



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE CÓRDOBA



FACULTAD DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES

Escuela de Ingeniería Civil



Práctica Supervisada

“Modelación numérica de descargas de aguas
residuales urbanas por emisario submarino en la
Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina”

Autor: **Grande, Sebastián Alexis**

Tutor: **Dr. Gysels, Paolo**

Supervisor externo: **Ing. Corral, Mariano**

2017

Agradecimientos

A mis padres, Adriana y Heraldo, por la posibilidad brindada y los valores enseñados.

A mis hermanas, Leticia y Laura, por el sostén y comprensión.

Al amor de mi vida, Mariela, por iluminarme y permitirme ser mejor cada día.

A mis amigos de la vida.

A mi amigo Alejo, por su incondicionalidad.

A mis compañeros de facultad, por el camino transitado.

Al Ingeniero Andrés Rodríguez, por recibirme en el Laboratorio de Hidráulica.

A la ingeniera Mariana Pagot, por permitirme formar parte de su proyecto.

Al Ingeniero Paolo Gysseis, por los conocimientos impartidos y su guía para realizar la práctica supervisada.

Al ingeniero Mariano Corral, por su supervisión para la correcta realización de la práctica.

A todo el personal del laboratorio por la predisposición y la buena energía.

A todos los profesores que formaron parte de mi formación académica.

A la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

A la Universidad Nacional de Córdoba, por la inmensa posibilidad.

Resumen

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. El agua de consumo doméstico, tanto para alimentación, lavado y transporte de heces, es devuelta a un cuerpo de agua receptor, siendo importante para ello, contar con sistemas de canalización, tratamiento y desalojo, con el fin de cumplir con valores numéricos de parámetros indicadores de calidad de agua, ya que un tratamiento nulo o indebido, generaría graves problemas de contaminación.

En la actualidad, en pequeñas poblaciones de Argentina, es común encontrar sistemas de saneamiento para el agua de consumo doméstico tales como cámaras Sépticas, proseguidas por Zanjas de Absorción o Pozos Absorbentes. El principal problema de esta configuración, radica en que el agua potable utilizada por estas sociedades proviene de napas freáticas, por lo que cualquier fuente de contaminación, afecta directamente a las mismas y como consecuencia, la salud de las personas.

En referencia a esto, la calidad del agua, es un concepto puramente cualitativo y de difícil definición, ya que no se puede establecer sin fijar antes la necesidad de su uso por parte del ser vivo en cuestión, siendo estas muy variadas, por lo cual, lo que es agua de calidad para unos, para otro no lo es. Así, a lo largo de años de numerosos estudios, y a fin de cuantificar este concepto, surgieron los parámetros físico-químicos y biológicos, adaptados a cada una de estas necesidades, logrando tener un valor guía sobre lo que representa calidad de agua para cada especie.

La descarga de efluentes de aguas residuales al mar, por medio de emisarios submarinos, como parte de una necesidad humana de muchos centros poblados en áreas costeras, representa una alternativa viable, debiendo fijar los parámetros físicos-químicos y biológicos para cuantificar la calidad de agua vertida en el cuerpo receptor, con el objetivo de no generar un daño en su ecosistema y al uso que se le pueda dar (pesca, lúdico, etc.). Este sistema de descarga, una vez estudiado, diseñado, construido y operado correctamente, puede aprovechar al máximo la capacidad inherente de asimilación del ambiente marino; que funciona como una planta de tratamiento y deposición sin impactos negativos.

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenúza, por su magnitud, es la cuenca endorreica más importante de la República Argentina. Sus aguas varían entre mesosalinas a hipersalinas,

reuniendo características muy similares al agua de mar, pudiéndose pensar como receptor final de aguas residuales transportadas por emisarios submarinos, previamente tratadas en plantas depuradoras.

A partir de esto, y como objetivo principal de la práctica supervisada, se procedió al estudio y análisis de la modelación y simulación de descargas de aguas residuales por emisario submarino en la Laguna Mar Chiquita, provenientes de los centros urbanos cercanos a sus márgenes, previamente tratada en una hipotética planta de tratamiento, analizando además el caso en que la misma no funcione correctamente, vertiendo así el líquido en crudo. Se consideraron coliformes fecales en el campo lejano, orientado a determinar las zonas con valores límites aceptables de parámetros indicadores de calidad de agua, caracterizando el mejor punto de descarga, minimizando el impacto de la pluma de dispersión con el ambiente natural y con el uso de las costas de Miramar.

Para ello se utilizó el software de modelación numérica “Delft3D”, aprendiendo su funcionamiento y las variables intervinientes. Este software, permite la modelación tanto de sistemas fluviales como costeros, adaptándose satisfactoriamente al caso analizado correspondiente a un lago de planicie.

Índice de contenido

Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Índice de contenido	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
2. Descripción general de la zona de estudio	3
3. Objetivos	10
3.1. Objetivos generales.....	10
3.2. Objetivos específicos.....	10
4. Metodología	11
5. Tratamiento ambiental de las aguas residuales	12
5.1. Emisarios submarinos.....	12
5.2. Emisarios Submarinos en la República Argentina.....	15
5.2.1. Emisario Submarino de Puerto Madryn.....	16
5.2.2. Emisario Submarino de Mar del Plata.....	17
5.3. Marco teórico.....	18
5.3.1. ¿Porque se transportan los contaminantes?.....	18
5.3.2. Procesos de Transporte Hidrológicos.....	18
5.3.3. Concentración.....	20
5.3.4. Dilución.....	21
5.3.5. Densidad.....	21
5.3.6. Estratificación.....	21
5.3.7. Jet (Chorro) y Plume (Pluma).....	23
5.3.8. Decaimiento bacteriano.....	23
5.3.9. T90.....	24
5.3.10. Estudio de la dispersión de la pluma contaminante.....	24

5.4.	Calidad de agua	27
5.4.1.	Caracterización de las Aguas Residuales (AR)	27
5.4.2.	Caracterización de los líquidos cloacales	28
5.4.3.	Características de las aguas residuales	28
5.4.4.	Transmisiones de enfermedades relacionadas con el agua	29
5.4.5.	Principal parámetro indicador de la calidad de agua para emisarios submarinos: los Coliformes	31
5.5.	Calidad de aguas para baño y uso recreacional	32
5.5.1.	Antecedentes en la República Argentina	33
5.5.2.	Directiva 76/160/CEE	33
5.5.3.	Directiva 2006/7/CE	33
5.5.4.	Marco Regulatorio en la Provincia de Córdoba	34
5.5.5.	Decreto 847	35
5.5.6.	Legislación utilizada para análisis de resultados	39
5.6.	El caso de Mar chiquita	39
5.6.1.	Período de Proyecto	40
5.6.2.	Población Futura	40
5.6.3.	Caudal de Proyecto	42
6.	Herramienta de modelación numérica Delft3D	43
6.1.	Módulo hidrodinámico: 3DFLOW	44
6.2.	Módulo de Calidad de agua: WAQ (Water Quality)	47
6.2.1.	Modelo de decaimiento bacteriano D-Waq	49
6.2.2.	Modelo de Mancini	50
6.2.3.	Cómo utiliza D-Waq el modelo de Mancini	52
7.	Modelación de la hidrodinámica de la laguna Mar Chiquita	56
7.1.	Dominio de cálculo	56
7.2.	Escenarios	58
7.2.1.	Escenario N°1: "Viento Norte"	58
7.2.2.	Escenario N°2: "Viento Sur"	60
7.3.	Resultados	61
7.3.1.	Escenario N°1	61
7.3.2.	Escenario N°2	64
7.4.	Ubicación, longitud y profundidad del emisario	67
8.	Simulaciones de vertidos por emisario submarino en la laguna Mar Chiquita	70
8.1.	Acoplado del módulo Flow y Waq	70

8.2.	Características del efluente	72
8.3.	Escenarios	73
8.3.1.	Datos de entrada	74
8.4.	Resultados	75
8.4.1.	Simulación 2D: descarga Este con tratamiento	76
8.4.2.	Simulación 2D: descarga Este sin tratamiento.....	77
8.4.3.	Simulación 2D: descarga Oeste con tratamiento.....	79
8.4.4.	Simulación 2D: descarga Oeste sin tratamiento	82
8.4.5.	Simulación 2D: descarga Este, viento Norte, sin tratamiento.	84
8.4.6.	Simulación 2D: descarga Oeste, viento Sur, sin tratamiento	85
9.	Conclusiones	86
9.1	Sobre los resultados obtenidos	86
9.2.	Sobre el software DELFT3D	87
9.3.	Sobre la realización de la Practica Supervisada	88
10.	Referencias	89

Índice de figuras

Figura 2.1 - Ubicación y límites de la Laguna Mar Chiquita. Google Earth.	4
Figura 2.2 – Batimetría de la Laguna Mar Chiquita. Pozzi (2006).....	5
Figura 2.3 – Diagrama de vientos del mes de Enero (línea roja) y mes de Julio (línea azul). BUCHER et al. (2006).	6
Figura 2.4 – Ubicación de la localidad de Miramar en la costa Sur de la Laguna. Google Earth.....	7
Figura 2.5 – A la izquierda, imagen satelital del Pueblo de Miramar, Córdoba, Argentina. A la derecha, fotografía aérea – Vista Sur-Oeste-. Google earth y argentino.com.ar.	8
Figura 2.6 – Actividades propias de una ciudad costera. Miramarcordoba.com.ar y turismomiramar.com.	8
Figura 2.7 – Localidades a servir con el emisario submarino. Google earth.....	9
Figura 5.1 – Esquema general de un Emisario Submarino. “Clase de Emisarios”, Maestría en ciencias de la ingeniería. Mención recursos hídricos. FCEfyN, UNC.	13
Figura 5.2 – Representación del tendido del emisario submarino. Metroagua. Santa marta. Colombia. www.metroagua.com.co.....	14
Figura 5.3 – Emisario de Puerto Madryn. Muchiut (2016).	16
Figura 5.4 – Emisario de Mar del Plata. Muchiut (2016).	17
Figura 5.5 – Transporte por advección. Sánchez San Román. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca. http://hidrologia.usal.es	19
Figura 5.6 – Transporte por advección y difusión. Sánchez San Román. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca. http://hidrologia.usal.es	19
Figura 5.7 – Fenómeno de dispersión. Modelación ambiental. Chile. www.modelacion.cl	20
Figura 5.8 – Estratificación en lagos. Kiely. (1999: 323).	22
Figura 5.9 – Campo Cercano (Near Field) y Campo Lejano (Far Field). Arriba en planta, abajo en corte. Jirka, Doneker & Hinton (1996).	26

Figura 6.1 – Valores K_B para virus y bacterias. Principles of surface water quality modeling and control – Thomann y Mueller – pág. 235.....	52
Figura 6.2 – Variación de la radiación solar respecto a la profundidad. D-Water Quality manual de usuario, pág. 367.....	55
Figura 7.1 – Topografía de la laguna representada por sus curvas de nivel con el mallado propuesto. Quickplot – Delft3D.....	57
Figura 7.2 – Topografía de la laguna con interpolación de la malla. Quickplot – Delft3D.....	57
Figura 7.3 – Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.....	62
Figura 7.4 – Campo vectorial de velocidades para viento Norte de 5 m/s. Pozzi (2006).....	63
Figura 7.5 – Zona de estudio. Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.....	64
Figura 7.6 – Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.....	65
Figura 7.7 – Campo vectorial de velocidades para viento Sur de 5 m/s. Pozzi (2006).....	66
Figura 7.8 – Zona de estudio. Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.....	67
Figura 7.9 – Ubicación de los puntos de descarga. Fuente propia y Google Earth.....	68
Figura 7.10 – Batimetría y ubicación de los puntos de descarga Este y Oeste. Flow - Quickplot.....	70
Figura 8.1 – resumen de los módulos y diagrama de flujo de los datos en D-Water Quality.....	71
Figura 8.2 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante con tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.....	76
Figura 8.3 – Descarga Este. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.....	77
Figura 8.4 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.....	78

Figura 8.5 – Descarga Este. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.	79
Figura 8.6 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante con tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.	80
Figura 8.7 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.	81
Figura 8.8 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Playa Grande. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.	81
Figura 8.9 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.	82
Figura 8.10 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.	83
Figura 8.11 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Playa Grande. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.	83
Figura 8.12 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.	84
Figura 8.13 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.	85

Índice de tablas

Tabla 5.1 – Parámetros microbiológicos estipulados por la Unión Europea. Directiva 2006/7/CE (2006).....	34
Tabla 5.2 – Estándares del efluente vertido en cuerpos de agua superficiales. Decreto 847 (2016).	37
Tabla 5.3 – Estándares del efluente para reúso. Decreto 847 (2016).	38
Tabla 5.4 – Cantidad de habitantes. INDEC 1991, 2001 y 2010.	41
Tabla 5.5 – Tasas intercensales promediadas.	41
Tabla 5.6 – Población futura por localidad.....	42
Tabla 6.1 – Variables del modelo de Mancini utilizadas en el módulo Waq. D-Water Quality manual de usuario, pág. 366.....	54
Tabla 6.2 – Variables del modelo de Mancini utilizadas en el módulo Waq. D-Water Quality manual de usuario, pág. 366.....	55
Tabla 7.1 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo hidrodinámico con viento Norte en el módulo Flow.....	60
Tabla 7.2 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo hidrodinámico con viento Sur en el módulo Flow.....	61
Tabla 8.1 - Características del agua residual doméstica. Kiely (1999)	72
Tabla 8.2 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo Waq.	74



1. Introducción

Existe una creciente preocupación a nivel mundial acerca de la necesidad de evaluar las consecuencias de la realización de variados proyectos de ingeniería civil y de políticas principales de desarrollo sobre la salud humana. La creencia de que "prevenir es mejor que curar", nunca estuvo más vigente y aplicable que en la evaluación del daño potencial que puede ocurrir cuando se implementan proyectos de mediana y gran escala, particularmente en países en desarrollo. El estudio, la planificación adecuada y la aplicación de recursos y guías aceptables, son esenciales para evitar efectos dañinos a la salud.

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. El agua de consumo doméstico, tanto para alimentación, lavado y transporte de heces, es devuelta al medio donde puede existir un cuerpo de agua receptor, siendo importante para ello, contar con sistemas de canalización, tratamiento y desalajo, con el fin de cumplir con valores numéricos de parámetros indicadores de calidad de agua, ya que un tratamiento nulo o indebido, generaría graves problemas de contaminación.

En la actualidad, en pequeñas poblaciones de Argentina, es común encontrar sistemas de saneamiento para el agua de consumo doméstico tales como 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 proviene de napas freáticas, por lo que cualquier fuente de contaminación, afecta directamente a las mismas y como consecuencia, la salud de las personas.

Para este tipo de poblaciones, con posibilidades de desarrollo, el crecimiento demográfico lleva al diseño y concepción de un sistema de red cloacal con su planta depuradora y emisario final, siendo necesario para su implementación un estudio Costo/Beneficio respecto de los sistemas de saneamiento rural, que no solo involucra análisis económico, sino también ecológico y social.

Las aguas cloacales resultan 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 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.



La descarga de efluentes de aguas residuales al mar, por medio de emisarios submarinos y sistemas de difusores, representa una alternativa viable para muchos centros poblados del mundo que están ubicados en áreas costeras, particularmente, en países en desarrollo, donde los recursos financieros son limitados. Tales sistemas, una vez estudiados, diseñados, construidos y operados correctamente, pueden aprovechar al máximo la capacidad inherente de asimilación del ambiente marino; que funciona como una planta de tratamiento y deposición; sin generar ningún impacto indeseable en su ecosistema ni alterar el desarrollo de las actividades humanas y su salud.

