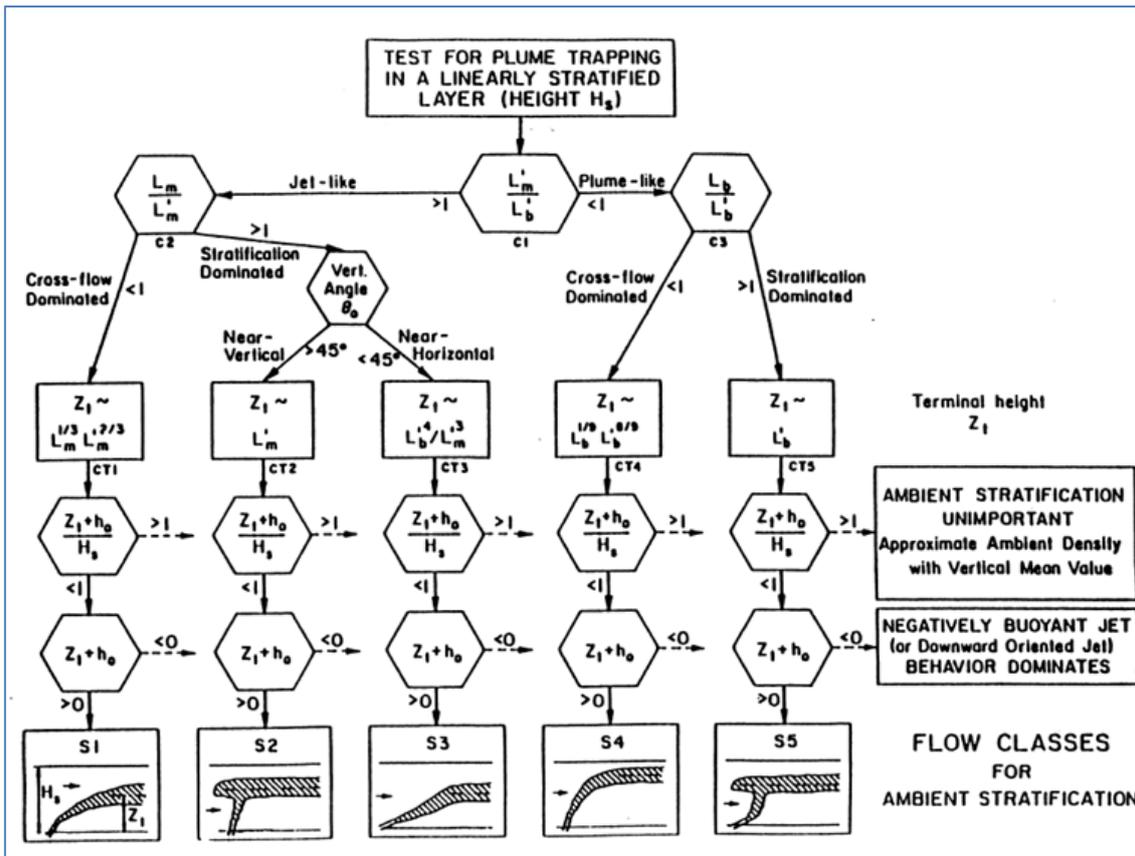


Figura 3.4 Diagrama de clases de flujo S. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

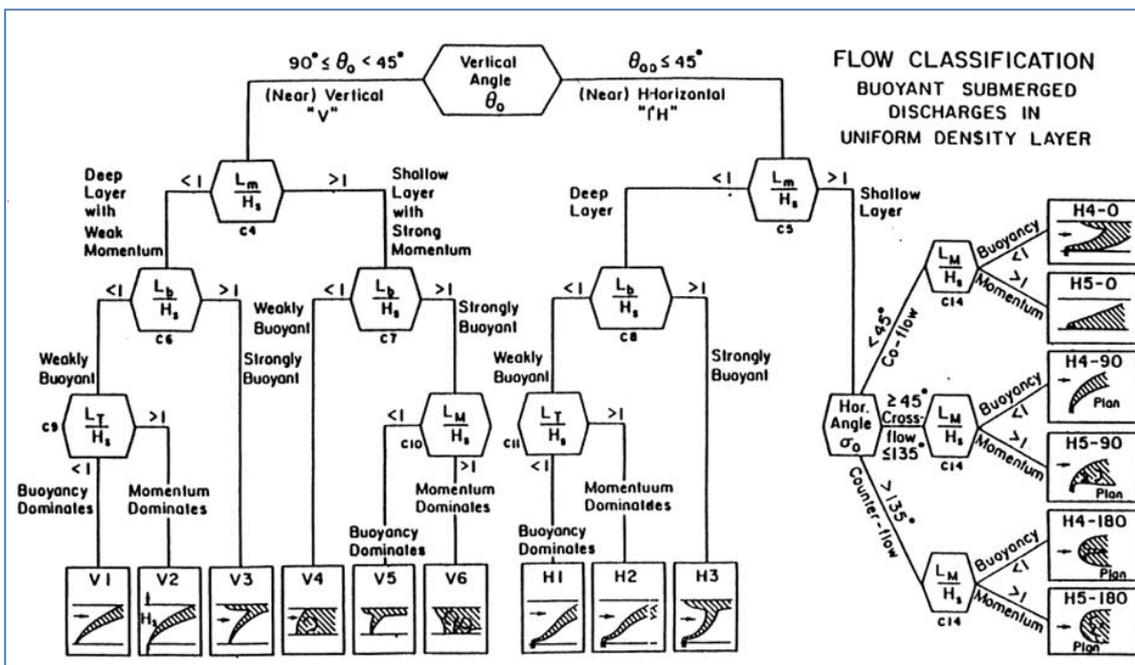


Figura 3.5 Diagrama de clases de flujo V y H. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

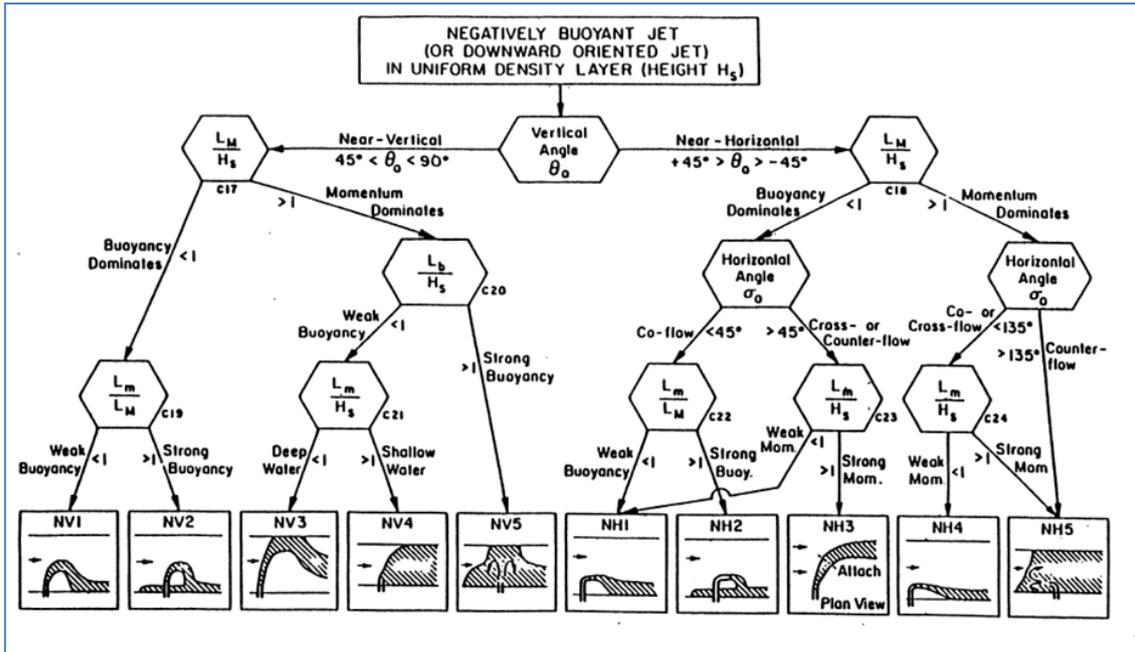


Figura 3.6 Diagrama de clases de flujo NV y NH. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

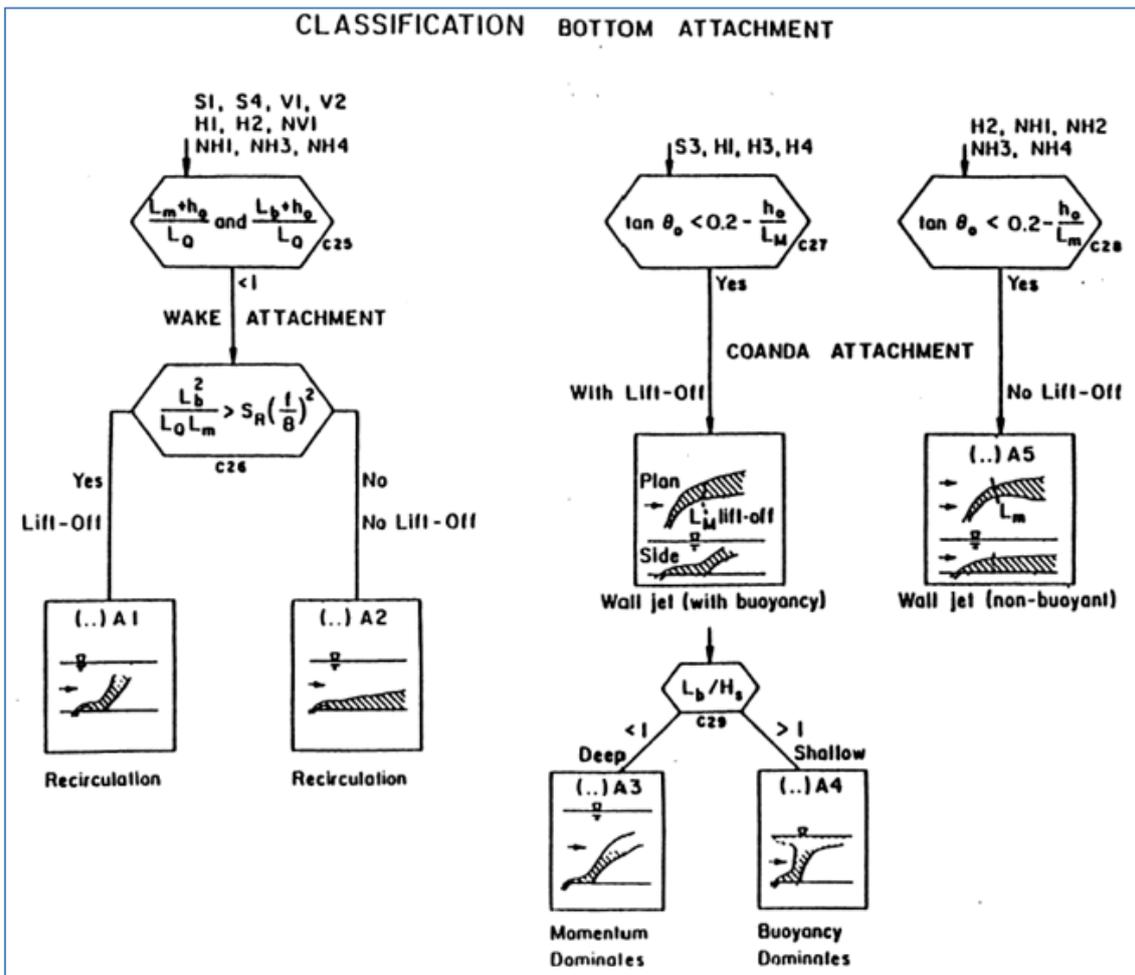


Figura 3.7 Diagrama de clases de flujo A. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

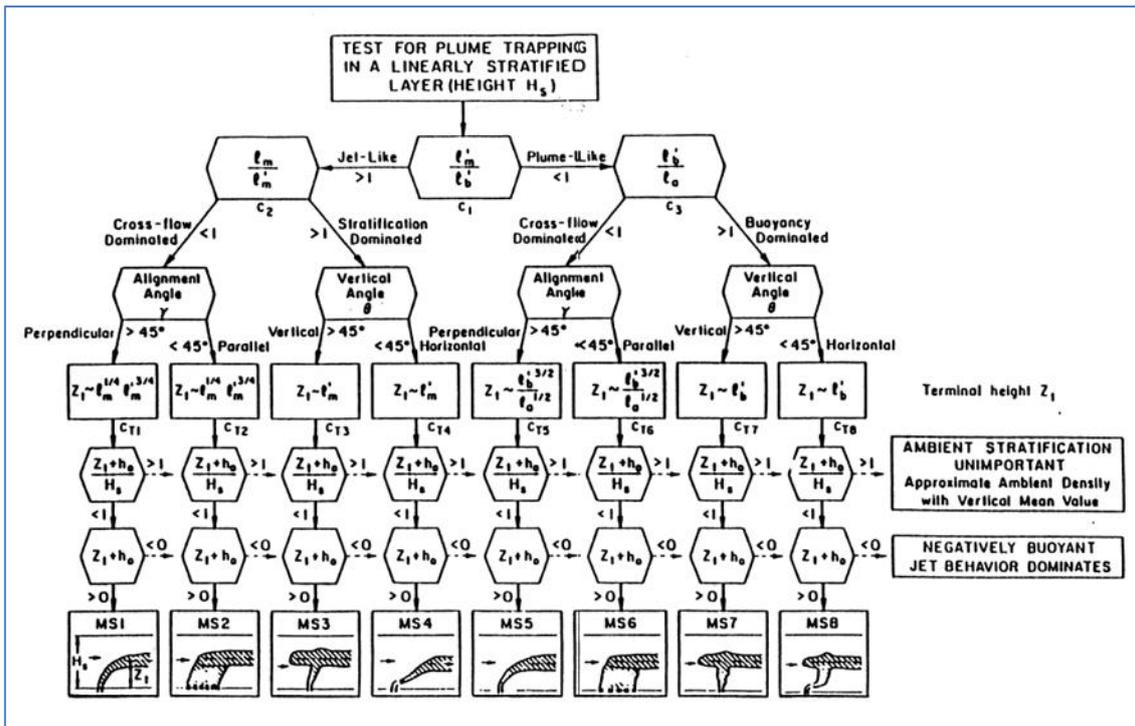


Figura 3.8 Diagrama de clases de flujo MS. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

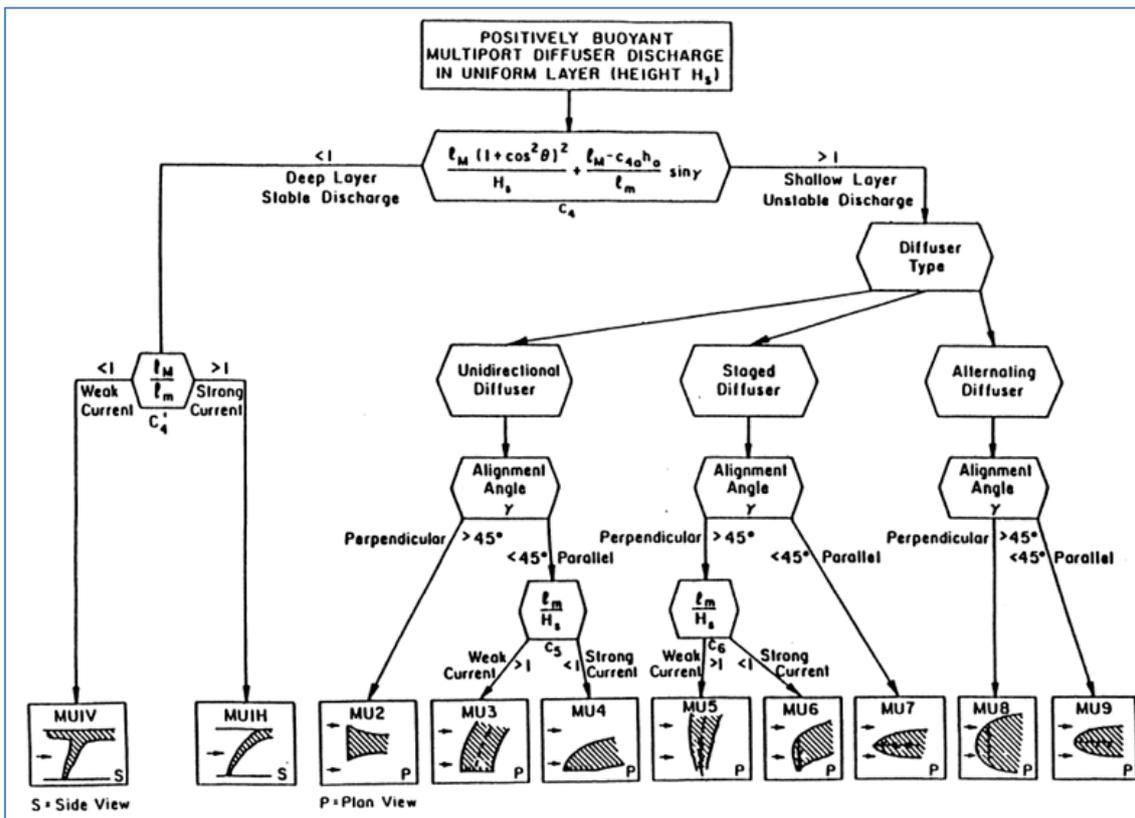


Figura 3.9 Diagrama de clases de flujo MU. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

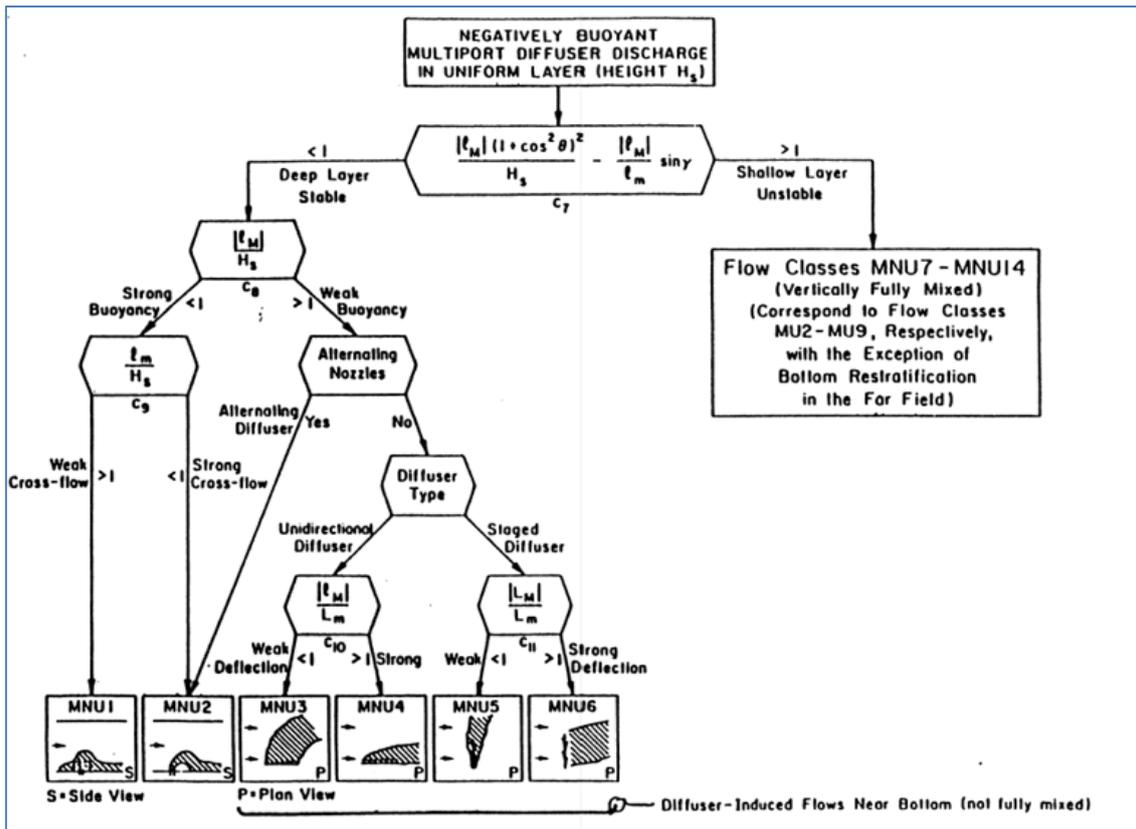


Figura 3.10 Diagrama de clases de flujo MNU. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

### 3.7. Output del Modelo

Luego de que los valores iniciales son definidos, al pasar por los distintos subprogramas, el output de cada uno de ellos se resume en una serie de cuatro archivos:

- Sesion Report, donde se resume los parámetros de input del usuario;
- Flow Class Description, donde se clasifica el flujo según las escalas de longitudes;
- Prediction File, donde se muestra mediante tablas parámetros como dilución, concentración y algunas medidas geométricas de la mancha, para cada uno de los MODS, tanto en Campo Cercano (Near Field) como Campo Lejano (Far Field);

- Design Recommendations, donde se ofrece al usuario una serie de recomendaciones en cuanto al diseño del emisario en sí.