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenúza, por su magnitud, es la cuenca endorreica más importante de la República Argentina, por ende, de la provincia de Córdoba. Sus aguas varían entre mesosalinas (20-50 g/L) a hipersalinas (>50 g/L), reuniendo características muy similares al agua de mar, pudiéndose pensar como receptor final de aguas residuales transportadas por emisarios submarinos, previamente tratadas en plantas depuradoras.

En la actualidad, la localidad de Miramar es la única ciudad costera de la Laguna, tomando importancia debido a que su economía local se rige a través del turismo. La misma cuenta con una población estable que se duplica en periodos estivales. Esta población temporal adicional, se concentra en los emprendimientos hoteleros que se establecieron en la zona y que funcionan todo el año. Esta localidad y las otras ciudades a pocos kilómetros de ella, cuentan con sistemas de saneamiento por cámara séptica y pozo absorbente como receptor final.

A partir de esto, y en el marco del convenio realizado para la realización de la Práctica Supervisada entre el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba y la SECyT (Secretaría de Ciencia y Tecnología), entidad dependiente de la misma Universidad, se procedió al estudio y análisis de la " Modelación numérica de descargas de aguas residuales urbanas por emisario submarino en la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina", formando parte del 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.

En este estudio, influyeron los niveles medios de agua observados, conjuntamente con la caracterización y definición de la acción del viento generador de patrones de flujos, los que permitieron combinar estos efectos y definir el punto de descarga óptimo en el sistema para la costa Sur, Sur-Oeste de la Laguna Mar Chiquita.

Se realizaron modelaciones y simulaciones de la hidrodinámica y de la dispersión del líquido residual vertido por emisario, considerando los coliformes fecales (*Escherichia*



Coli) en el campo lejano, orientado a maximizar la dilución de los contaminantes, caracterizando el mejor punto de descarga, minimizando el impacto de la pluma de dispersión con el ambiente natural y con el uso de la costa (reserva natural y uso lúdico).

Para ello se procedió al aprendizaje de un programa de modelación numérica llamado “Delft3D”, para la realización de un análisis del comportamiento hidráulico de la laguna; con su posterior comparación con trabajos anteriores a modo de calibración; y de la descarga de coliformes fecales desde una hipotética planta de tratamiento en la ciudad de Miramar por medio de un emisario submarino, analizando si los resultados de las concentraciones se adecuan a las normativas vigentes. Este software, permite la modelación tanto de sistemas fluviales como costeros, adaptándose satisfactoriamente al caso analizado correspondiente a un lago de planicie.

Esta herramienta se estudió y utilizó para lograr los resultados esperados de simulaciones específicas en el estudio de descarga de aguas residuales, proporcionando una base de conocimientos para futuros proyectos que deba afrontar quien escribe la correspondiente práctica supervisada y el Laboratorio de Hidráulica, además de contribuir a futuros estudios del funcionamiento de un complejo sistema hídrico con reconocimiento nacional e internacional, para mejorar su gestión interjurisdiccional y el manejo de aguas entre las provincias intervinientes en la cuenca.

2. Descripción general de la zona de estudio

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa, es una enorme laguna endorreica de elevada salinidad, que se encuentra en el noreste de la Provincia de Córdoba, en el centro de la república Argentina.

Su superficie variable, que puede rondar los 8000 km², lo convierte en uno de los lagos salados más extensos de los hemisferios sur y occidental. Además, es la mayor superficie lacustre de la Argentina, el 4º lago salado endorreico más grande del planeta, y el 4º lago de planicie más extenso del mundo.

Está comprendida dentro de uno de los humedales de importancia internacional, denominado por el convenio de Ramsar (Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional) como “Bañados del Río Dulce y Laguna de Mar Chiquita”,



siendo este una depresión fluvio-lacustre, comprendiendo la Laguna de Mar Chiquita, los bañados del Río dulce o Petri, las desembocaduras de los Río Primero o Suquía, Río Segundo o Xanaes, y cursos dispersos. Es una amplia concavidad limitada por fallas profundas de orientación norte a sur, que recibe los aportes hídricos de los ríos antemencionados, en cuya parte más baja está emplazada la laguna, de aguas que varían entre mesosalinas a hipersalinas.

La Laguna Mar Chiquita se encuentra ubicada al Noreste de la provincia de Córdoba, ver *figura 2.1*, sobre latitud $30^{\circ} 02' S$ y longitud $62^{\circ} 56' W$. Es el receptor final de la cuenca endorreica que comprende parte de las Provincias de Córdoba, Santiago del Estero, Tucumán, Catamarca y Salta. Los afluentes principales son los ríos Primero (Suquía) y Segundo (Xanaes), que desembocan por el Sur y el río Dulce (Petri), el cual aporta, por el Norte, el 80% del caudal total que ingresa a la Laguna regulado por embalse.



Figura 2.1 - Ubicación y límites de la Laguna Mar Chiquita. Google Earth.

El sistema hidrodinámico de la Laguna Mar Chiquita ha manifestado importantes variaciones de nivel, siendo estas documentadas durante el último medio siglo. Dichas variaciones se atribuyen como consecuencia directa de los ciclos hidrológicos naturales, amplificados por el manejo y gestión del recurso en la cuenca alta del Río Dulce (principal tributario a la Laguna). Desde la década del 60´ a la fecha, se ha logrado medir ambos extremos del ciclo; desde el valor mínimo de nivel (evidenciado en el retroceso de la costa hasta 3 km desde la localidad de Miramar) hasta la inundación de la ciudad de Miramar en la década del ´80.

Esta situación ha caracterizado la dinámica hidrológica singular en este cuerpo de agua poco profundo. Durante este último período seco (2003-2014), la superficie de la Laguna se ha reducido desde 6.500 km² a menos de 2.000 km². Por emplazarse en una zona de llanura se da su escasa profundidad, del orden de 5,5 m en la actualidad, cubriendo un área cercana a 2.500 km², con un nivel de agua de 67,5 m s.n.m. Estos parámetros han pasado por grandes modificaciones históricas debido a que la costa de la Laguna presenta pendiente muy suave, por lo que la superficie varía de manera muy marcada aún para pequeños cambios de nivel. El máximo nivel medido se observó en el año 2003 con un valor de 71,40 m s.n.m., ver *figura 2.2*, lo que corresponde a una profundidad máxima de 10 m y un área cubierta por agua de 6.500 km².

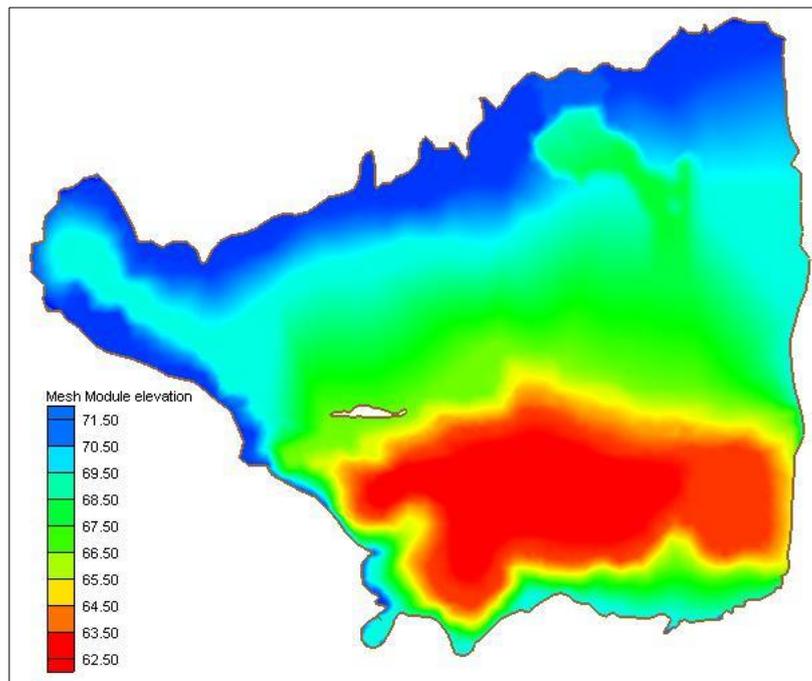


Figura 2.2 – Batimetría de la Laguna Mar Chiquita. Pozzi (2006).



Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los fenómenos fluviales y los factores meteorológicos. Los fluviales a través del régimen de crecidas y los meteorológicos, el más importante, la acción del viento.

Debido a la geometría de la laguna, de unos 120 Km. en dirección E-O y 100 Km. en dirección N-S, la acción del viento (*wind set up*) puede llegar a ser dominante en la circulación y el intercambio de masas de agua. Los vientos predominantes son del Norte (16,4%), seguidos por la dirección Sudeste (16,0%), con intensidades observadas de hasta 70 km/h que generan una sobre elevación (*wave set up*) cercana a 1 m (UNC, 2003). El viento tiene una influencia notable en las variaciones de nivel de la laguna, haciendo descender la cota en las costas de Miramar para vientos del N, NE o NO, siendo frecuentes oscilaciones de 0,50 m, de acuerdo a los trabajos más recientes. En la *figura 2.3*, los valores sobre el eje vertical indican la frecuencia relativa en cada punto cardinal, observando predominancia de vientos del Norte y del Sur, apreciando el incremento en Enero de vientos del Este.

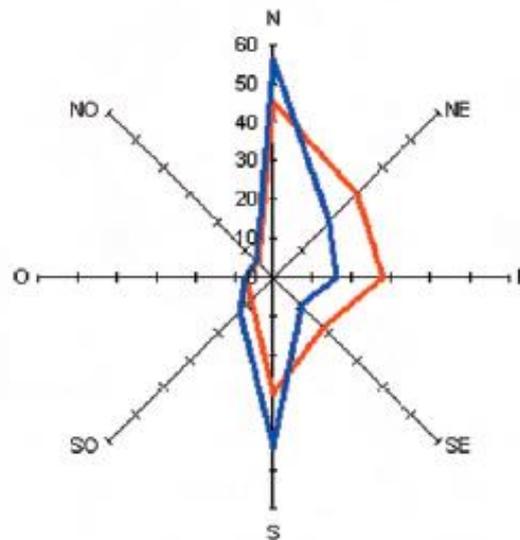


Figura 2.3 – Diagrama de vientos del mes de Enero (línea roja) y mes de Julio (línea azul).
BUCHER et al. (2006).

Durante las últimas décadas, las importantes fluctuaciones del nivel de agua en el sistema, definieron periodos históricos ricos a muy pobres. Estas variaciones impactaron directamente tanto a nivel ecológico como en el desarrollo social y económico de las comunidades asentadas en las proximidades de la Laguna. Se manifestaron situaciones de distintas escalas ambientales, desde la ausencia de pejerrey como consecuencia de una importante concentración salina, hasta el aprovechamiento económico de una comunidad costera como Miramar al mejorar el desarrollo turístico de la costa debido al

marcado descenso del agua. Esta misma localidad, había sufrido en la década del '80, situaciones de inundación de un importante sector urbano, y nuevamente sobre la zona costera durante el año 2003.

La Laguna es en la actualidad un importante centro pesquero. La costa sur tiene un desarrollo turístico importante, al cual se agrega la creciente adición del ecoturismo nacional e internacional. Asimismo, la industria peletera a base de especies silvestres (principalmente nutria) es importante, aunque ha tenido variaciones importantes en las últimas décadas. La industria pesquera ha estado en continuo incremento desde que el nivel de las aguas permitió la expansión del pejerrey en la Laguna.

En la actualidad, la localidad de Miramar - ver *figura 2.4 - 2.5* - es la única ciudad costera de la Laguna, tomando importancia debido a que su economía local se rige a través del turismo. La misma cuenta con una población estable, hasta el año 2010, de 2023 habitantes (INDEC, 2010), representando un incremento de más del 2% respecto a los 1979 habitantes (INDEC, 2001) del censo anterior. La misma se encuentra en un período de florecimiento económico, ayudado por el arribo de una gran cantidad de turistas, procedentes en su mayoría del este de las Provincias de Córdoba y Santa Fe, quienes han elegido esta segura y apacible localidad para vivir durante el período de vacaciones.

También, aunque en menor caudal, acuden turistas de diversos puntos del país y del extranjero. Esta población temporal adicional, se concentra en los emprendimientos hoteleros que se establecieron en la zona y que funcionan todo el año.



Figura 2.4 – Ubicación de la localidad de Miramar en la costa Sur de la Laguna. Google Earth.



Figura 2.5 – A la izquierda, imagen satelital del Pueblo de Miramar, Córdoba, Argentina. A la derecha, fotografía aérea – Vista Sur-Oeste-. Google earth y argentino.com.ar.

En 2008 el área de la Laguna Mar Chiquita fue declarada 1ª Maravilla Natural de Córdoba, distinción que permitió un exponencial crecimiento del número de visitantes, considerada hoy la nueva frontera turística de Córdoba, viendo incrementada su capacidad de albergue a través de su hotelería y la construcción de numerosas cabañas.

Durante los meses de verano, sus playas se colman de visitantes desde horas muy tempranas y hasta la caída del sol, realizando diferentes actividades, desde lúdicas en la costa, hasta deportes náuticos en el inmenso espejo de agua – ver *figura 2.6*.



Figura 2.6 – Actividades propias de una ciudad costera. Miramarcordoba.com.ar y turismomiramar.com.

A unos 10 km hacia el sur de Miramar se encuentra la localidad de Balnearia y a 15 km hacia el oeste de Balnearia, la localidad de Marull. Por último, sobre la margen suroeste, aproximadamente a 14 km de la costa y a 45 Km de Miramar, se localiza la localidad de La Para – ver *figura 2.7*. Estas cuatro localidades 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 generadas por estas 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.



Figura 2.7 – Localidades a servir con el emisario submarino. Google earth.

La calidad del agua en este sistema merece especial interés, debido a su importancia como recurso ambiental y económico, dado que las actividades que sustentan la región son principalmente la pesca y el turismo. Sus características hidroquímicas presentan importantes variaciones espaciales y temporales. Las variables ambientales presentes en la zona afectan la circulación, condicionando los requerimientos de la calidad del agua necesarios para el desarrollo de las actividades típicas de la región.

En el título 5.6 del presente trabajo se resuelve el caudal de vertido de agua residual en la laguna y, en los títulos 7 y 8, se describen los parámetros intervinientes para la modelación de la hidrodinámica de la laguna, la elección del punto óptimo de descarga y la simulación de la misma, con el análisis de la pluma de dispersión.



3. Objetivos

3.1. Objetivos generales

El objetivo general de esta práctica supervisada, bajo la hipótesis de la concepción futura de una red cloacal en las localidades intervinientes y de una planta de tratamiento en la localidad de Miramar, fue la realización de simulaciones de vertidos de las aguas residuales aportadas por las mismas mediante un emisario submarino en la Laguna de Mar Chiquita (Córdoba), a fin de determinar la ubicación óptima del punto de descarga, para minimizar los impactos ambientales del vertido contaminante en el campo lejano, compatiblemente con las características del medio receptor y de la hidrodinámica característica de la laguna, proporcionando una base de datos para su futura implementación, además de contribuir a futuros estudios del funcionamiento de este complejo sistema hídrico con reconocimiento nacional e internacional, a fin de mejorar su gestión interjurisdiccional y el manejo de aguas entre las provincias intervinientes en la cuenca.