## 4. Capítulo Cuarto: Modelización

### 4.1. Introducción

En este capítulo se plantearán y definirán aquellos parámetros que, complementados con lo visto en el capítulo segundo de este trabajo, servirán de input para el posterior modelado mediante el programa CORMIX. Por otro lado se establecerán diversas alternativas en cuanto al tipo de descarga y, para cada una de ellas, una serie de casos variando el diseño de los elementos constitutivos del emisario en sí.

### 4.2. Parámetros de diseño

Se describen y valoran a continuación parámetros concernientes al tipo de efluente y se discute la ubicación y longitud del emisario más conveniente para el proyecto.

#### 4.2.1. Características del efluente

La densidad típica de un efluente residual domiciliario luego de su paso por una planta de tratamiento es de 995 kilogramos por metro cúbico (Bresicano, 1987). La condición crítica para el diseño de un emisario sería, en lo que respecta a la calidad del agua vertida, que la planta de tratamiento no funcionara con la eficiencia con la cual se diseña, lo que suele suceder y traducir en un aumento de la concentración de la descarga y por lo tanto la de la futura mancha en el cuerpo de agua. En la Tabla 4.1 se muestra la composición típica de aguas residuales.

Constituyente	Concentración [ppm]		
	Alta	Media	Baja
Sólidos totales	1250	700	350
Sólidos Disueltos	850	500	250
Sólidos Volátiles	325	200	105
Sólidos en suspensión	350	200	100
DBO5	350	200	100
DQO	1000	500	250
Nitrógeno (como N)	85	40	20
Nitrógeno orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo total (como P)	16	9	4
Fósforo orgánico	5	3	1
Fósforo inorgánico	11	6	3
Alcalinidad (como CaCO3)	150	100	50
Aceites y grasas	150	100	50

Tabla 4.1 Características del agua residual doméstica. Kiely (1999)

En cuanto a la concentración de coliformes en las mismas, los valores varían entre  $1 \times 10^6$  y  $1 \times 10^8$  por cada 100 mililitros de agua. El coeficiente de decaimiento  $k$  para estas bacterias en aguas saladas toma valores de alrededor de  $10 \text{ día}^{-1}$ , con la consiguiente valorización del parámetro  $T90$  de 5,50 horas (Gyssels et. Al. 2011).

#### 4.2.2. Ubicación, longitud y profundidad del emisario

Por razones geográficas y físicas, en una primera instancia podríamos potencialmente ubicar el origen del emisario en dos puntos costeros estratégicos, visualizados en la Figura 4.1. El primero hacia el Noreste de Miramar, aproximadamente a unos 8 km. El segundo se encontraría cercano a Playa Grande, al Oeste de aquella ciudad y en la costa opuesta.



Figura 4.1 Ubicación de posibles puntos de descarga. Fuente propia

Si bien ubicarlo en un punto casi equidistante entre las cuatro localidades (como lo es en el segundo caso) representa las claras ventajas económicas, esa región forma parte de una zona caracterizada por su alto nivel turístico debido a la presencia de playas y gran biodiversidad. Además, en cuanto a la hidráulica de la región, se tienen fuertes vectores de velocidad paralelos a la costa que llegan a la desembocadura del Río Xanaes y alcanzan las costas de Miramar, movimiento que provoca un flujo opuesto y genera una especie de vórtice, donde el efluente no tendría capacidad para diluirse, como se ha visto en el segundo capítulo, en la Figura 2.3 y en la Figura 2.4, para viento norte y sur, respectivamente.

En el primer punto, en cambio, si bien hay una clara desventaja en cuanto al tendido y longitud de la red cloacal para la captación de líquidos en la planta depuradora, la zona es menos frecuentada, presenta menos biodiversidad y el flujo de agua tiende a escapar de la costa, para ir hacia aguas profundas (centro de la laguna), para viento norte. Mientras, para viento sur, dotando al emisario de suficiente longitud, la mancha no tendería al vórtice que se forma en la costa de Miramar, sino que fluiría hacia el Oeste. En ambos casos se consiguen ventajas en cuanto a la dilución del efluente contaminante.

Por lo último mencionado, y por cuestiones técnicas y comparativas respecto de otros proyectos similares, se estipula una longitud del emisario de 3 km. Se define así, mediante el análisis de la Batimetría presentada en el capítulo segundo de este informe (Figura 2.2) una profundidad aproximada de 8,05 metros hasta el fondo de la laguna.

### 4.3. Resumen de los valores adoptados

Recopilando las variables expuestas tanto en el capítulo segundo como en este mismo, en la Tabla 4.2 se enumeran y valoran a modo de resumen.

Parámetro	Valor
Profundidad (m)	8,05
Corriente ambiente (m/s)	0,10
Viento (m/s)	5,00
Densidad del ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	1022,00
Coeficiente de Manning	0.030
Caudal efluente de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0,25
Densidad del efluente (kg/m <sup>3</sup> )	995,00
Coeficiente de decaimiento (día <sup>-1</sup> )	10,00
T90 (horas)	5,50
Salinidad (g/l)	28,00

Tabla 4.2 Valores adoptados para el modelizado mediante CORMIX

### 4.4. Propuesta de alternativas

Los parámetros de diseño adoptados se incluirán en tres categorías. La primera (Alternativa A) está basada en el subsistema CORMIX1, es decir, emisario con un puerto de salida. Por su parte, la segunda (Alternativa B) lo hace en CORMIX2, emisario con multipuertos de salida, y con única boca por puerto. La última (Alternativa C) también corresponde a un CORMIX2, pero con dos bocas por puerto. En todos los casos se ha trabajado con diámetros cuya relación caudal/área arrojen valores de velocidad de flujo medio en las bocas de salida que, por cuestiones de resistencia de materiales, deben ser menores a 5 metros por segundo, y preferiblemente del orden de 3 metros por segundo.

#### 4.4.1. Alternativa A

Se plantean una serie de valores fijos para esta alternativa en la Tabla 4.3, y una serie 8 casos diferentes, con parámetros variables, en la Tabla 4.4.

Parámetro	Valor adoptado
Longitud del emisario (m)	3000,00
Distancia a la costa más cercana (m)	3000,00
Altura de puerto (m)	1,00
Diámetro de la boca (m)	Variable s/ caso
Ángulo $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Variable s/ caso
Ángulo $\sigma$ ( $^{\circ}$ )	Variable s/ caso

Tabla 4.3 Alternativa A: parámetros adoptados.

Parámetro	Alternativa A - CORMIX 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Valor							
Diámetro de la boca (m)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35	0,35	0,35
Ángulo $\theta$ ( $^{\circ}$ )	90	30	30	30	90	30	30	30
Ángulo $\sigma$ ( $^{\circ}$ )	-	30	90	270	-	30	90	270

Tabla 4.4 Alternativa A: casos planteados.

#### 4.4.2. Alternativa B

Se plantean una serie de valores fijos para esta alternativa en la Tabla 4.5, y una serie 5 casos diferentes, con parámetros variables, en la Tabla 4.6.

Parámetro	Valor adoptado
Longitud del emisario (m)	3000,00
Longitud del difusor (m)	100,00
Distancia a la costa más cercana (m)	3000,00
Altura de puerto (m)	1,00
Contracción de las bocas (adimensional)	1 (redondas)
Número de puertos	5
Diámetro de puertos (m)	Variable s/ caso
Arreglo de los puertos	Variable s/ caso
Ángulo $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Variable s/ caso
Ángulo $\sigma$ ( $^{\circ}$ )	Variable s/ caso
Ángulo $\beta$ ( $^{\circ}$ )	Variable s/ caso
Ángulo $\gamma$ ( $^{\circ}$ )	90

Tabla 4.5 Alternativa B: parámetros adoptados.

Alternativa B - CORMIX 2				
1	2	3	4	5

Parámetro	Valor				
	Diámetro de la boca (m)	0,25	0,25	0.35	0.35
Ángulo $\theta$ (°)	90	30	90	30	-
Ángulo $\sigma$ (°)	-	0	-	0	-
Ángulo $\beta$ (°)	-	90	-	90	-
Arreglo de los puertos	Unidireccional	Unidireccional	Unidireccional	Unidireccional	Alternada, misma dirección

Tabla 4.6 Alternativa B: casos planteados.

#### 4.4.3. Alternativa C

Se plantean una serie de valores fijos para esta alternativa en la Tabla 4.7, y una serie 8 casos diferentes, con parámetros variables, en la Tabla 4.8.

Parámetro	Valor adoptado
Longitud del emisario (m)	3000,00
Longitud del difusor (m)	50,00
Distancia a la costa más cercana (m)	3000,00
Altura de puerto (m)	1,00
Contracción de las bocas (adimensional)	1 (redondas)
Número de bocas	10 (2 por puerto)
Diámetro de las bocas (m)	Variable s/ caso
Ángulo interno (°)	180
Ángulo $\gamma$ (°)	90

Tabla 4.7 Alternativa C: parámetros adoptados.

Parámetro	Alternativa C - CORMIX 2		
	1	2	3
Diámetro de la boca (m)	0,15	0,25	0,10

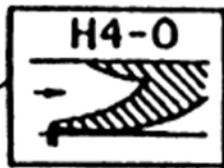
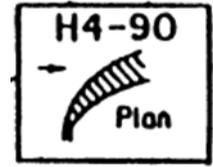
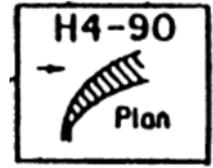
Tabla 4.8 Alternativa C: casos planteados.

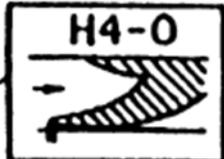
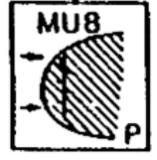
## 4.5. Resultados

Los resultados del modelo CORMIX se sintetizan en la Tabla 4.9 a través de las principales características de cada una de las alternativas, donde:

- La primera columna representa cada alternativa;
- La segunda columna representa la clase de flujo según el análisis de los parámetros utilizados y las longitudes características registradas.
- La tercera columna hace la distinción entre el Campo Cercano (*Near Field - NF*) y el Campo Lejano (*Far Field – FF*);
- La cuarta columna representa el MOD obtenido por el programa, por el cual se calculará el desarrollo de la pluma, según sea Campo Cercano o Lejano;
- La quinta y sexta columna representan la Concentración **C** y la Dilución **S**, respectivamente, en la línea central de la pluma, al final de cada MOD;
- La séptima y octava columna representan la distancia aguas abajo y el tiempo transcurrido desde el origen (difusor), es decir, en forma acumulada;
- La novena columna describe la evolución de la pluma según la clase de flujo mediante un diagrama básico desarrollado por CORMIX.