3.2. Objetivos específicos

- Estudiar la hidrodinámica en la Laguna por efecto de la acción del viento sobre la superficie de agua.
- Estudiar el fenómeno de dispersión en el campo lejano de vertidos de aguas residuales urbanas (cloacales) por emisarios submarinos en un medio acuático receptor.
- Comprender el funcionamiento del software DELFT 3D, su módulo FLOW y WATER QUALITY, entendiendo los parámetros intervinientes.
- Realizar simulaciones para diferentes escenarios hidráulicos de la dispersión de contaminantes en el campo lejano en diferentes puntos de la Laguna y efectuar un análisis de los resultados para buscar el punto óptimo de descarga.
- Generar una base de información para futuros proyectos que deba afrontar quien escribe la práctica supervisada y el Laboratorio de Hidráulica.



4. Metodología

La herramienta empleada en este trabajo, fue un paquete de programas (módulos) de modelado numérico integrado en un solo software, llamado *Delft3D*, siendo su ámbito de aplicación entornos fluviales y costeros. Dichos módulos, de aplicación a flujos no estacionarios, incorporan los efectos de las mareas, los vientos, la presión atmosférica, las diferencias de densidad (debido a la salinidad y temperatura), olas y turbulencias, permitiendo la simulación del flujo en dos y tres dimensiones, con o sin transporte de sedimentos, haciendo consideraciones de morfología variable o no.

La metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos, comenzó con la recolección de material bibliográfico acerca de la aplicación del software *Delft3D* para introducirse en la funcionalidad del mismo. Luego se procedió a realizar simulaciones sobre casos establecidos para familiarizarse con los parámetros intervinientes y el modo en que el programa interpreta los mismos, logrando analizar el grado de objetividad de los resultados según las hipótesis planteadas.

Luego, se abordó la hidrodinámica de la Laguna Mar Chiquita, analizando por medio de diferentes fuentes de información su comportamiento, recabando datos de temperatura del medio, batimetría, densidad, etc., tomando como principal factor actuante y generador de la hidrodinámica al viento. Se analizaron datos históricos de viento, tomando dos casos representativos. Luego se realizó el modelado de la hidrodinámica en el módulo Flow del software *delft3D* con toda la información disponible y se procedió a la simulación numérica en 2D, teniendo como hipótesis un nivel de agua constante, sin entradas ni salidas de caudal, para luego comparar con trabajos ya realizados (donde sí se tuvieron en cuenta aportes y salidas de caudal), definiendo la representatividad de los procesos, a fin de fijar una calibración de la simulación.

Finalmente, se estudió y analizó el tema de vertidos de aguas residuales por medio de emisarios submarinos, tomando los parámetros más representativos sobre calidad de aguas, a fin de obtener aquellos más importantes que permitieran cumplir con los objetivos planteados. Se modelaron las características del fluido a verter en el módulo Water Quality del software *delft3d*, se eligieron puntos de descarga en función de las consecuencias del vertido para la salud humana y las actividades desarrolladas en la costa de la localidad de Miramar y Playa Grande, tomando para ello, las condiciones de vientos más desfavorables (analizados en la hidrodinámica) determinante de la evolución de la pluma de dispersión. Finalmente se procedió a la simulación en 2D y al análisis de resultados.



Para el análisis de resultados, se constataron los valores de calidad de agua permitidos en la legislación vigente en la provincia de Córdoba, Ley Provincial 10.208 y en el Decreto 847 complementario a la misma, ya que no se cuenta con estudios de esta problemática sobre la Laguna Mar Chiquita.

Motivados por lo anteriormente expuesto, se simularon y analizaron 6 escenarios posibles de descarga, saber:

- 1- **Simulación 2D: descarga Este con tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, con tratamiento en planta depuradora, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.
- 2- **Simulación 2D: descarga Este sin tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.
- 3- **Simulación 2D: descarga Oeste con tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, con tratamiento en planta depuradora, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 4- **Simulación 2D: descarga Oeste sin tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 5- **Simulación 2D: descarga Este, Viento Norte:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 6- **Simulación 2D: descarga Oeste, Viento Sur:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.

En los títulos siguientes, se desarrolla lo anteriormente expuesto.

5. Tratamiento ambiental de las aguas residuales

5.1. Emisarios submarinos

Un emisario submarino es una conducción para realizar vertidos de origen urbano o industrial en un cuerpo de agua (generalmente el mar) a cierta distancia de la costa. El

principal objetivo de los emisarios submarinos es minimizar el impacto que puede tener el vertido de aguas residuales al ambiente hídrico, o lo que es lo mismo, garantizar una buena dilución, de manera que la mezcla de aguas residuales y agua del ambiente no altere de forma alguna el aspecto natural y sea inocua para el ecosistema lacustre y para los seres humanos (Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Medio Ambiente (CEPIS, 2000).

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 5.1*, 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.

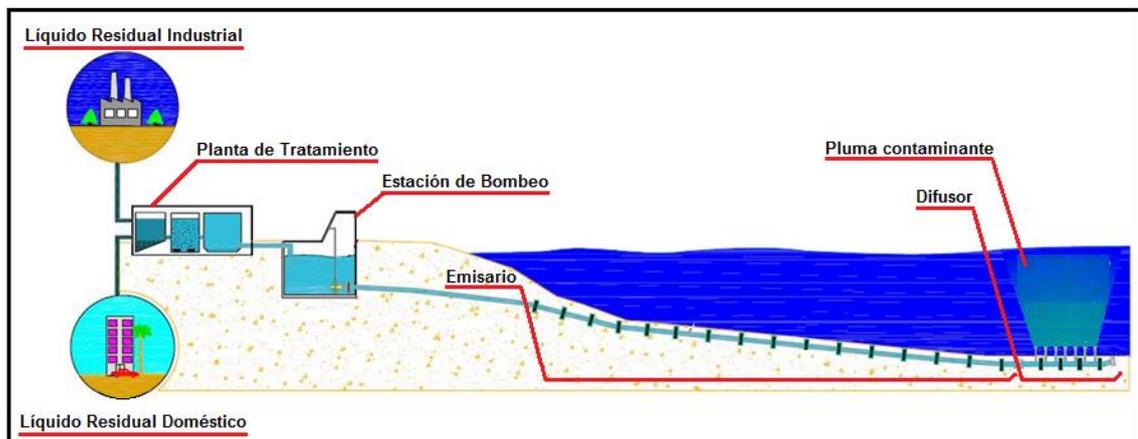


Figura 5.1 – Esquema general de un Emisario Submarino. “Clase de Emisarios”, Maestría en ciencias de la ingeniería. Mención recursos hídricos. FCEfYN, UNC.

El tipo más común de tuberías para emisarios submarinos son fabricadas en concreto reforzado o polietileno, aunque todavía es posible encontrar algunas de hierro fundido, hierro forjado u acero. 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 en un emisario submarino dependen de datos concernientes a la naturaleza del afluente, el número de habitantes a servir, el caudal vertido, el tipo de tratamiento que recibe el efluente, los vientos, el oleaje, las corrientes y uso de la zona de descarga, la forma de la

costa, la flora y fauna, la naturaleza del fondo, el perfil batimétrico, la hidrometeorología local, entre otros. Con estos parámetros propios del medio ambiente, se deben definir los parámetros de diseño, como ser la longitud y el diámetro del emisor, la característica y número de puertos, la velocidad del efluente en el emisor y en las bocas de salida, los materiales, la cimentación y anclaje, etc...

El emisario tiene como finalidad introducir en el cuerpo receptor, ver *figura 5.2*, en condiciones idóneas, un cierto caudal de aguas contaminadas de tal forma que, sanitaria y ecológicamente, esta inyección no sea perjudicial, destructiva u ofensiva.

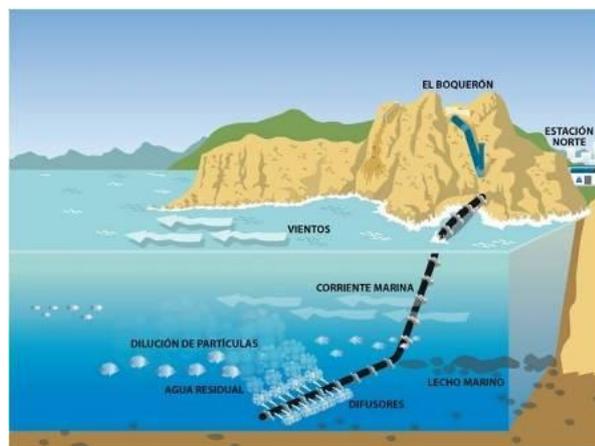


Figura 5.2 – Representación del tendido del emisario submarino. Metroagua. Santa marta. Colombia. www.metroagua.com.co

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

- **Dilución Inicial:** el efluente es conducido hasta la denominada Zona de Mezcla, en donde se producirá una mezcla a través del difusor de descarga, el cual es diseñado para lograr una alta dilución en el medio receptor, lográndose bajar la concentración del efluente como mínimo a 100 veces (dilución de 100:1) de manera sostenida (por ejemplo: si se tiene un efluente con un valor de DBO de 200, éste bajará como mínimo a un valor de 2) , y en muchos casos se pueden alcanzar diluciones superiores a 2000 veces (dilución 2000:1). Esta dilución inicial a través de difusor da origen a la llamada



“pluma de dilución”, siendo variables importantes para su diseño: la profundidad, la densidad y la temperatura del medio receptor.

- **Dispersión:** seguidamente se producirá un transporte de esta pluma, por la acción de las corrientes marinas que producirán una dispersión del efluente (o dilución de campo lejano) en un volumen acuático cada vez mayor, lográndose una completa integración de la carga alimenticia al medio acuático.
- **Decaimiento bacteriano:** el decaimiento bacteriano se refiere a la muerte de las bacterias patógenas típicas de los efluentes de aguas servidas (causantes de enfermedades gastrointestinales en bañistas que usan las playas o balnearios). Este decaimiento o muerte bacteriana se produce desde el transporte del efluente a través del emisario y logra su mayor eficiencia en el medio acuático debido a la acción de varios factores: los rayos ultra violetas, la salinidad, el choque térmico y la acción de organismos depredadores existentes en este medio.

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, ya que son los principales agentes perjudiciales de la salud humana.

En conclusión, el Sistema de Depuración por Emisario Submarino, es un sistema inteligente que utiliza la capacidad depurativa del medio acuático, incorporando el efluente como una carga alimenticia en el ciclo trófico de este ecosistema. Constituye un sistema confiable, robusto y económico; capaz de depurar grandes caudales de aguas servidas de manera ininterrumpida, contando con una fuente inagotable de energía libre que proporciona una dinámica de corrientes y una conveniente oxigenación constante del medio receptor.

5.2. Emisarios Submarinos en la República Argentina

Se comentan a continuación, de modo muy general, dos proyectos de emisarios submarinos en la República Argentina, uno localizado en la ciudad de Puerto Madryn, ciudad ubicada en la región Noreste de la Provincia de Chubut, y el otro en la ciudad de Mar del Plata, ciudad ubicada al sudeste de la provincia de Buenos Aires, ambos estudiados en el laboratorio de hidráulica de la UNC.

Cabe mencionar que el emisario de Puerto Madryn aún es un proyecto, mientras que el emisario de Mar del Plata ya fue construido e inaugurado en el año 2015.



5.2.1. Emisario Submarino de Puerto Madryn

Este emisario se estudió y analizó para servir a una población de 80.000 habitantes (Corral et al. 2011), proyectado como parte de un plan de contingencia, previsto durante las emergencias que pudieran ocurrir por el volcado de aguas residuales en las aguas costeras, en caso de fallas en el sistema de transporte y deposición en piletones de tratamiento ya existente. 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 plantearon diferentes alternativas de disposición, en 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 (en principio se alojará en el conducto de servicios existente en el muelle Luis Piedra buena – ver *figura 5.3*) 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 descarga de $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 5.3 – Emisario de Puerto Madryn. Muchiut (2016).

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 ser alojada 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, a una 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.

5.2.2. Emisario Submarino de Mar del Plata

Es una obra de mayor envergadura que la anterior – ver *figura 5.4*. Se tuvieron en cuenta diversas variables como en el emisario de Puerto Madryn, sin embargo, es de destacar la gran diferencia de caudales entre ambos proyectos: en el emisario de Mar del Plata se corrieron modelos con caudales que van desde los 1,60 m³/s hasta los 9,00 m³/s. La población estimada a servir fue de 700.000 habitantes.



Figura 5.4 – Emisario de Mar del Plata. Muchiut (2016).

La obra está compuesta básicamente por:

1. **Estación de Bombeo:** ubicada en la costa
2. **Tubería de Impulsión o Emisario:** de 2,00 m de diámetro y una 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.



5.3. Marco teórico

5.3.1. ¿Porque se transportan los contaminantes?

Los medios naturales son susceptibles de ser contaminados. Para saber identificar si están contaminados, necesitamos saber cuándo no están contaminados. Cuando cambian sus características con respecto a una situación estándar, entonces decimos que su composición ha cambiado y el medio se ha contaminado.

Los medios naturales susceptibles de ser contaminados, desde el punto de vista del transporte de fluidos, son tres:

- **La atmósfera**, con el aire,
- **las aguas superficiales**, con las aguas que hay en los ríos, lagos y mares, y
- **las aguas subterráneas**, con las aguas presentes en los acuíferos.

Estos medios, que tienen su propia dinámica, se pueden contaminar trasladando los contaminantes a otro lugar.

Entonces, respondiendo a la pregunta generada en el título, los contaminantes se transportan porque los medios fluidos en la tierra tienen su propia dinámica, esa propia dinámica traslada los contaminantes a otros lugares, llevándolos a otros puntos del espacio natural, en diferentes concentraciones. (Universidad Politécnica de Valencia)

5.3.2. 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.

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**: es el arrastre de un contaminante o sustancia por la propia velocidad del agua o medio receptor (ver *figura 5.5*). Si sólo existiera este proceso, el

contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada por el contaminante sería constante. La advección simplemente transporta las sustancias contaminantes.

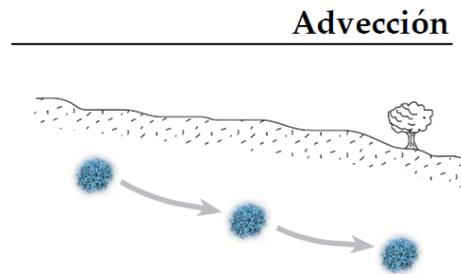


Figura 5.5 – Transporte por advección. Sánchez San Román. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca. <http://hidrologia.usal.es>.

- **Convección:** transporte vertical inducido por inestabilidad hidráulica, debido a gradientes térmicos.
- **Difusión:** dispersión de las partículas según movimientos moleculares aleatorios. Si en un punto de un medio sin flujo depositamos una gota de contaminante con cierta concentración, al cabo de un tiempo, el punto inicial se habrá ampliado y difuminado. Si a eso le unimos el transporte por advección, sucedería lo mostrado en la *figura 5.6*. Las moléculas de la sustancia disuelta en el agua se mueven de los puntos de mayor concentración hacia los de menor concentración. Este proceso se denomina difusión molecular o simplemente difusión y se produce a causa de la agitación continua de todas las moléculas del líquido.

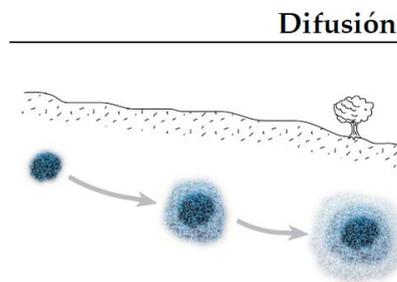


Figura 5.6 – Transporte por advección y difusión. Sánchez San Román. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca. <http://hidrologia.usal.es>.

- **Dispersión:** es el proceso que actúa separando las partículas disueltas, diluyendo el soluto en el agua y reduciendo su concentración. La mezcla, ver *figura 5.7*, que



ocurre a lo largo de la dirección del flujo se denomina **dispersión longitudinal**. Además, un frente de soluto que avanza tiende a dispersarse en direcciones perpendiculares al flujo debido a la turbulencia, el resultado de esta mezcla se denomina **dispersión transversal**.

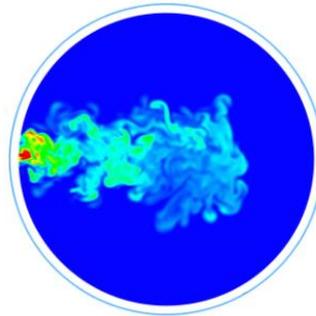


Figura 5.7 – Fenómeno de dispersión. Modelación ambiental. Chile.
www.modelacion.cl.

- **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 son complejas y es por ello que se han creado diversos modelos numéricos capaces de computarizarse.

5.3.3. Concentración

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

$$\bar{C} = \Delta Masa / \Delta Volumen \quad [kg/m^3] \quad 5.1$$

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

$$C = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta Masa / \Delta Volumen = dM / dV \quad [kg/m^3] \quad 5.2$$



5.3.4. 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.

$$S = \frac{\text{Volumen total de la muestra}}{\text{Volumen del efluente en la muestra}} \quad 5.3$$

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.

5.3.5. Densidad

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

$$\rho = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad 5.4$$

5.3.6. 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 5.8* (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 5.8* (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.

Es muy improbable que se desarrolle una estratificación térmica marcada en lagos salinos poco profundos y ubicados en regiones con mucho viento, como es el caso de Mar Chiquita, ya que usualmente se produce una mezcla completa de las aguas (condición denominada *polimixis*). Sin embargo, y como se observó en Mar Chiquita, es posible que con ausencia de viento por períodos suficientemente prolongados se produzca alguna estratificación temporaria en las partes más profundas de la laguna (condición denominada *meromixis*). (BUCHER. (2006)

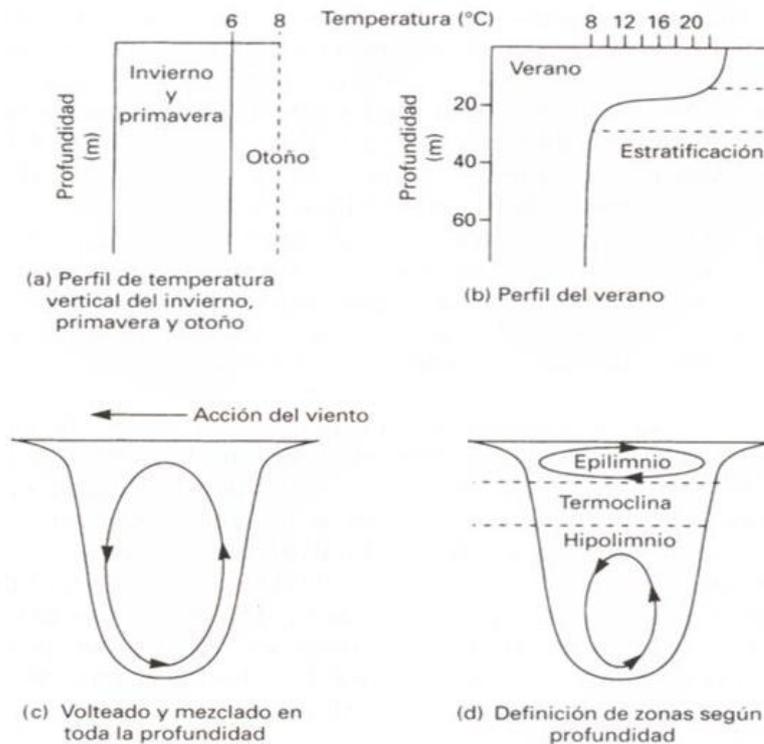


Figura 5.8 – Estratificación en lagos. Kiely. (1999: 323).



5.3.7. 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* (combinación de jet y pluma para valores intermedios de momentum y flotabilidad). Es de destacar que cualquier *jet* se comporta como *pluma* luego de cierta distancia característica.

5.3.8. Decaimiento bacteriano

El *decaimiento bacteriano* es un fenómeno que tiene como resultado una disminución de la cantidad de bacterias; 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 predación 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 aquellas que se encuentran asociadas a 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 UV. 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.

5.3.9. T90

Relacionado con el decaimiento bacteriano, $T90$ 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. En los títulos 5.5 y 6.2.1.1 se analizan estos valores.

5.3.10. 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.



Cuando las aguas residuales son dispuestas en el océano, la boyancia o flotabilidad (capacidad de un cuerpo para sostenerse dentro de un fluido) y el momentum, se combinan para formar una pluma que incrementa su tamaño en función de la distancia de viaje, hasta la superficie de atrapamiento en el agua marina. El proceso de atrapamiento se marca lentamente cuando la pluma alcanza una posición de boyancia neutral con respecto al ambiente marino o, cuando llega a la superficie.

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 (N.F.)**. 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 (F.F.)**. Ambas zonas se pueden apreciar en la *figura 5.9*.

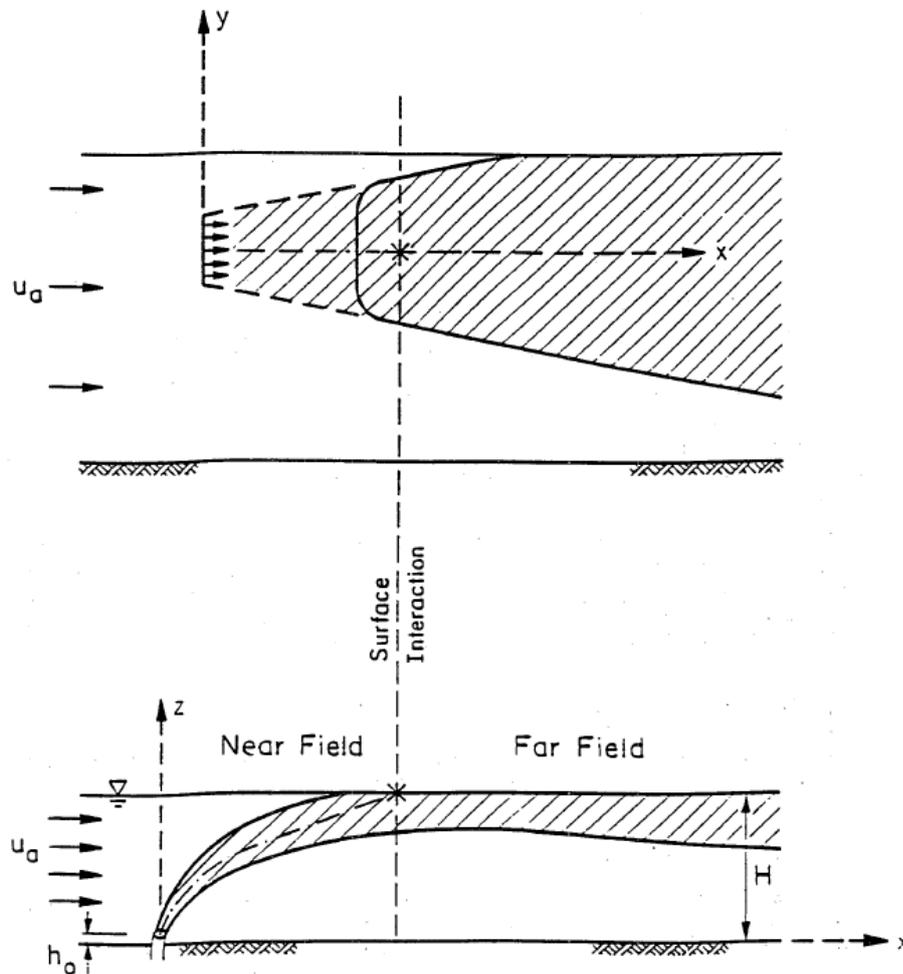


Figura 5.9 – Campo Cercano (Near Field) y Campo Lejano (Far Field). Arriba en planta, abajo en corte. Jirka, Doneker & Hinton (1996).

Cerca de la fuente el flujo del jet o la pluma está controlado usualmente solo por las condiciones iniciales, estas 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: aquellos 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: se da cuando por flotabilidad se llega a uno de los contornos horizontales antes mencionados, comenzando 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 y difusión molecular del efluente, debido a la velocidad del cuerpo de agua receptor.

Debido a la variación de la velocidad y dirección de las corrientes, incluidas las fluctuaciones aleatorias de éstas, el transporte de la pluma a un lugar determinado, es muy intermitente.

En el caso de descarga en la Laguna Mar Chiquita aquí desarrollado, se utilizó el módulo Water Quality del software Delft3D para determinar el destino del efluente descargado por el emisario, teniendo en cuenta las velocidades y dirección de las corrientes originadas por el viento, centrando el estudio de la pluma en el campo lejano.

5.4. Calidad de agua

5.4.1. Caracterización de las Aguas Residuales (AR)

Se distinguen 3 tipos de aguas residuales, a saber:

- **Aguas residuales domesticas:** Líquidos provenientes de las viviendas, edificios comerciales e institucionales.



- **Aguas residuales municipales:** residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratada en una planta de tratamiento municipal.
- **Aguas residuales industriales:** Aguas residuales provenientes de la descargas de industrias de manufacturas.

A las aguas residuales domésticas y municipales se las denomina aguas o Líquidos cloacales.

5.4.2. Caracterización de los líquidos cloacales

Los líquidos Cloacales se caracterizan por caracteres físicos, químicos y microbiológicos: (Sorriqieta, 2010)

1) Características **Físicas:**

- a) Temperatura.
- b) Olor: amoníaco, sulfuras, escatol, mercaptanos.
- c) Color según su condición: fresco, viejo, séptico.

2) Características **químicas:**

- a) Materia orgánica: Hidratos de carbonos, proteínas, grasas.
- b) Materia inorgánica: Principalmente cloruros, sulfatos y fosfatos de sodio, calcio, magnesio y potasio.
- c) Agentes tenso activos: sulfatos de alquilo lineales (biodegradables)

3) Características **microbiológicas:**

- a) Bacterias entéricas (flora intestinal).
- b) Bacterias enteropatógenas.
- c) Parásitos.

5.4.3. Características de las aguas residuales

Toda caracterización de aguas residuales implica un programa de muestreo apropiado para asegurar representatividad de la muestra y un análisis de laboratorio de conformidad con normas estándares que aseguren precisión y exactitud en los resultados. Hay que



recordar que cada agua residual es única en sus características y que en lo posible, los parámetros de contaminación, deben evaluarse en el laboratorio para cada agua residual específica. (Rojas, 2010)

Se describen a continuación las más importantes para el caso de estudio del siguiente informe, o sea, las características microbiológicas:

- **Caracterización bacteriológica**

Más que caracterizar a cada organismo patógeno por separado, se prefiere usar a los microorganismos como indicadores, los cuales no tienen necesariamente una relación directa con el número de patógenos, sino que se dirige más a evaluar el grado en el que ha sido contaminado con heces humanas o de animales de sangre caliente (contaminación fecal). Entonces tenemos:

- **COLIFORMES:** Grupos de bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram (-) (En microbiología, se denominan bacterias gramnegativas aquellas que no se tiñen de azul oscuro o de violeta por la tinción de Gram, y lo hacen de un color rosado tenue), no esporógenas, baciliformes, que fermentan la lactosa formando gas, en un período de 48 horas a 35 °C.
- **COLIFORMES FECALES:** Subgrupo del anterior, en el que estarían los microorganismos con mayor probabilidad de haberse originado en los intestinos. Ambos grupos se los determina por el método del número más probable (NMP). Otra forma de determinar coliformes sería por el método de Filtración por Membrana. Las bacterias coliformes detectadas por las dos técnicas no siempre son exactamente las mismas. En general se acepta que el método de filtración por membrana tiene como ventaja respecto del NMP la reproducibilidad.
- **ESTREPTOCOCOS FECALES:** Puede servir para conocer la fuente probable de contaminación, la relación coliformes / estreptococos, es siempre mayor a 4.0 en aguas residuales domésticas, mientras que la relación para las aguas residuales de granja (donde se vuelcan heces de aves de corral, gatos, perros y roedores) es menor a 0.7.

5.4.4. Transmisiones de enfermedades relacionadas con el agua



Aquí se resumen las enfermedades que se relacionan íntimamente con el agua, de manera de tener una idea más clara de los riesgos para la salud relacionada con este recurso renovable. (Gilda, 2010)

- **Enfermedades microbiológicas transmitidas por el agua:** el organismo patógeno se encuentra en el agua. Cuando se ingiere una dosis suficiente genera infección. La mayoría de estos patógenos provienen de la contaminación del agua con excretas humanas. Las enfermedades más importantes de este tipo incluyen: disentería amebiana, Lashigellosis, Cólera, diarreas del tipo E. Coli, diarreas virales, Hepatitis A y la fiebre tifoidea.
- **Enfermedades químicas transmitidas por el agua:** Enfermedades asociadas a la ingestión de agua con sustancias tóxicas en concentraciones dañinas. Estas pueden ser de origen natural o artificial. La mayor importancia radica en países industrializados y es común que sean de evolución crónica. Ejemplo: Nitratos por el riesgo de formación de nitrosaminas cancerígenas y el riesgo de metahemoglobinemias.
- **Enfermedades relacionadas con la higiene:** Enfermedades evitables si se dispone de agua segura y en cantidad suficiente para la higiene personal y doméstica. Como ejemplo, podemos citar enfermedades de la piel como la tina, y de los ojos, el tracoma. Pueden también incluirse enfermedades asociadas a la infestación por insectos como la sarna y la pediculosis.

Enfermedades transmitidas a través del contacto con el agua: Transmitidas a través del contacto con la piel con agua infestada con organismos patógenos. La más importante de estas enfermedades es la esquistisomiasis.

Enfermedades con vector de hábitat acuático: En este grupo se incluyen aquellas enfermedades que dependen en parte del ciclo vital de vectores acuáticos. Ej.: Malaria (asociada a mosquitos).



5.4.5. Principal parámetro indicador de la calidad de agua para emisarios submarinos: los Coliformes.

Los Coliformes, hablando de aguas residuales, se han vuelto un indicador de calidad del agua, debido a que es una bacteria propia de la materia fecal. En ese sentido, del conocimiento de su cantidad, se deduce la calidad del agua.

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana, debido a que estos son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal, tanto del hombre como de los animales de sangre caliente. Estos permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que estos últimos en los sistemas de desinfección (Pulido, 2005).

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales (*Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacte*), viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales, siendo los coliformes fecales (*Escherichia*) de origen intestinal (Canosa de Barrero, 1995). Todos pertenecen a la familia Enterobacteriaceae, son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulantes, fermentadores de lactosa con producción de gas.