Se aclara que para todos los casos se ha usado una longitud máxima de estudio de 4000 metros aguas abajo. De esta manera se han conseguido anchos medios de la pluma menores a 1000 metros, por lo que la distancia entre la costa y este límite de la pluma es de alrededor de 2000 metros (recordar que la longitud del emisario es de 3000 metros), ya que se supone el flujo paralelo a la costa (como lo hace CORMIX) y la verificación se debe hacer a los 500 metros de la costa. Es inútil comparar valores de concentración en este punto, por lo que los valores consignados en la tabla siguiente son solo a fines comparativos entre las alternativas, y luego se corroborará lo estipulado en el Decreto 847, presentado en el primer capítulo de este trabajo.

Alternativa	Descripción	Campo	MOD	C [mg/l]	S	Distancia [m]	Tiempo [s]	Resultado
A-1	V5	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	22600000	4,4	0,29	2	
			132	13000000	7,5	15,81	157	
		Lejano	141	312	3132,2	4000	3999	
A-2	H4-0	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	10800000	9,3	7,35	5	
			131	8270000	12,1	9,51	8	
			155	5230000	19,1	10,9	15	
		Lejano	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	
A-3	H4-90	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	13200000	7,5	0,82	4	
			131	9560000	10,4	1,43	7	
			155	2070000	47	26,23	230	
			158	1920000	48	72,03	688	
		Lejano	141	281	3480	4000	39967	
A-4	H4-90	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	13200000	7,5	0,82	4	
			131	9560000	10,4	1,43	7	
			155	2070000	47	26,23	230	
			158	1920000	48	72,03	688	
		Lejano	141	281	3480	4000	39967	
A-5	V5	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	27400000	3,6	0,37	2	
			132	15900000	6,2	14,59	144	
		Lejano	141	314	3108,5	4000	39998	

Alternativa	Descripción	Campo	MOD	C [mg/l]	S	Distancia [m]	Tiempo [s]	Resultado
A-6	H4-0	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	14100000	7,1	6,31	5	
			131	9910000	10,1	8,32	9	
			155	4270000	23,4	12,41	29	
		Lejano	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	
A-7	H4-90	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	17100000	5,8	0,86	5	
			131	11300000	8,8	1,66	8	
			155	2260000	43	25,37	220	
		156	2160000	43,3	47,38	440		
Lejano	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR			
A-8	H4-90	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	17100000	5,8	0,86	5	
			131	11300000	8,8	1,66	8	
			155	2260000	43	25,37	220	
		156	2190000	43,3	47,38	440		
Lejano	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR			
B-1	MU8	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			234	325000	307,2	-	-	
			234a	308000	313,5	29,48	295	
		Lejano	241	234	4169,5	3999,9	40000	
B-2	MU2	Cercano	201	100000000	1			
			271	330000	286,3	50	483	
		Lejano	241	241	4060,1	4000	39983	

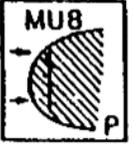
Alternativa	Descripción	Campo	MOD	C [mg/l]	S	Distancia [m]	Tiempo [s]	Resultado
B-3	MU8	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			234	326000	307,2	-	-	
			234a	308000	313,5	29,49	295	
		Lejano	241	234	4169,5	4000	40000	
B-4	MU2	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			271	325000	284,2	50	491	
		Lejano	241	241	4055,1	4000	39991	
B-5	MU8	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			234	326000	307,2	-	-	
			234a	308000	313,5	29,49	295	
		Lejano	241	234	4169,3	4000	40000	
C-1	MU8	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			234	623000	160,6	-	-	
			234a	583000	168,5	17,14	171	
		Lejano	241	255	3827,5	4000	40000	
C-2	MU1H	Cercano	101	100000000	1	-	-	
			110	4320000	23,1	2,61	12	
			235	3050000	3207	4,26	28	
		Lejano	241	291	3362,7	40000	39986	
C-3	MU8	Cercano	201	100000000	1	-	-	
			234	623000	160,6	-	-	
			234a	582000	168,3	17,7	172	
		Lejano	241	255	3827,6	4000	40000	

Tabla 4.9 Comparación de alternativas

## 4.6. Análisis y selección de alternativas

En primer lugar se descartan las alternativas A-2, A-6, A-7 y A-8 (todas descargas mediante puerto único), debido a que el modelo CORMIX encuentra en el desarrollo de las plumas saltos hidráulicos internos y flujos recirculatorios que no pueden ser simulados por la presencia de una alta inestabilidad (notar que en la Tabla 4.9 estas alternativas presentan un mensaje de "ERROR" para los MOD de Campo Lejano).

En cuanto a los órdenes de magnitud de Concentraciones y Diluciones vemos que no varían mucho de alternativa a alternativa, estando entre los  $2 \times 10^2$  y  $3 \times 10^2$  para el primer parámetro, y  $3 \times 10^3$  y  $4 \times 10^3$  para el segundo, en el Campo Lejano y a 4.000 metros aguas abajo.

Para cuando termina el Campo Cercano, la magnitud de las Concentraciones y de las Diluciones son de más de un orden de diferencia entre las alternativas A y B (es decir, entre un sistema de un puerto individual y uno con multipuertos) verificando la alta eficiencia de este último diseño en cuanto a la difusión inicial en esta zona, donde el modelo CORMIX tiene mayor versatilidad en cuanto a la predicción de la evolución de la pluma.

Las alternativas B-2 y B-4 (descargas mediante multipuertos con una boca por puerto, con MOD MU2) presentan plumas que necesitan recorrer el doble de distancia (o tiempo) para alcanzar los mismos valores de Concentración y Dilución al final del Campo Cercano que las alternativas B-1, B-3 y B-5 (descargas mediante multipuertos con una boca por puerto, con Modo MU8). De esta manera se descartarán las dos primeras.

Por su parte, las alternativas C-1, C-2 y C-3 (descargas mediante multipuertos con dos bocas por puerto) no representan mayores ventajas respecto de las B-1, B-3 y B-5, y el arreglo de dos bocas por difusor no justifica técnicamente su utilización, por lo que serán descartadas.

Por último se propone una solución sencilla según las alternativas B-1 o B-3 (descargas multipuerto con dos bocas por puerto, donde la única diferencia entre ambas es el diámetro de las bocas de salida), para evitar soluciones tipo alternadas que llevan más trabajo en su instalación y no representan grandes ventajas para el

caso tratado, donde la velocidad de flujo del cuerpo receptor es baja (0,1 m/s), profundidades relativamente bajas (7,05 m) y el caudal efluente es pequeño (0,25 m<sup>3</sup>/s).

#### 4.7. Análisis de sensibilidad – Alternativa B -1

La Guía para el Diseño de Emisarios Submarinos, del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento publicado por la Comisión Nacional del Agua (México, 2007) brinda ciertas recomendaciones a tener en cuenta y resumidas en la Tabla 4.10.

Tubería principal del emisor	
1	Velocidad del flujo en el emisor: $0.60 \text{ m/s} < V_e < 5.00 \text{ m/s}$
2	Profundidad de la descarga $> 15,00$ metros
Difusor	
3	Longitud del difusor $> 0.03 L_e$ (longitud del emisario)
4	Velocidad del difusor: $0.60 \text{ m/s} < V_d < 5.00 \text{ m/s}$
5	Área total de boquillas: $n \cdot A_b < 0.75 A_e$ (n = núm. De boquillas y $A_e$ área del emisario)
6	Separación de boquillas: $Y/3$
7	Diámetro de cada boquilla $> 0.075 \text{ m}$
8	Velocidad de salida $< 5.00 \text{ m/s}$

Tabla 4.10 Recomendaciones de diseño. Guía para el Diseño de Emisarios Submarinos (México, 2007)

Se llevará a cabo este análisis según dos variables: cantidad de puertos (N) y diámetro de las bocas ( $\Phi$ ). Además, asegurando una velocidad de salida próxima a los 3 m/s, es de notar que ambas variables no son independientes. Por otro lado, se mantendrá una distancia entre puertos de 5 metros, por lo que es posible obtener la Longitud del Difusor de diseño para cada caso.

De esta manera se conforma la Tabla 4.11, donde se propone un total de 14 alternativas. Denominando D al diámetro adoptado; A la sección equivalente; V la velocidad de flujo para un puerto individual; N el número de bocas adoptado; Q' el caudal por boca; V' el caudal por boca; L<sub>D</sub> la longitud del difusor; nA<sub>boca</sub> el producto entre el número de bocas y el área de las mismas, a fin de compararlo con el 75% del

área del emisario en sí, igual a  $0,126 \text{ m}^2$  (supuesto para mantener una velocidad media de  $2 \text{ m/s}$ , siguiendo las recomendaciones mexicanas antes expuestas). Por último se determina una cantidad de 9 casos posibles (teniendo en cuenta una variación del 10% del área del emisario) y descartando los 5 restantes. Los casos seleccionados son modelados en CORMIX y comparados en la Tabla 4.12.

En esta última tabla podemos observar que prácticamente no hay diferencias en cuanto la concentración y dilución tanto al final del Campo Cercano como del Campo Lejano. Por otro lado todas las plumas corresponden a la misma clase de flujo con un MOD MU8 y se desarrollan de manera similar, por lo que **se opta por la alternativa más eficiente en cuanto a su implementación técnica y construcción, la D-5, con 10 bocas de diámetro 0,10 metros y longitud del emisario de 50 metros.**

CASOS	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	
D	0.075				0.100				0.125			0.150			
A	0.004				0.008				0.012			0.018			
V	56.617				31.847				20.382			14.154			
N bocas	15	20	25	30	10	15	20	25	7	10	15	5	10	15	
Q'	0.017	0.013	0.010	0.008	0.025	0.017	0.013	0.010	0.036	0.025	0.017	0.050	0.025	0.017	
V'	3.774	2.831	2.265	1.887	3.185	2.123	1.592	1.274	2.912	2.038	1.359	2.831	1.415	0.944	
L <sub>D</sub>	70.000	95.000	120.000	145.000	50.000	70.000	95.000	120.000	30.000	45.000	70.000	20.000	45.000	70.000	
nAboca	0.066	0.088	0.110	0.132	0.079	0.118	0.157	0.196	0.086	0.123	0.184	0.088	0.177	0.265	
0.75Aemisario	0.094														

Tabla 4.11 Análisis de sensibilidad en cuando a diámetros y número de bocas de salida.