Todos ellos constituyen aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales. Las bacterias del tracto intestinal no suelen sobrevivir en el medio acuático, están sometidas a un estrés fisiológico y pierden gradualmente la capacidad de producir colonias en medios diferenciales y selectivos. **Su velocidad de mortalidad depende de la temperatura del agua, los efectos de la luz solar, las poblaciones de otras bacterias presentes, y la composición química del agua.** La presencia de coliformes en el agua indica la contaminación bacteriana reciente y constituye un indicador de degradación de los cuerpos de agua (Fernández A, Molina M, Álvarez A, Alcántara M, Espigares, 2002).

Los coliformes fecales se denominan termo tolerantes, por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas. Esta denominación, está ganando más adeptos, pues sería una forma más apropiada de definir este subgrupo, que se diferencia de los coliformes totales, por la característica de crecer a una temperatura superior. La capacidad de reproducción de los coliformes fecales fuera del intestino de los animales homeotermos es favorecida por la existencia de condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, etc. Estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones oportunistas en el tracto respiratorio superior e inferior, además de bacteriemia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica aguda y otras enfermedades severas en el ser humano. (Moore J, 2002)



Para las simulaciones de descarga realizadas en este trabajo, se utilizó la *Escherichia Coli* como agente contaminante y, por ende, como parámetro indicador de la calidad del agua de la laguna, analizando sus valores de acuerdo a los límites establecidos según las normativas vigentes, las cuales se detallan a continuación.

5.5. Calidad de aguas para baño y uso recreacional

Las normas locales de diferentes provincias y 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: método estadístico que indica el valor más próximo al número real de gérmenes presentes en una muestra) 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 *Escherichia Coli* para aguas dulces y a los *Enterococos* para aguas saladas (EPA, 2003).

La sobrevivencia de las bacterias coliformes en agua de mar y en agua dulce fue estudiada por Chamberlin y Mitchell (1978), quienes hallaron que el tiempo en que el 90% de las bacterias mueren (T90) era igual a 2,2 h para agua de mar, mientras que para agua dulce era igual a 57,6 h (Dufour, 1984).

Otros investigadores comprobaron que, en condiciones de laboratorio, los *Enterococos* presentaban un T90 igual a 47 h en agua de mar y a 71 h en agua dulce, mientras que la *Escherichia Coli* presentaba un T90 igual a 18 h en agua de mar y a 110 h en agua dulce (Dufour, 1984).

Las observaciones mencionadas explican, en parte, la diferencia apreciada en las tasas de enfermedades gastrointestinales en bañistas de agua dulce y agua marina, poniendo de manifiesto la necesidad de contar con pautas diferenciadas de calidad microbiológica para recreación humana en ambientes de agua dulce y de agua de mar. (Desarrollos de niveles guías nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a *Escherichia Coli*/*Enterococos*. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Diciembre 2003)



5.5.1. 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 el emisario submarino de Mar del Plata, expuestos en el título 5.2 del presente informe. 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. Ambos proyectos fueron estudiados por el Laboratorio de Hidráulica de la UNC.

5.5.2. 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).

Se entiende 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, como así también la manera de determinarlos.

En lo que respecta a este estudio, interesan los parámetros microbiológicos 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 del Parlamento Europeo y Consejo.

5.5.3. 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 5.1* 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
Escherichia Coli (UFC/100 ml)	500(*)	100(*)	900(**)	ISO 9308-3 o ISO 9308-1

Tabla 5.1 – 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.

5.5.4. 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 Nº 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 Nº 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.

5.5.5. 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 13 dice que *toda descarga de efluentes líquidos que pueda causar impacto en los cuerpos receptores, definidos en el artículo 4, deberá cumplir los estándares de efluentes que se fijan en el presente decreto y contar con la autorización expresa de la Autoridad de Aplicación, a través de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación.*

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 26** 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 extraen algunos fragmentos del ANEXO I y del ANEXO III, que tratan de los estándares del agua residual y de los tipos de reúsos posibles:



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 5.2* 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 5.2 – 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*.

• OBSERVACIONES PARA CURSOS DE AGUAS SUPERFICIALES

Coliformes Totales: En caso de que la autoridad de aplicación lo considere necesario la **descarga** deberá tener menos de 5.000 NMP de bacterias coliformes por 100 mL (porque así lo exige el uso del cuerpo receptor).

Coliformes Termotolerantes: En el 80% de las muestras colectadas los valores indicados constituyen el nivel máximo admisible a una distancia de por lo menos 500 metros de una playa o área destinada a deportes náuticos, debiéndose restringir el desarrollo de los mismos en un radio de 500 metros alrededor del punto de descarga, lo cual deberá estar correctamente señalado.

Aspectos estéticos: En el punto de descarga no deberán observarse sólidos flotantes, aceites, espumas, ni olores ofensivos.

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 5.3*, según el Tipo de Reúso, que son ocho en total, explicados en el ANEXO III.

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

Tabla 5.3 – Estándares del efluente para reúso. Decreto 847 (2016).

a: Especies Ascaris y Trichuris y anquilostomas

b: Durante el período de riego

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 procesan comercialmente (**Tipo 3**): Riego de cualquier cultivo comestible, incluyendo aquellos que se consumen crudos.



- Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan 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.

5.5.6. Legislación utilizada para análisis de resultados

Para este informe se tendrán en cuenta lo estipulado en la Ley Provincial 10.208 y en el Decreto 847 complementario a la misma, tomando como límites los valores de la tabla 5.2. Se menciona 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.

5.6. El caso de Mar chiquita

Como se habló en la introducción, la Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa, por su magnitud, es la cuenca endorreica más importante de la República Argentina, por ende, de la provincia de Córdoba. Sus aguas varían entre mesosalinas (20-50 g/L) a hipersalinas (>50 g/L), reuniendo características muy similares al agua de mar, pudiéndose pensar como receptor final de aguas residuales transportadas por emisarios submarinos, previamente tratadas en una planta depuradora.



La hipotética planta depuradora, como se mencionó en los objetivos de este estudio, se ubicaría en la localidad de Miramar y serviría a las 4 localidades antemencionadas en la descripción general de la zona de estudio (ver figura 2.7, página 9) a saber:

- Miramar : - (30° 55' 3,75" S, 62° 40' 43,40" O, elevación: 71 m)
- Balnearia : - (31° 00' 30,20" S, 62° 39' 58,04" O, elevación: 87 m)
- Marull : - (30° 59' 38,07" S, 62° 49' 31,34 O, elevación: 91 m)
- La Para : - (30° 53' 32,51" S, 62° 59' 58,64" O, elevación: 92 m)

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.

El caudal de diseño del emisario será proporcional a la población a abastecer, calculada para un 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 localidad. Para la cuantificación de la población turística, se basó en datos de hospedajes, cabañas y hoteles de la zona. (Muchiut, 2016)

5.6.1. 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.

5.6.2. Población Futura

En base al periodo de proyecto determinado, se estimó el número de habitantes a servir para el año 2040. Para hacerlo se utilizó el método de crecimiento a interés compuesto:

$$P_f = P_a \times (1 + r)^n \quad 5.5$$



Donde P_f es la población futura a calcular; P_a la población actual; r la tasa de crecimiento y n el período de diseño (30 años).

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

$$r_i = \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{1/m} - 1 \quad 5.6$$

Donde r_i es la tasa intercensal del período i ; P_{i+1} la población en el período $i+1$; P_i la población del período i y m 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 5.4*. Los cálculos de los índices intercensales promediados se muestran en la *Tabla 5.5* y los valores de población futura en la *Tabla 5.6*.

Localidad	Población (INDEC 1991)	Población (INDEC 2001)	Población (INDEC 2010)
Marull	1404	1765	1791
La Para	2263	3021	3404
Miramar	1800	1979	2023
Balnearia	4783	5585	6105

Tabla 5.4 – Cantidad de habitantes. INDEC 1991, 2001 y 2010.

Localidad	Tasas intercensales		Tasa promedio
	relación 91/01	relación 01/10	
Marull	0,0231	0,0016	0,0124
La Para	0,0293	0,0134	0,0213
Miramar	0,0095	0,0024	0,0060
Balnearia	0,0156	0,0099	0,0128

Tabla 5.5 – Tasas intercensales promediadas.



Localidad	Población futura
Marull	2591
La Para	6412
Miramar	2420
Balnearia	8936

Tabla 5.6 – Población futura por localidad.

Sumando a estos valores una población turística estimada en 2.500 personas, en base a la actual máxima, más un porcentaje del 50% para prever la situación futura, la población futura será de:

$$P_f = 24.109 \text{ habitantes}$$

5.6.3. Caudal de Proyecto

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

$$Q_c = 0,80 \times Q_a \quad 5.7$$

Donde Q_c : caudal de líquido cloacal de diseño; **0,80**: coeficiente de vuelco, representa un factor de corrección para tener en cuenta que no todo el caudal de agua suministrada termina en la red cloacal, según el AySA (Agua y Saneamientos Argentinos) su valor puede tomar 0,7 a 0,8. Adoptamos 0,8 por ser lo más desfavorable. Q_a : caudal de agua suministrada a la población.

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

$$Q_a = \alpha_1 \alpha_2 D P_f \quad 5.8$$

Donde α_1 es el 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); α_2 el 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 y P_f la población futura, al año 2040.



Del producto entre los coeficientes α_1 y α_2 resulta un nuevo coeficiente, α , 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:

$$Q_c = 0,80 Q_a = 0,80 \times 1,8 \times 350 \frac{\text{litros}}{\text{hab.día}} \times 24.109 \text{ hab}$$

Donde 1,8 es el coeficiente α previamente mencionado, 350 litros por habitante y por día es la dotación típica supuesta en asentamientos de este tipo en situación de verano y 24.109 la población futura calculada anteriormente. Con estos valores:

$$Q_c = 12.150.936 \frac{\text{litros}}{\text{día}} \cong \mathbf{0,14} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

El caudal evidentemente es bajo respecto de los calculados para otros emisarios más importantes, como lo es el de Mar del Plata, en el cual se ha verificado con caudales de hasta 9 m³/s.

En este informe se utilizará, a fin de interpretar los resultados de la simulación de las descargas, un caudal mínimo de 0,25 m³/s, similar al máximo de cálculo para el emisario de Puerto Madryn presentado anteriormente.

6. Herramienta de modelación numérica Delft3D

El software utilizado para este trabajo ha sido *Delft3D*, desarrollado por *Deltares-Delft* en los Países Bajos, el cual permite la modelación hidrodinámica a régimen no permanente del flujo en una, dos y tres dimensiones. Dicho programa incorpora también los efectos de las mareas, los vientos, la presión atmosférica, las diferencias de densidad (debido a la salinidad y temperatura), las olas y las turbulencias, permitiendo la simulación del flujo, con o sin transporte de sedimentos, teniendo en cuenta la morfología variable o fija. El esquema numérico de resolución es en diferencias finitas, utilizando coordenadas rectangulares o curvilíneas. Permite además la generación de un dominio de cálculo con mallas de diferentes grados de refinamiento.

Delft3D está compuesto por un conjunto de módulos, cada uno de los cuales cubre cierto rango de aspectos de la investigación o problemas ingenieriles. Cada módulo puede ser ejecutado de manera independiente o en combinación con otros módulos. La



información es intercambiada automáticamente entre los módulos a través de archivos de comunicación que permiten la interacción de los diferentes procesos.

Este poderoso software representa uno de las plataformas más utilizada por la consultoría internacional, contando con cientos de estudios alrededor del mundo.

Para estudios de calidad de agua se requiere como mínimo: El módulo Hidrodinámico (3DFLOW) y el módulo de Calidad de aguas (WAQ).

6.1. Módulo hidrodinámico: 3DFLOW

El modelo hidrodinámico (Módulo FLOW) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno, es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el k-l o el k-ε (Uittenbogaard, van Kester y Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial (horizontal) del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, entrada de ríos) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de los ríos, punto de toma de agua).

En cada problema examinado se considera un intervalo temporal apropiado determinado por el tipo de problema involucrado y estimado con el cálculo del número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL, ver Ecuación 6.1) para no afectar a la calidad de la solución (Delft3D-Flow, 2011).

En el contexto del trabajo expuesto, se usó fundamentalmente el módulo FLOW, para el estudio de campos de flujos hidrodinámicos.

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} < 10 \quad 6.1$$

Donde Δt es el paso de tiempo, g es la aceleración de gravedad, H es el tirante medio,



$\{\Delta x, \Delta y\}$ es un valor característico de las dimensiones de la malla en ambas direcciones, comúnmente el valor mínimo.

Las coordenadas esféricas son un caso especial de las coordenadas curvilíneas ortogonales. En coordenadas curvilíneas, la ecuación de continuidad promediada está dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad 6.2$$

Donde Q representa el caudal por unidad de área, U y V son las velocidades horizontales promediadas en la vertical, d es la profundidad por debajo de un nivel de referencia, ζ es el nivel del pelo libre con respecto a un nivel de referencia, ξ y η representan las coordenadas cartesianas curvilíneas, $G_{\eta\eta}$ y $G_{\xi\xi}$ se relacionan con el radio de la Tierra R y la latitud φ .

Por otra parte, las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones curvas ξ y η están dadas por las expresiones a continuación respectivamente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v\nu \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad 6.3$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v\nu \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad 6.4$$

Donde u , v y w son las velocidades locales según las tres direcciones principales ξ , η y σ , f es el parámetro de Coriolis, σ es la coordenada vertical escalada. Las variaciones de densidad son despreciables, excepto en los términos de la presión P_ξ y P_η . Las fuerzas F_ξ y F_η representan el balance de las tensiones de Reynolds horizontales. M_ξ y M_η representan la contribución debido a las fuentes o sumideros externos de cantidad de movimiento. Las tensiones de Reynolds son modeladas usando el concepto de viscosidad turbulenta.

El coeficiente de viscosidad vertical está definido por:

$$v_\nu = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_\nu^{back}) \quad 6.5$$



donde ν_{mol} se corresponde a la viscosidad cinemática del agua, ν_{3d} es la componente de la viscosidad turbulenta en la vertical, ν_v^{back} es la background eddy viscosity (es un mínimo valor asignado a la contribución turbulenta).

Usualmente, las celdas de la grilla son muy amplias y el paso del tiempo es muy grande para resolver la turbulencia. El proceso de turbulencia es un proceso de sub-escala de malla por lo que se deberá elegir las ecuaciones necesarias para asegurar el cierre del modelo.

En simulaciones con las ecuaciones del método RANS, la redistribución de la cantidad de movimiento debido a la variación vertical de la velocidad horizontal es denotada como dispersión.

En modelos 2D, las aceleraciones verticales son despreciadas en la ecuación de la cantidad de movimiento. Los coeficientes de viscosidad y de difusión de fondo horizontal 2D, ν_H^{back} y D_H^{back} , deben ser especificados por el usuario en el menú del programa. Adicionalmente, delft3D, contiene el modelo de turbulencia en 2D denominado HLES.

En modelos 3D, la velocidad vertical es computada desde la ecuación de continuidad. Además la viscosidad turbulenta ν_H , esta principalmente asociada a la contribución del movimiento de la turbulencia horizontal y es mayor que la viscosidad turbulenta vertical ν_v por la superposición de tres partes:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_v + \nu_H^{back} \quad (6.6)$$

Una parte debida a la turbulencia horizontal asociada a la sub-escala de malla (ν_{SGS}), otra debida a la turbulencia en 3D (ν_v) y la última debida a la dispersión asociada al método RANS (ν_H^{back}).

Los modelos de cierre del Delft3D para determinar la viscosidad y la difusión turbulenta (Delft3D-Flow, 2011) son:

- a) de coeficientes constantes;
- b) algebraico;
- c) k - l;
- d) k - ϵ .



6.2. Módulo de Calidad de agua: WAQ (Water Quality)

El módulo D-Water Quality resuelve las ecuaciones de transporte para los procesos físicos, bioquímicos y biológicos actuantes en el modelo. Para ello es necesario definir el transporte y los procesos intervinientes, luego el modelo se encarga del resto.

La ecuación matemática de advección-difusión-reacción, forma la base del módulo de calidad de agua.

Como el modelo hace uso de elementos computacionales y pasos de tiempo discretos, esta ecuación analítica no puede ser aplicada directamente. Por lo tanto, se debe realizar la discretización numérica y la definición de los principios básicos para describir el proceso de transporte y calidad de agua.

D-Water Quality administra el balance de masa de variables de estado seleccionadas, tales como oxígeno disuelto, nitrato o el cadmio. Lo hace para cada celda computacional. La masa transportada por el flujo de agua desde una celda a la próxima, sirve como término negativo en el balance de masa de la primera celda computacional y como término positivo en la segunda; por lo cual el método es de conservación de la masa por definición. Mediante la combinación de celdas de cálculo en una, dos y tres dimensiones, cada sistema de agua puede ser representado y las sustancias ser transportadas por este sistema a través de las mismas celdas.

Para proceder a un paso de tiempo ($t + \Delta t$), el módulo resuelve la ecuación de balance de masa para cada celda computacional y para cada variable de estado. Esta ecuación es una representación simplificada de la ecuación de la advección-difusión-reacción.

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{Tr} + \Delta t \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P + \Delta t \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S \quad 6.7$$

Con

M_i^t : masa en el inicio de un paso de tiempo

$M_i^{t+\Delta t}$: masa en el final de un paso de tiempo

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{Tr}$: cambios por transporte

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P$: cambios por procesos físicos, bioquímicos o biológicos

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S$: cambios por las fuentes (por ejemplo, cargas de desechos, descarga de los ríos, etc.)



Los cambios en transporte incluyen tanto el transporte por advección y dispersión, que es el transporte por corrientes de agua y el transporte como consecuencia de las diferencias de concentración, respectivamente. El flujo de agua es derivado del modelo hidrodinámico Delft3D – FLOW, como así también la dispersión en la dirección vertical, importante esta, cuando la columna de agua está estratificada. La dispersión en la dirección horizontal debe ser definida por el usuario.

Ecuación de advección-difusión

Un modelo de calidad de agua, no es de hecho más que un balance de masas de los contaminantes o variables de estado necesarias para describir el problema en cuestión.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{advección} + \text{dispersión} + \text{fuentes} \quad 6.8$$

El término fuente se compone, por ejemplo, de ingresos directos y/o mortalidad (por bacterias), de la descomposición (por DBO), la sedimentación (para partículas sólidas), etc.

Transporte advectivo

El transporte por advección a través de un intercambio se puede dar como:

$$T_{x_0}^A = v_{x_0} \times A \times C_{x_0} \quad 6.9$$

Con

$T_{x_0}^A$: transporte advectivo para $x = x_0$ [g/s]

v_{x_0} : velocidad para $x = x_0$ [m/s]

A : área de superficie para $x = x_0$ [m²]

C_{x_0} : concentración para $x = x_0$ [g/m³]

Se supone que las velocidades y las concentraciones son un valor medio representativo para toda la superficie. Cuanto menor sea la sección transversal, mejor es la suposición.

Transporte dispersivo

El transporte por dispersión a través de un intercambio se supone que es proporcional al gradiente de concentración y a la superficie.



$$T_{x_0}^D = -D_{x_0} \times A \times \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad 6.10$$

Con

$T_{x_0}^D$: transporte dispersivo para $x = x_0$ [g/s]

D_{x_0} : coeficiente de dispersión para $x = x_0$ [m²/s]

A : área de superficie para $x = x_0$ [m²]

$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_0}$: gradiente de concentración para $x = x_0$ [g/m⁴]

La dispersión se realiza de acuerdo con la ley de difusión de Fick. La constante de proporcionalidad D se denomina coeficiente de dispersión (o difusión). El signo menos se origina en el hecho de que la dispersión provoca transporte neto de mayores a menores concentraciones, por lo que se da en la dirección opuesta del gradiente de concentración.

El gradiente de concentración es la diferencia de las concentraciones por unidad de longitud:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C_{x+\frac{1}{2}\Delta x} - C_{x-\frac{1}{2}\Delta x}}{\Delta x} \quad 6.11$$

Transporte a partir de fuentes

El transporte de los contaminantes a partir de fuentes está dado por la siguiente expresión, independientemente del método numérico aplicado:

$$T_{src} = Q_{src} \times C_{src} \quad Q_{src} > 0 \quad 6.12$$

Con C_{src} la concentración y Q_{src} el flujo de descarga

El modelo mezcla los contaminantes de la descarga en el segmento de calidad del agua receptora.

6.2.1. Modelo de decaimiento bacteriano D-Waq

El modelo de decaimiento bacteriano, se basa en el modelo de decaimiento bacteriano de Mancini, publicado bajo el título "Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions" en 1978, en el cual, desarrolla una relación que puede ser utilizada para generar una estimación de las tasas de mortalidad de coliformes en los cuerpos de agua naturales. Las estimaciones de la tasa de mortalidad pueden incluir los efectos



individuales de la temperatura, el agua de mar, la radiación solar y el coeficiente de extinción de la luz solar.

A continuación se presenta el modelo de Mancini de modo general, para realizar una pequeña descripción de cómo lo utiliza D-Waq.

6.2.2. Modelo de Mancini

La supervivencia, la tasa de decaimiento y la distribución bacteriana, depende del cuerpo receptor (por ejemplo, estuario, lagos, ríos, mar, etc.). Estos fenómenos cinéticos del comportamiento de los organismos después de realizada la descarga, están asociados a (Mueller, 1987):

- la luz del sol;
- la temperatura;
- la Salinidad;
- la Depredación;
- la Deficiencia de nutrientes;
- las Sustancias toxicas;
- asentamiento de los organismos después de la descarga;
- la Resuspensión de partículas asociadas con la sorción de organismos;
- al Crecimiento bacterial en cuerpos de agua

Estos efectos varían y dependen de la situación en que se presentan, por lo cual la tasa de decaimiento K_B (1 / día) se puede escribir como:

$$K_B = K_{B1} + K_{BI} + K_{BS} - K_a \quad 6.13$$

Donde

K_{B1} = tasa de mortalidad básica como función de la temperatura, salinidad y depredación

K_{BI} = tasa de decaimiento debido a la luz

K_{BS} = perdida por resuspensión

K_a = tasa de crecimiento

Es común que esta tasa de decaimiento bacteriana está relacionada con el tiempo, a través del T_{90} , que es tiempo al cual la mortalidad es del 90% (tiempo requerido para que la bacteria decrezca hasta 1/10 de su número original). Debido a que es un decaimiento de tipo exponencial, tenemos que:



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

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad 6.14$$

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

$$C = C_0 e^{-kt} \quad 6.15$$

Donde C_0 es la concentración inicial del sistema.

Si el T_{90} es el tiempo requerido para que la bacteria decrezca en 1/10 de su número original, entonces:

$$0.10 = e^{-K_B (T_{90})} \quad 6.16$$

Es decir:

$$T_{90} = \frac{2.3}{K_B} \quad 6.17$$

Este K_B posee un rango, dependiendo si son virus o bacterias. Generalmente los virus son más resistentes, y poseen un K_B mucho menor.

En la *figura 6.1* se dan valores de la tasa de decaimiento para virus y bacterias.



Organism	K_B (day ⁻¹)	Remarks	Reference ^a
Coliforms			
Total coliform	1–5.5	Freshwater—summer (or 20°C), seven locations	1
	0.8	Average freshwater, 20°C	2
	1.4 (0.7–3.0)	Seawater, 20°C	2
	48(8–84)	From 14 ocean outfalls (variable temperature)	1
Total or fecal	0–2.4	New York Harbor Salinity: 2–18‰ Dark Samples	3
	2.5–6.1	New York Harbor Salinity: 15‰ Sunlighted Samples	3
Fecal coliform	37–110	Seawater, sunlighted	12
<i>E. coli</i>	0.08–2.0	Seawater, 10–30‰	13
Fecal streptococci			
<i>S. faecalis</i>	0.4–0.9	Freshwater—20°C	4
	0.1–0.4	Freshwater—4°C	4
	0–0.8	Kanawha River—20°C	5
	0.3	Stormwater—20°C; 0–3 days	6
	0.1	Stormwater—20°C; 3–14 days	6
	1.0–3.0	Hamilton Bay, Lake Ontario, 18°C; 0–10 days	7
	0.05–0.1	Hamilton Bay, Lake Ontario, 10–28 days	7
<i>S. bovis</i>	1.5	Stormwater—20°C	6
Fecal streptococci	18–55	Seawater, sunlighted	12
Pathogens			
<i>Salmonella typhimurium</i>	1.1	Stormwater—20°C; 0–3 days	6
	0.1	Stormwater—20°C; 3–14 days	6
<i>Salmonella thompson</i>	0.5–3	Hamilton Bay, Lake Ontario; 18°C; 0–10 days	7
	0.1	Hamilton Bay, Lake Ontario; 18°C; 10–28 days	7
Viruses			
Coxsackie	0.77	Lake Wingra, 21–23°C	8
	0.12	Marine waters—25°C	9
	0.03	Marine waters—4°C	9
Echo 6	0.08	Marine waters—25°C	9
	0.03	Marine waters—4°C	9
Polio type 1	0.16	Marine waters—25°C	9
	0.05	Marine waters—4°C	9
	0.26	Lake Wingra, 21–23°C	8
Enteric (polio, Echo, coxsackie)	0.15	Tanana River Alaska, 0°C ice cover	10
	1.1–2.3	Hawaiian Ocean, 24°C	11

^aReferences: (1) Mitchell and Chamberlain (1978); (2) Mancini (1978); (3) Hydroscience (1977b); (4) USEPA (1974); (5) Kenner (1978); (6) Geldreich and Kenner (1969); (7) Dutka and Kwan (1980); (8) Herrmann et al. (1974); (9) Colwell and Hetrick (1975); (10) Dahling and Safferman (1979); (11) Fujioka et al. (1980); (12) Fujioka et al. (1981); (13) Anderson et al. (1979).

Figura 6.1 – Valores K_B para virus y bacterias. Principles of surface water quality modeling and control – Thomann y Mueller – pág. 235

6.2.3. Cómo utiliza D-Waq el modelo de Mancini

El modelo D-Waq utiliza el modelo de Mancini acoplado a las ecuaciones de hidrodinámica resueltas previamente. Una vez resuelta la hidrodinámica exporta un archivo que conlleva alturas, velocidades, pasos de tiempo, enmarcadas en columnas de agua que interactúan con un balance de masa y a partir de esa solución acopla la dispersión, difusión y concentración del contaminante.

Las ecuaciones que se acoplan a la hidrodinámica son:



$$flux = (Mrt E. coli) \times (E. coli) \quad 6.18$$

$$Mrt E. coli = ((Rco + Mrt Cl) \times \vartheta^{T-20} + Mrt Rad) \quad 6.19$$

$$Mrt cl = (Kcl) \times (Cl) \quad 6.20$$

$$Mrt Rad = (Rc rad) \times (DL) \times (I) \times (fuv) \times \left(\frac{1 - e^{(-Ext uv \times (H))}}{Ext uv \times (H)} \right) \quad 6.21$$

En la *tabla 6.1* y *6.2* se resumen las características, unidades y posibles rangos que puedan tomar las variables que utiliza el modelo de Mancini a través del módulo WAQ:

Ítem	Descripción	Unidades	Valor por defecto	Editable	Rango
<i>E. coli</i>	Concentración de Escherichia coli	MPN.m ⁻³	Dato de entrada	n.a.	-
<i>DL</i>	Duración del día	d	0.58	si	Depende de la latitud y la temporada
<i>Ext_{uv}</i>	Extinción total por radiación uv.	m ⁻¹	Derivada del proceso	n.a.	-
<i>fuv</i>	Fracción de radiación UV visible en una columna de agua.	-	0.12	no	-
<i>H</i>	Profundidad del agua	m	tomado de la hidrodinámica	n.a.	-
<i>I</i>	Radiación solar en la capa superior de un segmento	W.m ⁻²	Derivada del proceso	n.a.	-
<i>K_{CL}</i>	Constante de mortalidad relacionada al Cloruro	m ³ . g ⁻¹ . d ⁻¹	1.1 x 10 ⁻⁵	no	-
<i>Mrt cl</i>	Tasa de mortalidad por cloro (sal)	d ⁻¹	n.a.	n.a.	-
<i>Mrt Rad</i>	Tasa mortalidad por radiación	d ⁻¹	n.a.	n.a.	-



Continuación tabla

Ítem	Descripción	Unidades	Valor por defecto	Editable	Rango
<i>Mrt E. Coli</i>	Tasa mortalidad total de E. Coli	d ⁻¹	n.a.	n.a.	-
<i>Rco</i>	Tasa de mortalidad de primer orden de los E. Coli	d ⁻¹	0.8	si	0.8 - 5.0
<i>Rc rad</i>	constante de mortalidad por radiación	m ² .W ⁻¹ .d ⁻¹	0.086	no	-
ϑ	Coefficiente de temperatura de la tasa de mortalidad	-	1.07	no	-
<i>T</i>	temperatura	°C	15	si	Depende de las condiciones locales
<i>(Cl)</i>	concentración cloro derivada de la concentración de sal	g.m ⁻³	<i>Dato de entrada</i>	n.a.	Depende de las condiciones locales

Tabla 6.1 – Variables del modelo de Mancini utilizadas en el módulo Waq. D-Water Quality manual de usuario, pág. 366.