Alternativa	Campo Cercano				Campo Lejano			
	Dilución	Concentración	Distancia (m)	Tiempo (s)	Dilución	Concentración [mg/L]	Distancia (m)	Tiempo (s)
D-1	226.50	430000	22.01	220	3970.70	246	4000.00	40000
D-2	299.00	324000	28.21	282	4137.10	236	4000.00	40000
D-3	371.30	259000	34.51	345	4296.80	227	4000.00	40000
D-5	153.90	638000	16.06	161	3789.70	257	4000.00	40000
D-6	226.70	430000	22.09	221	3971.00	246	4000.00	40000
D-9	110.00	895000	12.71	127	3665.50	266	4000.00	40000
D-10	154.30	636000	16.22	162	3790.30	257	4000.00	40000
D-12	79.40	1240000	10.22	102	3556.80	274	4000.00	40000
D-13	153.80	638000	16.01	160	3789.50	258	4000.00	40000

Tabla 4.12 Comparación entre los casos posibles seleccionados.

## 4.8. Evolución de la pluma contaminante

Los parámetros usados como solución final son presentados en la Tabla.4.13.

Parámetro	Valor
Profundidad (m)	8,05
Corriente ambiente (m/s)	0,10
Viento (m/s)	5,00
Densidad del ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	1022,00
Coeficiente de Manning	0.030
Caudal efluente de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0,25
Densidad del efluente (kg/m <sup>3</sup> )	995,00
Coeficiente de decaimiento (día <sup>-1</sup> )	10,00
T90 (horas)	5,50
Salinidad (mg/l)	28,00
Longitud del emisario (m)	3000,00
Longitud del difusor (m)	45,00
Distancia a la costa más cercana (m)	3000,00
Altura de puerto (m)	1,00
Contracción de las bocas (adimensional)	1 (redondas)
Número de puertos	5
Diámetro de puertos (m)	0.10
Ángulo $\theta$ (°)	90
Ángulo $\gamma$ (°)	90

Tabla 4.13 Parámetros de la alternativa final

Modelando nuevamente la pluma mediante el CORMIX, la pluma de dispersión resultante es del tipo MU8, característica de un flujo con flotabilidad positiva en un ambiente débilmente estratificado y de aguas poco profundas, prevaleciendo el momentum del efluente y resultando una descarga hidrodinámicamente inestable, mezclada en toda la columna de agua, punto desde el cual termina el campo cercano y comienza el campo lejano, influenciado por la dirección de la corriente del cuerpo receptor, como se puede ver en la Figura 4.2.

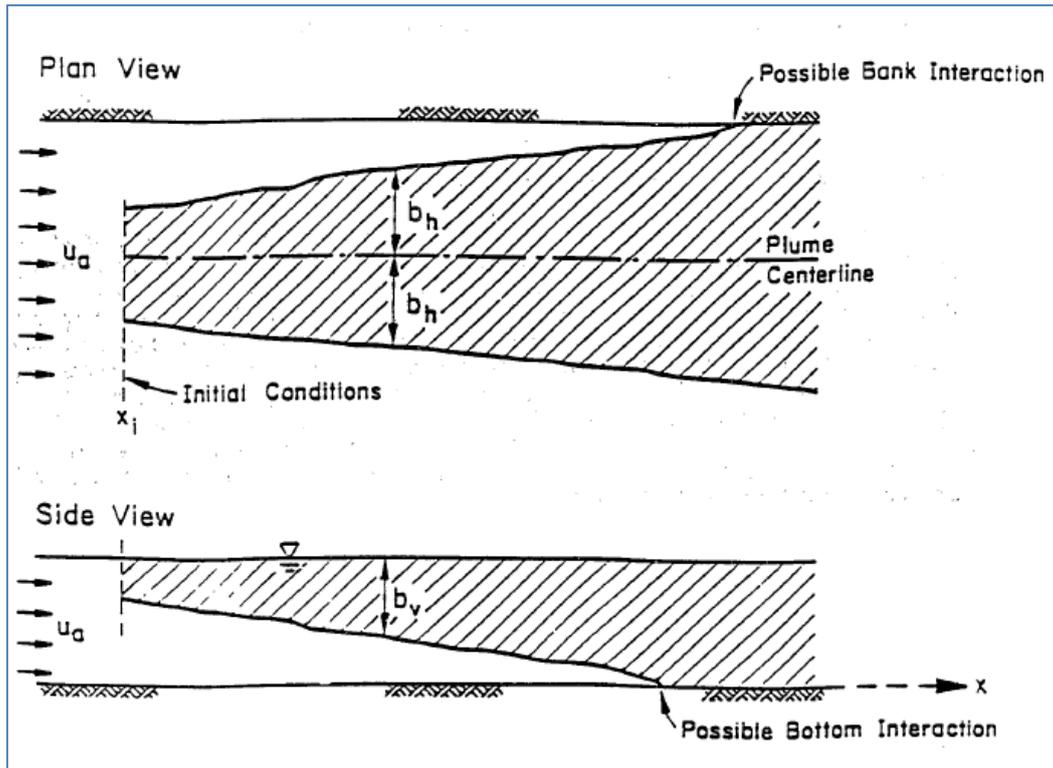


Figura 4.2 Campo Lejano para MU8. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

Es de destacar que los MODS usados por el programa no permiten obtener isolíneas de concentración, debido a que se usan volúmenes de control para campo cercano y dispersión por flotabilidad para campo lejano. En ambos casos, los parámetros de Concentración  $C$  y de Dilución  $S$  resultan del promedio de la sección, representada por el ancho medio  $B_h$  y por la profundidad media  $B_v$ , como se puede ver en la Figura 4.3. Evidentemente en la realidad se espera una concentración mayor en la línea central y una disminución de este parámetro hacia las direcciones perpendiculares a la misma.

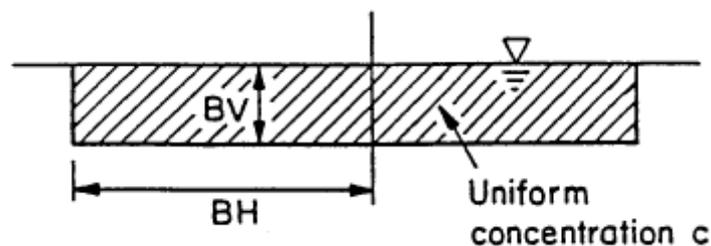


Figura 4.3 Perfil de concentraciones para flujos de clase 234 y 241. Jirka, Donoker & Hinton (1996).

A continuación se grafican los resultados obtenidos del modelo. La Figura 4.4 representa las características de la pluma en el Campo Cercano (*Near Field*), mientras que la Figura 4.5 lo hace en el campo lejano (*Far Field*).

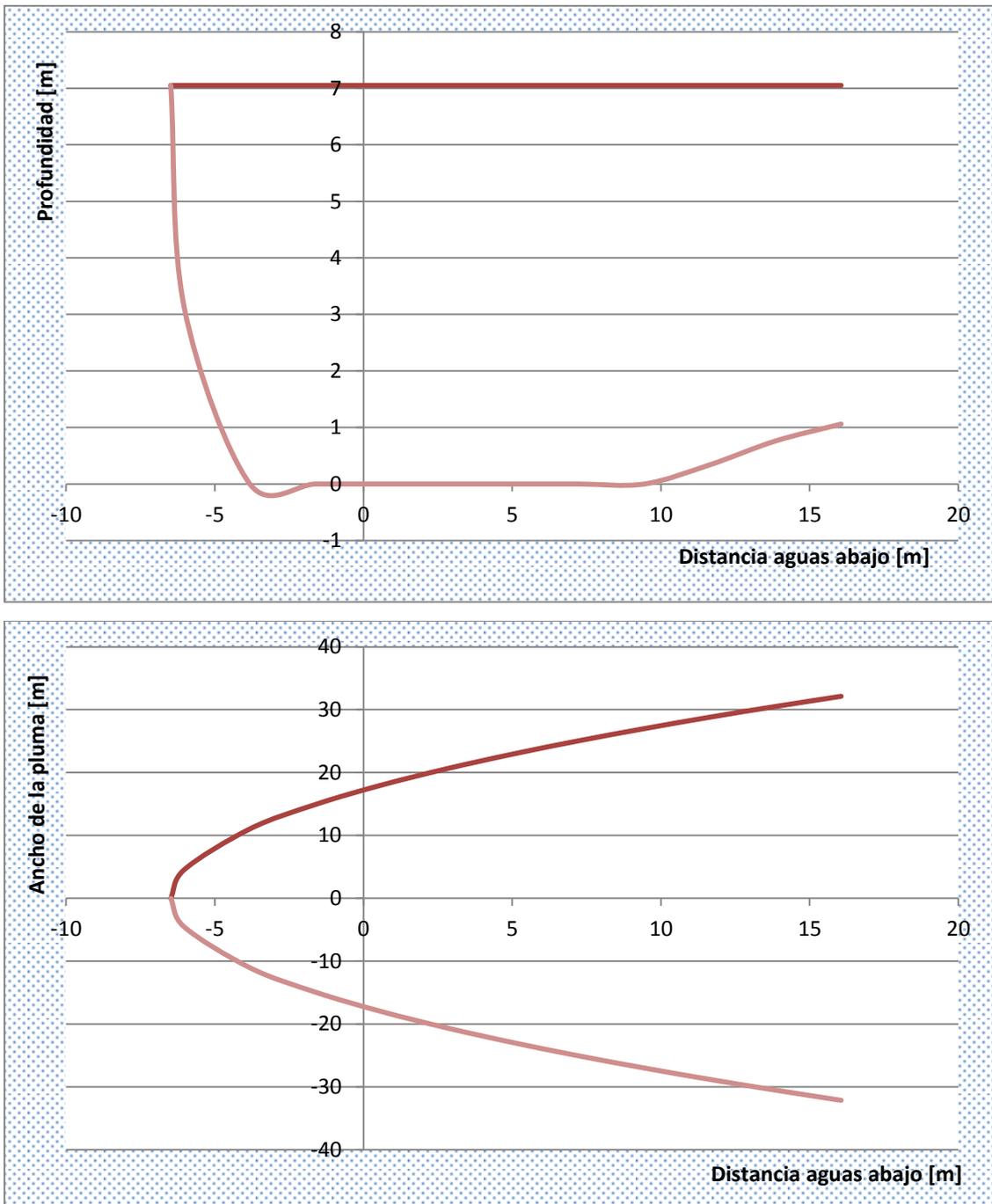


Figura 4.4 Pluma en el Campo Cercano. Arriba se puede observar el corte longitudinal, mientras que abajo está representada en planta.