La concentración de cloruro se deriva de la salinidad. La radiación solar en la superficie, varía con la profundidad, la cual se calcula a partir de la radiación total (ver figura 6.2). La extinción de la luz UV depende de la concentración de la materia en suspensión y de la extinción respecto al fondo de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Ext\ uv = Ext\ bak + (Ext\ Im1)(IM1) \quad 6.22$$

$$I = I_0 e^{(-Ext\ uv(H))} \quad 6.23$$

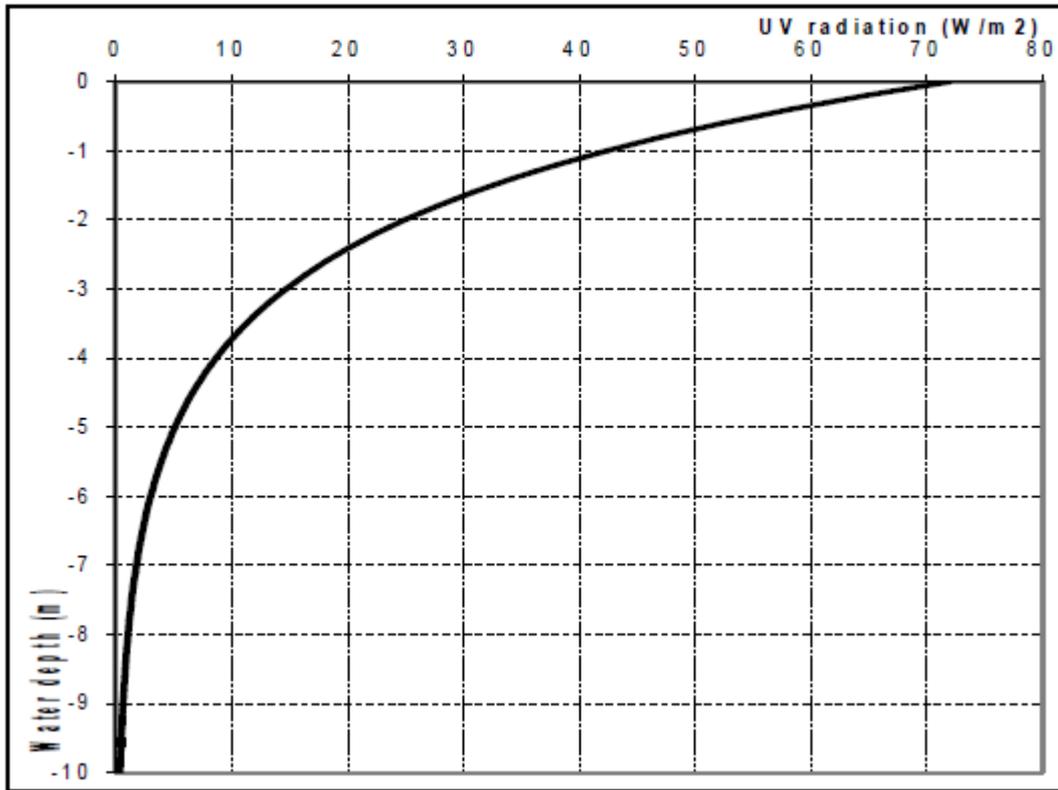


Figura 6.2 – Variación de la radiación solar respecto a la profundidad. D-Water Quality manual de usuario, pág. 367.

Ítem	Descripción	Unidades	Valor por defecto	Editable	Rango
<i>Ext back</i>	Extinción por profundidad	m^{-1}	0.08	si	0.08 - 1
<i>Ext Im1</i>	Coefficiente de extinción de materia inorgánica suspendida	$m^2.g$	0.01	si	0.01- 0.05
<i>IM1</i>	Concentración de materia orgánica suspendida	$g . m^{-3}$	n.a. (variable de estado)	n.a.	-
<i>I₀</i>	Radiación solar total en la superficie del agua	$W.m^{-2}$	160	si	Depende de la latitud y de la temporada

Tabla 6.2 – Variables del modelo de Mancini utilizadas en el módulo Waq. D-Water Quality manual de usuario, pág. 366.



7. Modelación de la hidrodinámica de la laguna Mar Chiquita

La hidrodinámica de la Laguna Mar Chiquita se abordó analizando su comportamiento a través de estudios realizados anteriormente, recabando datos de temperatura del medio, batimetría, densidad, salinidad, etc., tomando como principal factor actuante generador de la hidrodinámica, el viento. Se analizaron datos históricos de viento, tomando dos casos representativos. Luego se realizó el modelado en el módulo Flow del software delft3D con toda la información disponible y se procedió a la simulación numérica en 2D, teniendo como hipótesis un nivel de agua constante; sin entradas ni salidas de caudal; para luego comparar con trabajos ya realizados (donde sí se tuvieron en cuenta aportes y salidas de caudal (Pozzi, 2006)), definiendo la representatividad de los procesos, a fin de fijar una calibración de la simulación.

En base a los resultados obtenidos del comportamiento hidrodinámico en el espejo de agua, específicamente la dirección del flujo y sus velocidades, se fijaron dos puntos de descarga, verificados luego con el desplazamiento de la pluma y las concentraciones admisibles de contaminante, teniendo en cuenta la incidencia sobre las costas turísticas de Miramar y Playa Grande, como así también cuestiones económicas y constructivas, detalladas en el título 7.3.

7.1. Dominio de cálculo

Para la definición de la geometría del cuerpo de la laguna se contó con puntos batimétricos disponible en el laboratorio de hidráulica, con los cuales se vienen realizando diferentes estudios. En la *figura 7.1* se observa la batimetría, representada por las curvas de nivel de profundidades con los límites del mallado propuesto. En la *figura 7.2* se observa la malla interpolada con la batimetría.

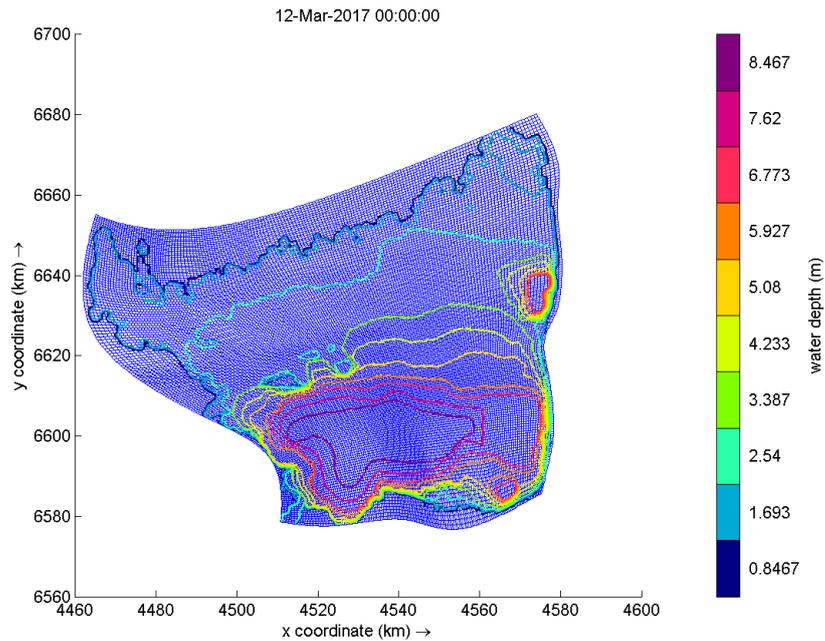


Figura 7.1 – Topografía de la laguna representada por sus curvas de nivel con el mallado propuesto. Quickplot – Delft3D.

La malla de cálculo está compuesta por elementos rectangulares curvilíneos ortogonales, logrando una discretización total en 25921 elementos, de un tamaño medio de 400 m de lado cada uno.

El valor del paso de tiempo computacional Δt adoptado fue de 12 segundos.

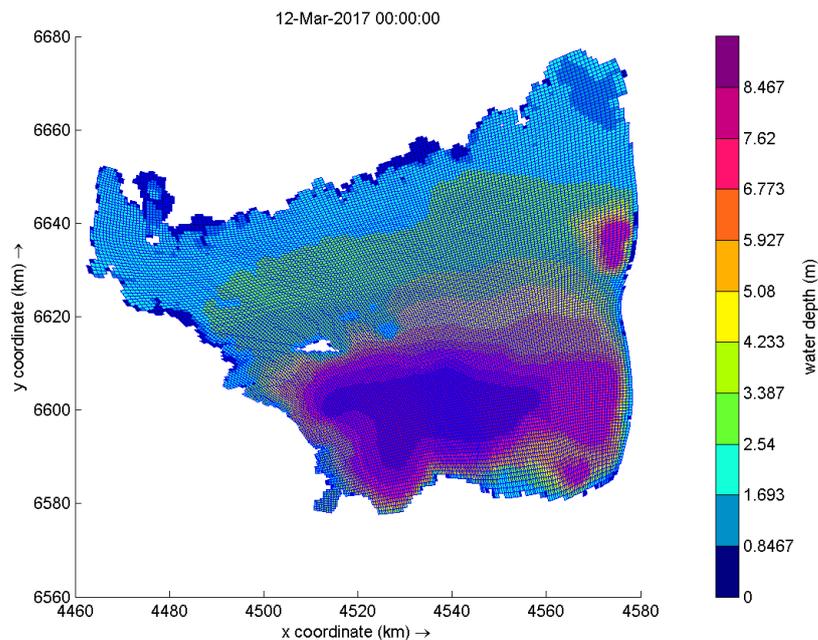


Figura 7.2 – Topografía de la laguna con interpolación de la malla. Quickplot – Delft3D.



7.2. Escenarios

Según lo expuesto en el título 2 del presente informe, los vientos predominantes son del sector Norte y Sur. En base a estudios realizados, se tomaron valores medios en ambas direcciones, iguales a 5 m/s (Cecilia Pozzi, 2006).

Se definieron dos escenarios:

- Escenario N°1: “Viento Norte”
- Escenario N°2: “Viento Sur”

A continuación se detalla cada uno de ellos, en función de las variables de entrada que requiere el módulo Flow del software para realizar el modelado y posterior simulación.

7.2.1. Escenario N°1: “Viento Norte”

Se comentan aquí algunas de las variables requeridas por el módulo Flow del software Delft3D. Luego en la *tabla 7.1*, se resumen los valores utilizados en el módulo FLOW.

- La elección de la dirección del viento se basó según lo explicado en el título 2, donde se describió la zona de estudio, correspondiendo una predominancia del sector norte (16,4%). La velocidad adoptada para el mismo se considera una media en vertical, respecto a estudios realizados (Cecilia Pozzi, 2006).
- La salinidad de la laguna se corresponde con el nivel de agua observado.
- No se cuenta con datos sistemáticos de la temperatura del agua en Mar Chiquita. Las primeras mediciones fueron realizadas entre febrero y marzo de 1890 por Grumbkow (1890), quien encontró valores entre 23 y 24 °C. Los datos más completos provienen de Martínez (1991), quien realizó numerosas mediciones a distintas profundidades. En noviembre de 1986, los valores oscilaron entre 21,2 y 25,0 °C, con una media de 22,9 °C para 19 puntos de muestreo; mientras que en enero de 1989, la media fue de 27,8 °C para 35 puntos de muestreo, con un rango de 23,7–32,3 °C. En invierno (julio) Sagretti y Bistoni (2001) registraron una mínima de 7 °C. Martínez (1991) encontró una leve tendencia a la



disminución de la temperatura del lago con la profundidad. (Limnología física y química. Enrique H. Bucher y Ana E. Bucher. Centro de Zoología Aplicada. Universidad Nacional de Córdoba.)

- Es muy improbable que se desarrolle una estratificación térmica marcada en lagos salinos poco profundos y ubicados en regiones con mucho viento como es el caso de Mar Chiquita, ya que usualmente se produce una mezcla completa de las aguas (condición denominada *polimixis*). Sin embargo, y como se observó en Mar Chiquita, es posible que con ausencia de viento por períodos suficientemente prolongados se produzca alguna estratificación temporaria en las partes más profundas de la laguna (condición denominada *meromixis*). (Limnología física y química. Enrique H. Bucher y Ana E. Bucher. Centro de Zoología Aplicada. Universidad Nacional de Córdoba.)
- Para la densidad del agua se tomó una media, en función de la salinidad y la temperatura.
- El nivel del agua es el máximo tomado en el año 2003.
- La rugosidad se toma uniforme en toda la laguna, a través del coeficiente de Manning, en base al estudio realizado de “Modelación hidrodinámica con apoyo satelital de la circulación en la Laguna Mar Chiquita” (Corral M., Pozzi C., Plencovich G., Hillman G., Pagot M., Rodríguez A., Oroná C.); el cual se toma de referencia para verificar los resultados de la hidrodinámica de este trabajo; donde se definieron dos coeficientes según 2 tipos de materiales (sedimentos), uno corresponde a un factor de rugosidad de Manning de 0,02, adoptado para representar la característica del vaso de la laguna y el otro, de 0,016, adoptado en la zona de influencia de los cauces fluviales de los ríos Dulce, Suquía y Xanaes.
- El tiempo de simulación se estimó en función del tiempo de estabilización del nivel de agua usado, para representar adecuadamente la hidrodinámica y observar la influencia del viento, como así también para lograr un tiempo suficiente en el transporte de la pluma de contaminación en el modelo Waq, ya que como se explicó, el módulo Waq utiliza la hidrodinámica como base para tal representación.



- Respecto a las viscosidades se dejaron los valores por defecto.

Datos de entrada	Valores adoptados
Proceso Hidrodinámico	Viento Norte – vel: 5 m/s
Salinidad del medio	32 ppt (g/L)
Temperatura del medio	23 °C
Densidad del medio	1056 Kg/m ³
Densidad del aire	1,164 Kg/m ³
Nivel de agua	71,4 m
Rugosidad	Manning: 0,02
Tiempo simulado	6 días
Viscosidad de Eddy	1 m ² /s
Difusividad de Eddy	10 m ² /s

Tabla 7.1 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo hidrodinámico con viento Norte en el módulo Flow.

Hipótesis de modelado:

- Flujo estacionario. Nivel de agua constante; sin entradas ni salidas de caudal.
- Como se explicó anteriormente, al considerar la presencia de viento y 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.

7.2.2. Escenario N°2: “Viento Sur”

Los valores adoptados para las variables que necesita el módulo Flow, correspondientes a la situación de viento Sur, son los mismos que el Escenario N°1, modificando solamente la dirección.

En la *tabla 7.2*, se detallan los valores de las variables de la laguna utilizados en el módulo FLOW, del software Delft3D:



Datos de entrada	Valores adoptados
Proceso Hidrodinámico	Viento Sur – vel: 5 m/s
Salinidad del medio	32 ppt (g/L)
Temperatura del medio	23 °C
Densidad del medio	1056 Kg/m ³
Densidad del aire	1,164 Kg/m ³
Nivel de agua	71,4 m
Rugosidad	Manning: 0,02
Tiempo simulado	6 días
Viscosidad de Eddy	1 m ² /s
Difusividad de Eddy	10 m ² /s

Tabla 7.2 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo hidrodinámico con viento Sur en el módulo Flow.

Hipótesis de modelado: iguales al Escenario N°1.

7.3. Resultados

Se exponen a continuación, los resultados obtenidos de la simulación de la hidrodinámica realizada con el módulo Flow para los escenarios definidos.

7.3.1. Escenario N°1

En la *figura 7.3*, se observa que se genera un sentido de circulación prácticamente anti horario, con eje en el centro del cuerpo de la laguna, con un campo de velocidades máximo del orden de 0,10 m/s hacia la zona Oeste de la misma, en proximidades de la isla El Mistolar y el afluente del Río primero. En la zona Este, casi imperceptible, se da un flujo en sentido horario de baja magnitud.