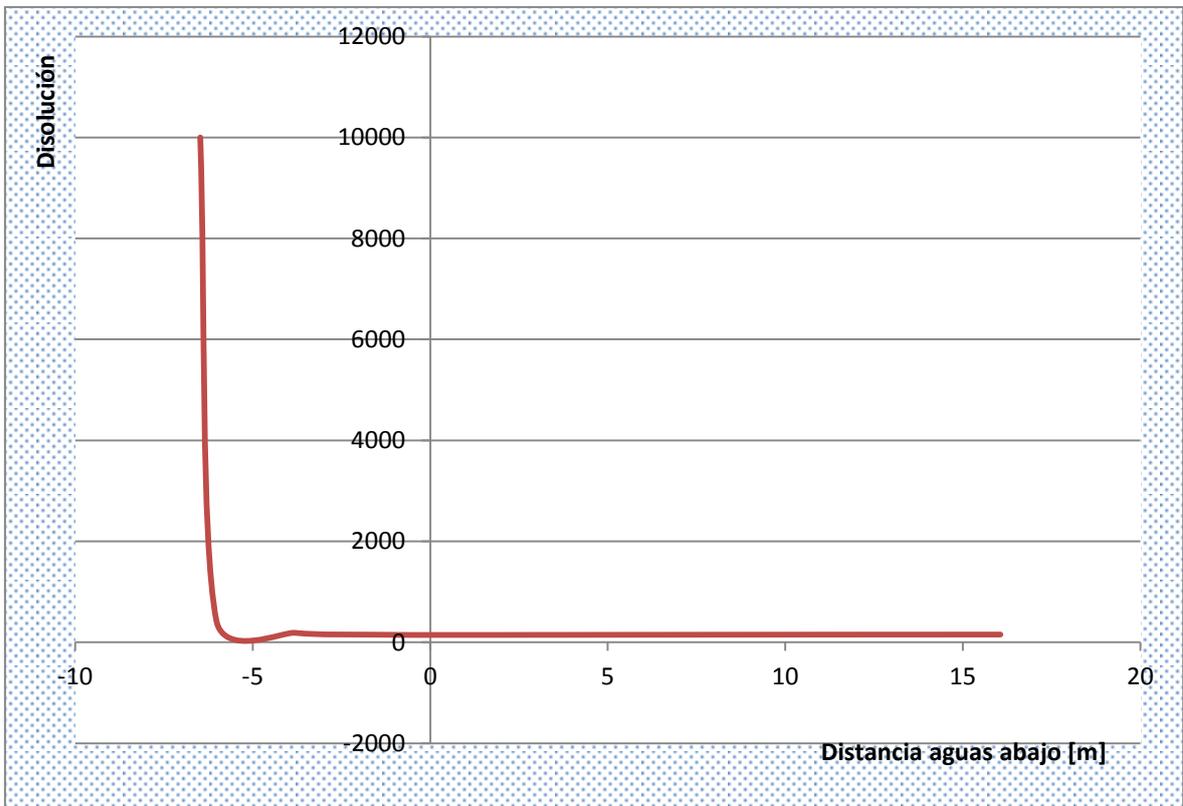
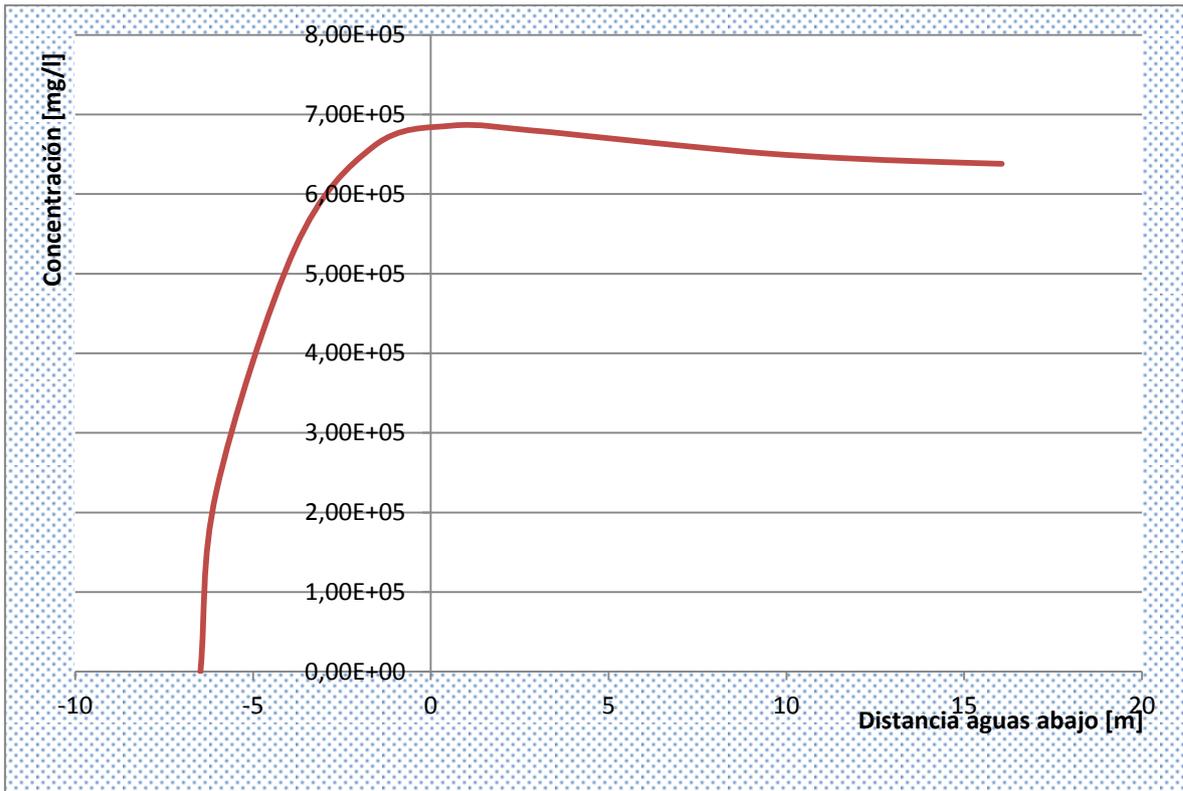


Figura 4.4 Pluma en el campo cercano (continuación). Arriba y abajo están representadas las Concentraciones y las Diluciones respecto de la distancia aguas abajo, respectivamente.

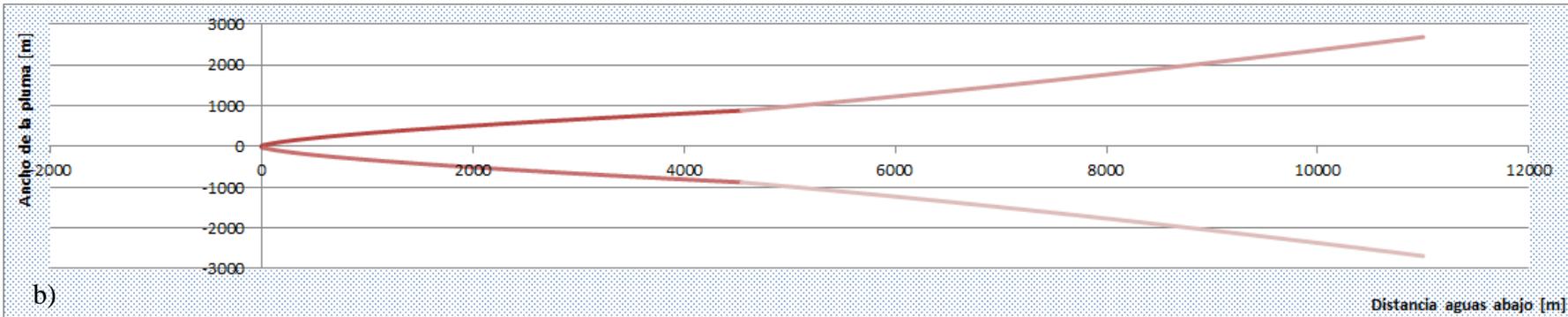
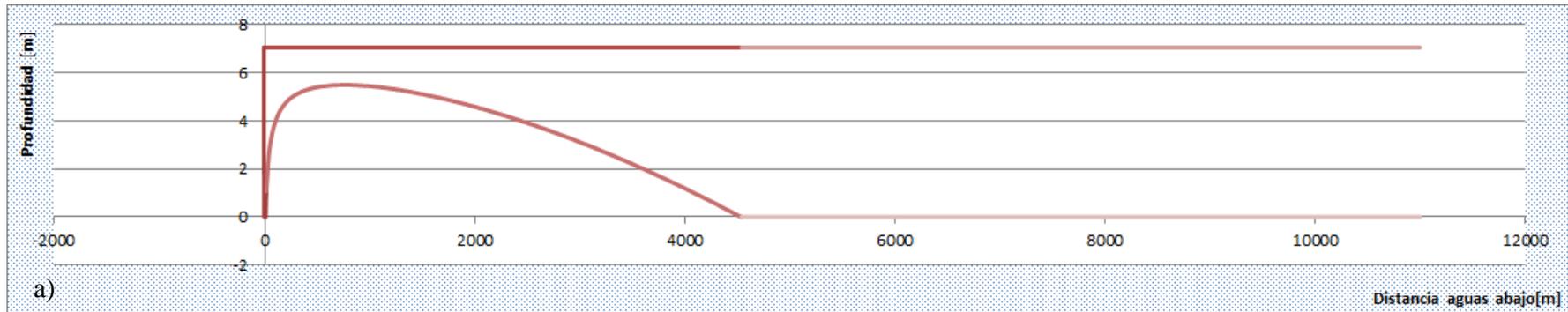


Figura 4.5 Pluma en el Campo Lejano. a) Corte longitudinal; b) Vista en planta;

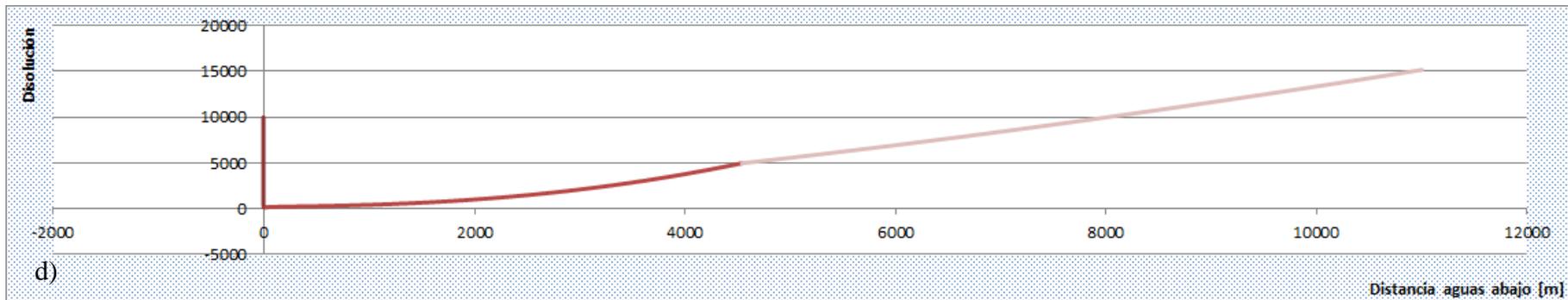
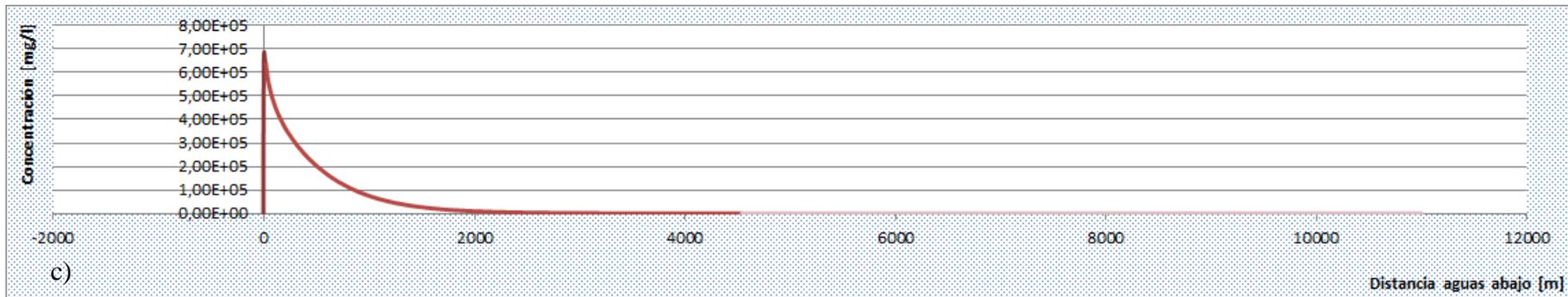


Figura 4.5 (Continuación) Pluma en el Campo Lejano. c) Concentración vs Distancia aguas abajo; d) Dilución vs Distancia aguas abajo.

De la Figura 4.4 y la Figura 4.5 anteriores podemos concluir:

- a) El Campo Cercano culmina aproximadamente a los 16 metros aguas abajo, con una concentración cercana a los  $6,50 \times 10^5$  miligramos por litro y una dilución de 150;
- b) El Campo Lejano comienza al finalizar en anterior con un ancho medio de 65 metros y una profundidad de 6 metros, la pluma se desarrolla hasta tocar el fondo a una distancia de 4500 metros aguas abajo, alcanzando un ancho de 1600 metros, una concentración de 105 miligramos por litro y una dilución de 5000. **Ya en este punto se cumplen con las condiciones estipuladas por el Decreto 847 de la provincia, teniendo en cuenta el límite fijado para la verificación de 500 metros desde la costa;**
- c) La concentración se torna despreciable y la dilución crece rápidamente desde el punto anterior hasta los 11 kilómetros establecidos como distancia de control.

Por último, asumiendo los vectores de velocidad de la laguna paralelos a la costa (como supone el modelo CORMIX), con dirección y sentido hacia la localidad de Miramar, podemos imaginar la línea central de la mancha advectada con origen en el difusor y desarrollo según los vectores antes mencionados. Un caso más representativo de la realidad sería advectar la mancha según el campo de velocidades de la Figura 2.3 para viento norte y según el propio de la Figura 2.4 para viento sur, vistas en el segundo capítulo. Las tres situaciones se superponen en una imagen satelital de la costa sur de la laguna Mar Chiquita en la Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8, respectivamente.

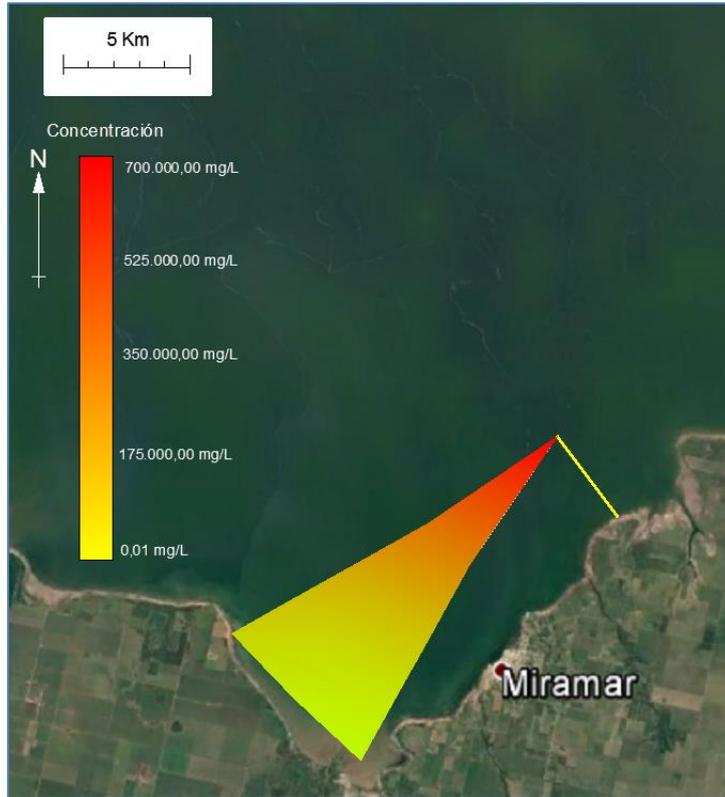


Figura 4.6 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para el modelo CORMIX, con viento sur.

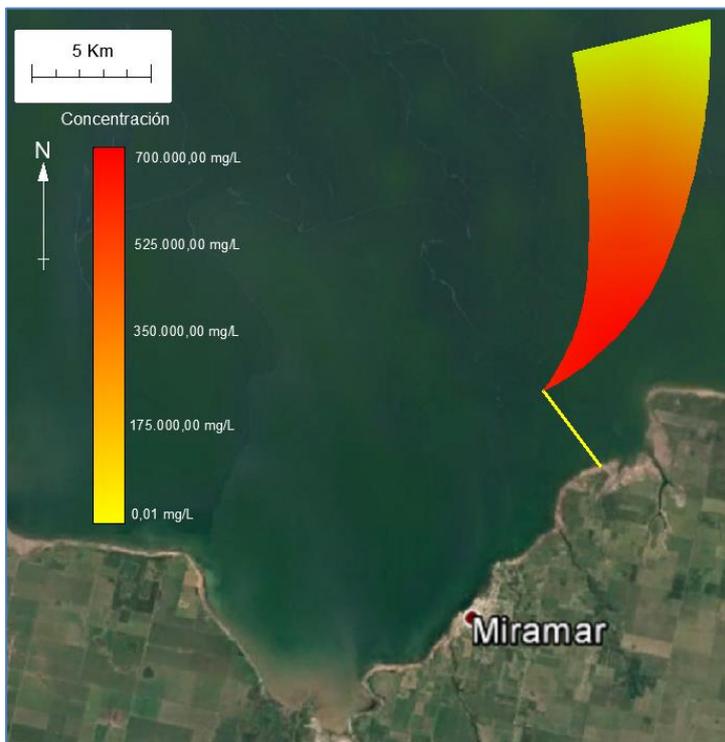


Figura 4.7 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para viento norte.

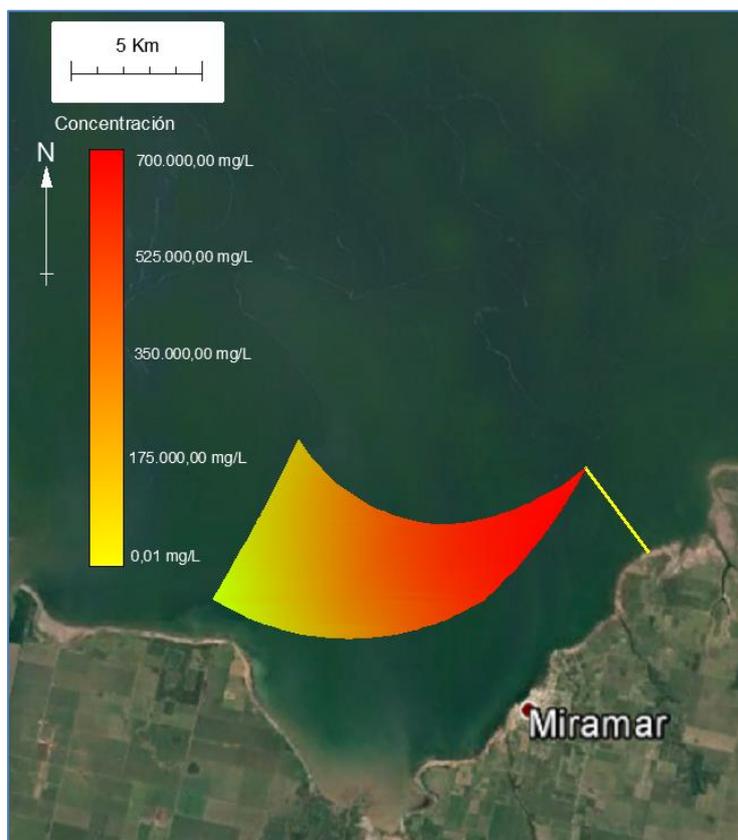


Figura 4.8 Superposición de la mancha sobre imagen satelital para viento sur.

Sin lugar a dudas la situación más desfavorable es la supuesta por el CORMIX, es decir, flujo paralelo a la costa (Figura 4.6). De cualquier modo, 4.500 metros aguas abajo se logran concentraciones por debajo de las admisibles según el Decreto 847 de la Provincia de Córdoba. La distancia a la costa es elevada, alrededor de los 2.500 metros, distancia excesiva en lo que se refiere al control de calidad de aguas para baño. Es por este motivo que se podría corregir la longitud del emisario, con la consiguiente economía de diseño. Sin embargo, el hacerlo sería disminuir la profundidad en la cual la pluma es capaz de dispersarse en el Campo Cercano, por lo que la concentración se estima que aumentaría. En este trabajo no se ha intentado realizar esta evaluación debido a que el programa usado presenta inconvenientes en la definición de la mancha para el Campo Lejano, y se recomienda el uso de modelos más sofisticados para lograr mayor precisiones.

## 5. Capítulo Quinto: Conclusiones

### 5.1. Sobre la importancia de la calidad de aguas

Todos los usos posibles del agua suponen un impacto específico en los recursos hídricos. El uso doméstico, industrial y agrario del agua genera grandes cantidades de residuos para los cuales las vías fluviales naturales constituyen conductos de eliminación “baratos” y siempre disponibles. En ríos y lagos, las aguas residuales de algunos usuarios pueden convertirse en el abastecimiento de agua de otros, y el proceso de tratamiento de agua antes y después de su consumo resulta fundamental para la sociedad moderna.

Los recursos hídricos también se ven afectados de manera indirecta por la relación tierra-agua: el uso de suelo para la construcción, agricultura, la repoblación forestal, la deforestación y la lixiviación de los residuos de los vertidos influyen en su naturaleza.

Todos estos factores mencionados hacen variar a la calidad del medio acuático, modificando sus condiciones físico-químicas, el estado de la flora y fauna y, principalmente los procesos de consumo directo y actividades humanas indirectas que utilizan el agua como recurso.

En definitiva, la calidad del agua representa un concepto relativo de difícil definición y totalmente cualitativo. No es posible de establecerlo sin antes fijar un individuo que necesite de este fluido y el uso que el mismo le dará particular, ya que el agua puede ser de calidad para algún ser vivo y no para otro, o bien ser de calidad para alguna actividad pero no para otra. De esta forma, y tratando de cuantificar este concepto, se conciben los parámetros físico-químicos y biológicos a través de una extensa gama de bibliografía que cambia no solo de lugar a lugar, sino que muta en el tiempo.

En este trabajo se han utilizado los parámetros estipulados por el Decreto 847 de la Provincia de Córdoba, en correspondencia con la Ley Provincial 10.208, que establece la nueva política ambiental y complementa la de presupuestos mínimos, Ley Nacional 25.675. Es necesario recalcar que la tendencia actual y reflejada en los artículos de las

normas jurídicas antes mencionadas es la de dar una solución ambientalmente sustentable (por ejemplo mediante el reúso del agua residual mediante alguno de los ocho tipos visto en la sección 1.6.1) , asegurando el uso adecuado de los recursos, posibilitar la producción armónica y la utilización de los diferentes ecosistemas, garantizar la mínima degradación y desaprovechamiento, y promover la participación social en las decisiones fundamentales de este desarrollo sustentable.

## 5.2. Sobre la importancia de un sistema de red cloacal, planta depuradora y emisario final

El agua subterránea presente en los acuíferos es altamente contaminada por distintas fuentes, sean sólidas o líquidas. Dentro de estas últimas se destaca el agua residual, sea doméstica o industrial, que introducen al sistema altas concentraciones de DBO (demanda biológica de oxígeno), nitratos, químicos orgánicos, bacteria y diferentes tipos de virus. Si bien estas concentraciones pueden ser disminuidas mediante el saneamiento rural, el aumento de la población y, por lo tanto, la demanda de agua potable junto al residuo que la misma genera luego de ser usada en una actividad, debe traer aparejada un estudio de factibilidad en cuanto a la proyección de una red cloacal que conduzca estos líquidos resultantes a una planta depuradora, donde se le pueden realizar diversos tratamientos con mayor eficiencia que el mero saneamiento antes expuesto.

Aun así, pensar en un efluente “totalmente descontaminado” sería una utopía ya que representaría un problema de difícil o hasta imposible solución técnica y económica. De esta forma, los tratamientos que se dan en la planta depuradora son tales que su efluente debe ser conducido a un cuerpo de agua receptor y ser volcado en el mismo de una manera en particular, y es allí donde radica la importancia del emisario submarino.

El correcto diseño del mismo en cuanto a su localización y proyección, como así también el difusor, es significativo ya que determinará la forma en que el contaminante

sufre de los principales transportes hidrológicos y, por tanto, demarcará las zonas aptas para ciertos usos del agua y para ciertos individuos.

### 5.3. Sobre el modelo CORMIX

Las soluciones analíticas planteadas para definir la evolución de un contaminante presentan una gran cantidad de variables intervinientes. Se han propuesto y diseñado diversos modelos programables capaces de dar una solución al problema de forma suficientemente precisa y dentro de los mismos se encuentra el modelo CORMIX.

Dentro de las ventajas de este programa se pueden mencionar:

- ✓ El modelo se ha simulado a infinidad de casos reales, por lo cual se ha ido ajustando hasta conseguir un grado de exactitud suficiente para la tarea;
- ✓ Es muy sencillo de utilizar y las variables intervinientes no son numerosas, por lo que aun no teniendo datos precisos del caso en particular es posible asignarles valores de casos análogos sin que esto signifique una gran pérdida de precisión en los resultados;
- ✓ Es de ejecución rápida y de fácil comprensión;
- ✓ La estructura de subprogramas que conforman el modelo CORMIX hace posible seguir los resultados de manera escalonada;
- ✓ Presenta una gran versatilidad en el diseño de la descarga (monopuerto, multipuerto o superficial), y debido a que las características de la mancha en el Campo Cercano dependen de ésta, es en esta región donde el modelo ofrece un mayor grado de precisión.

Por otro lado, las desventajas de este programa se resumen a continuación:

- ✓ Las variables intervinientes, que son pocas y representaban una ventaja en cuanto a su estimación, hacen que el problema tome los mismos valores a lo largo de todo el recorrido de la mancha, lo que no sucede en la realidad. Así, se trabajan con velocidades medias del cuerpo receptor y del viento, profundidades medias hasta el fondo y hasta la boca de los puertos, coeficientes medios de Manning, entre otros.
- ✓ El modelo supone, además, los vectores de velocidad del cuerpo receptor paralelos a la costa, lo que en realidad no sucede;
- ✓ Por los motivos anteriores, la región conocida como Campo Lejano cuenta con menor precisión en este modelo, haciendo que muchas veces sea aconsejable trabajar con otros modelos más rigurosos para esta determinación.

#### 5.4. Sobre los resultados obtenidos

Durante el desarrollo del trabajo se han podido sortear diversas dificultades con ayuda de la extensa bibliografía presente en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, concerniente al cuerpo de agua tratado, resultado de diversas Prácticas Supervisadas y Tesis de Postgrado. Por otro lado se menciona la clara ventaja de haber contado con el desarrollo de dos proyectos análogos a éste, como lo son los emisarios submarinos de Puerto Madryn y Mar del Plata, ambos llevados a cabo por la misma entidad.

Se ha conseguido, mediante la comparación de diversas alternativas y casos pertenecientes a cada una de ellas, la obtención de la mejor solución en cuanto a la determinación del diseño del difusor.

Asimismo, la concentración de Coliformes Totales lograda en el Campo Lejano son muy bajas (recordar que a partir de aproximadamente los 4.500 metros aguas abajo se consigue una concentración menor a la limitada por las normas europeas según la Directiva 2006/7/CE vigente a partir del año 2014), y la distancia desde la costa más cercana hasta el límite de la pluma es, para el caso más desfavorable (centro de la

mancha paralela a la costa, como supone el modelo CORMIX) de más de 2.500 metros, distancia excesiva en lo que se refiere al control de calidad de aguas para baño. Es por este motivo que se podría corregir la longitud del emisario, con la consiguiente economía de diseño. Sin embargo, el hacerlo sería disminuir la profundidad en la cual la pluma es capaz de dispersarse en el Campo Cercano, por lo que la concentración se estimaría que ascendería de forma apreciable.

Otros posibles escenarios se podrían haber planteado teniendo en cuenta que el nivel de agua fluctúa año a año, como así también su salinidad, por lo que los procesos de transporte se verán afectados.

En este trabajo no se ha intentado realizar estas evaluaciones. Se recomienda para solucionar estos inconvenientes el uso de modelos más sofisticados para lograr mayores precisiones en el Campo Lejano, y el planteamiento de nuevos casos que pueda presentar la laguna para ser analizados nuevamente mediante CORMIX, principalmente en el Campo Cercano.



## 6. Referencias

✓ Legislación Utilizada:

*Constitución de la Nación Argentina*, Biblioteca Digital Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. Recuperado el 14 de Noviembre de 2016, de <http://www.biblioteca.jus.gov.ar/constituciones-argentina.html>

Diario Oficial de la Unión Europea (1975). – *Directiva 76/160/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo*

Diario Oficial de la Unión Europea (2006). – *Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*

EPA's Draft Reporto on the Environment (2003). Technical Document. Unites States Environmental Protection Agency.

✓ Bibliografía consultada:

Akar, P. & Jirka, G. (1991). *CORMIX2: an Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Multiport Diffuser Discharges*.

Bresicano, Alberto L. (1987). Generalidades sobre la Ingeniería Sanitaria. Tomo I y II.

Chae, Yong S. & Hamidi, Ahmed. (1999). *Groundwater and Surface Water Pollution*. Enviromental Engineer's Handbook. CRC Press LLC.

Chapra, Steven C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill Companies, INC.

- Corral, M., Pagot, M., Oroná, C., Rodríguez, A. y Patalano, A. (2011). *Modelación Numérica para la definición de escenarios hidrodinámicos críticos del futuro emisario submarino de Puerto Madryn*.
- Fischer, Hugo B. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. UK edition by Academic Press INC. London.
- Gyssels, P., Corral, M., Rodríguez, A., Patalano, A. y Fernández, R. (2011). *Estudio de la Dilución en el Campo Cercano de Vertidos Cloacales para el diseño de un Emisario Submarino en Mar del Plata*.
- Jirka, Gerhard H. & Doneker Robert L. (1990). *Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Single Port Discharges (CORMIX1)*.
- Jirka, Gerhard H., Doneker Robert L. & Hinton, Steven W. (1996). *User's Manual for CORMIX: a Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. DeFrees Hydraulics Laboratory School of Civil and Environmental Engineering Cornell University Ithaca, New York 14853-3501.
- Kiely, Gerard. (1999). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*.
- Muñoz Hernández A., (1990). *Saneamiento y alcantarillado*. Col. Señor 7, Publicaciones de la Escuela de Caminos de Madrid. Editorial Paraninfo, Madrid, segunda edición.
- Pozzi Piacenza, Cecilia E. (2006). "Simulación hidrodinámica y monitoreo del sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenusa), Córdoba, Argentina". Trabajo Final de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería-Mención Recursos Hídricos de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

# ANEXO