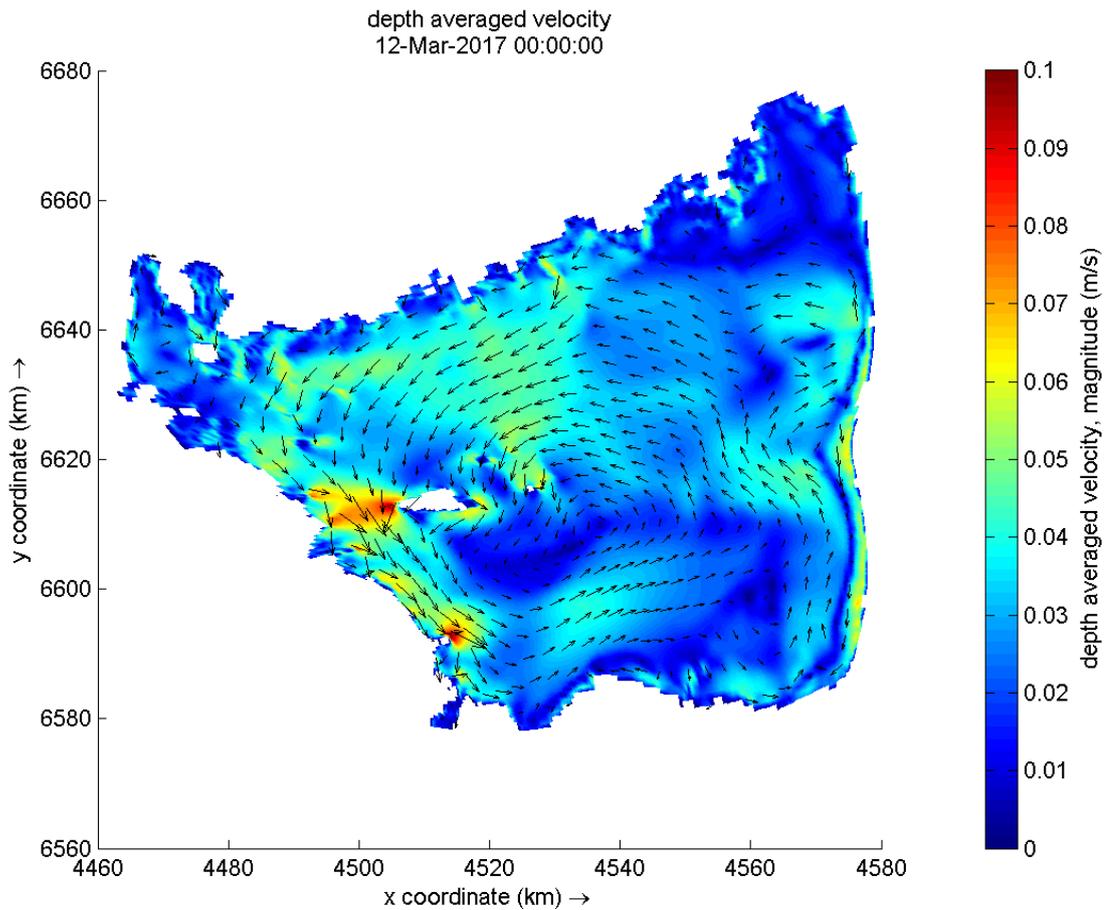


Figura 7.3 – Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.

Comparando con la *figura 7.4*, de estudios realizados, observamos que se da la misma magnitud del campo de velocidades, en el orden de 0,10 m/s, pero se distinguen marcadamente dos celdas principales de circulación, una en sentido horario, ubicada en la franja Este de la laguna, y otra en sentido anti horario, con eje en la Isla del Mistolar, en la franja Centro-Oeste de la laguna.

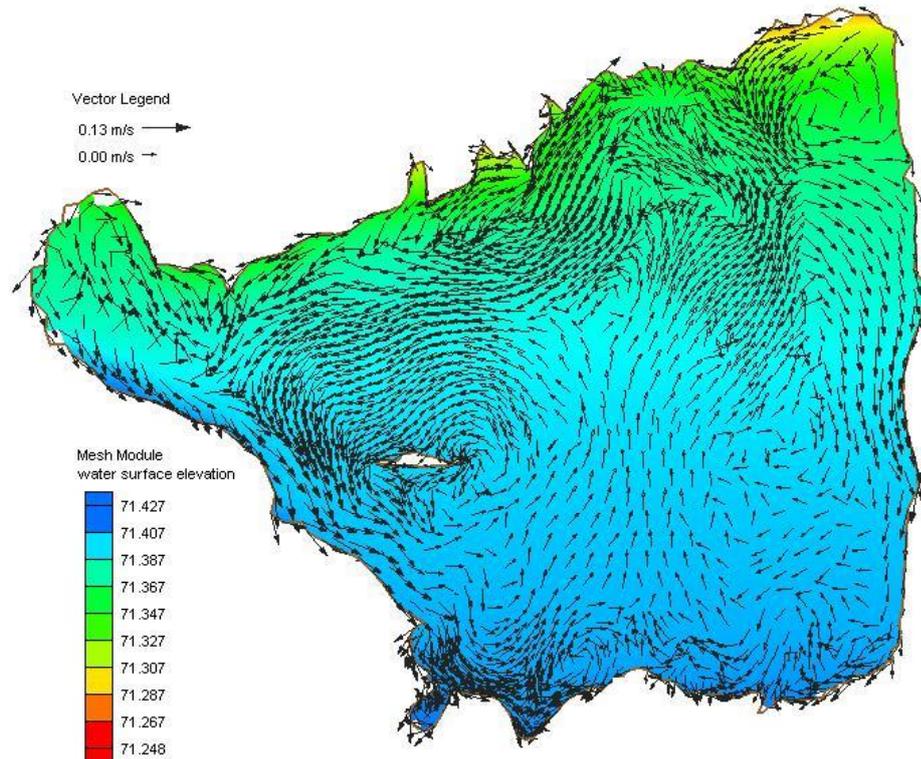


Figura 7.4 – Campo vectorial de velocidades para viento Norte de 5 m/s. Pozzi (2006).

Esta marcada distinción de dos celdas de circulación en el estudio ya realizado, podría deberse a que en el proceso de modelación se tuvieron en cuenta el aporte de caudal por parte de los ríos Dulce, Primero y Segundo, como así también su aporte de sedimentos a la laguna, influyendo este último en la rugosidad y su variabilidad a lo largo del lecho, considerando además, salida de caudal por medio del fenómeno de evaporación (único medio de transporte importante para pérdidas de caudal de la laguna). Todo esto influyó en la definición de las condiciones de borde definiendo un problema a flujo no estacionario. Esta suposición se tendría que demostrar, cosa que está fuera del objetivo de este informe.

A los fines del presente escenario de simulación, la zona correspondiente a las costas de Miramar y alrededores, ver *figura 7.5*, el patrón de flujo es similar, con velocidades muy bajas, que varían entre 0.01 m/s y 0.05 m/s, permitiendo analizar y definir un punto de descarga óptimo para el emisario, desarrollado en el título 7.4 del informe.

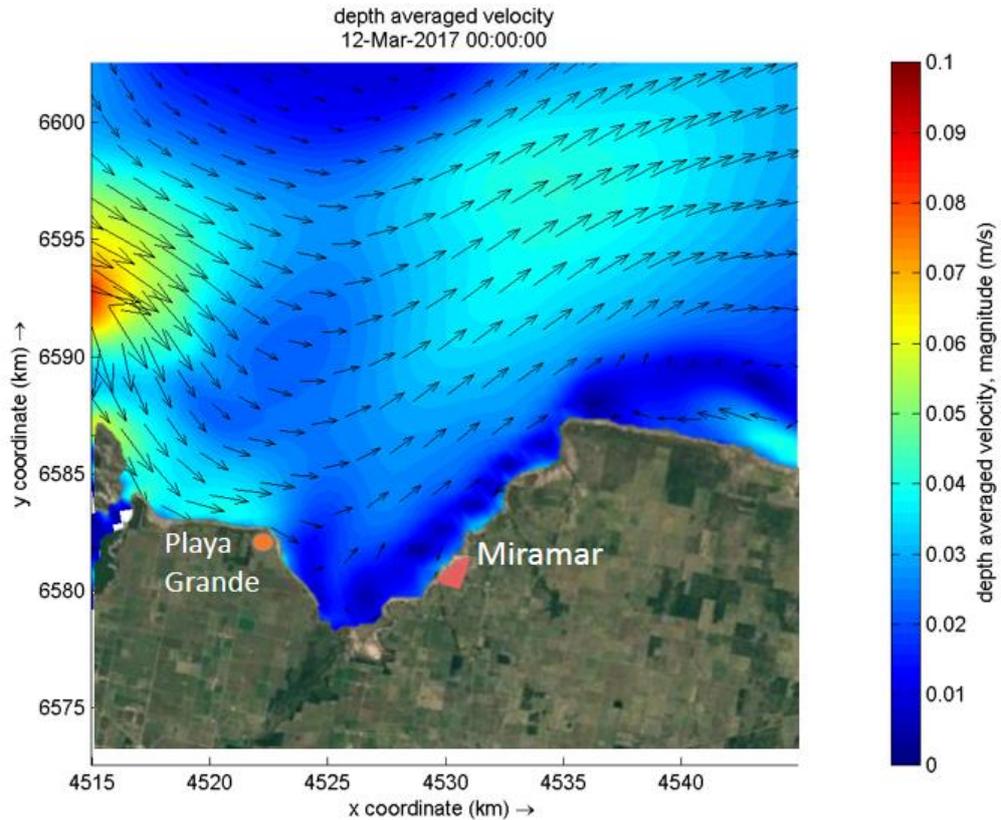


Figura 7.5 – Zona de estudio. Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.

7.3.2. Escenario N°2

En la *figura 7.6*, se observa que el viento Sur genera los mismos efectos que el viento Norte, pero en sentido contrario, con el mismo orden de magnitud del campo de velocidades. Entonces tenemos un sentido de circulación prácticamente horario, con eje en el centro del cuerpo de la laguna, con un campo de velocidades máximo del orden de 0,10 m/s hacia la zona Oeste de la misma, en proximidades de la isla El Mistolar y el afluente del Rio primero.

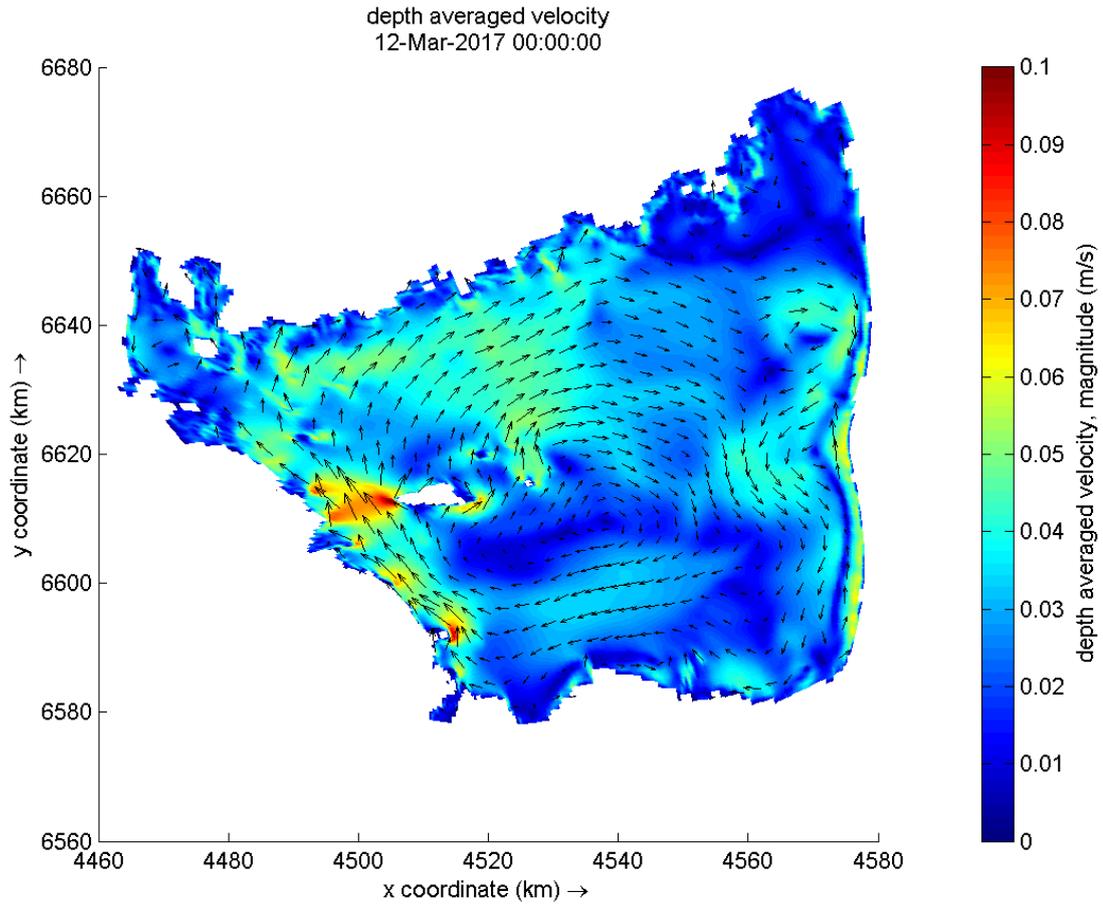


Figura 7.6 – Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.

La comparación con la *figura 7.7*, de estudios realizados, observamos que se da la misma magnitud del campo de velocidades, en el orden de 0,10 m/s, pero se distinguen marcadamente dos celdas principales de circulación, una en sentido anti horario, ubicada en la franja Este de la laguna, y otra en sentido horario, con eje en la Isla del Mistolar, en la franja Centro-Oeste de la laguna.

Estas diferencias son por las mismas causas explicadas en los resultados del Escenario N°1.

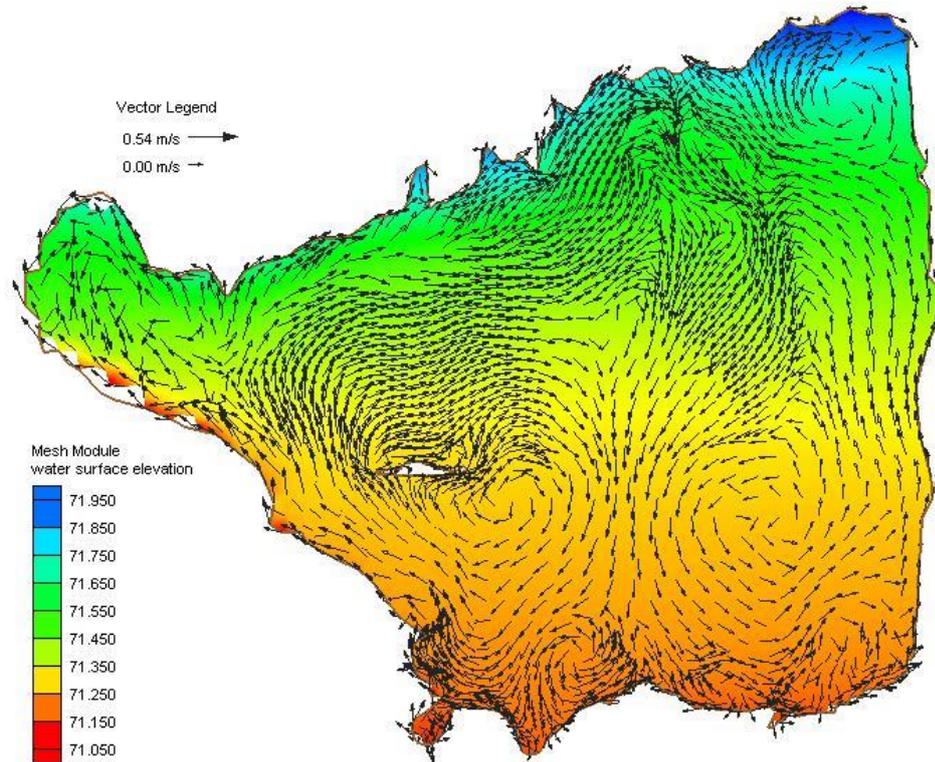


Figura 7.7 – Campo vectorial de velocidades para viento Sur de 5 m/s. Pozzi (2006).

A los fines del presente escenario de simulación, la zona correspondiente a las costas de Miramar y alrededores, *figura 7.8*, el patrón de flujo es similar, con velocidades muy bajas, que varían entre 0.01 m/s y 0.05 m/s, permitiendo analizar y definir un punto de descarga óptimo para el emisario, desarrollado en el título 7.4 del informe.

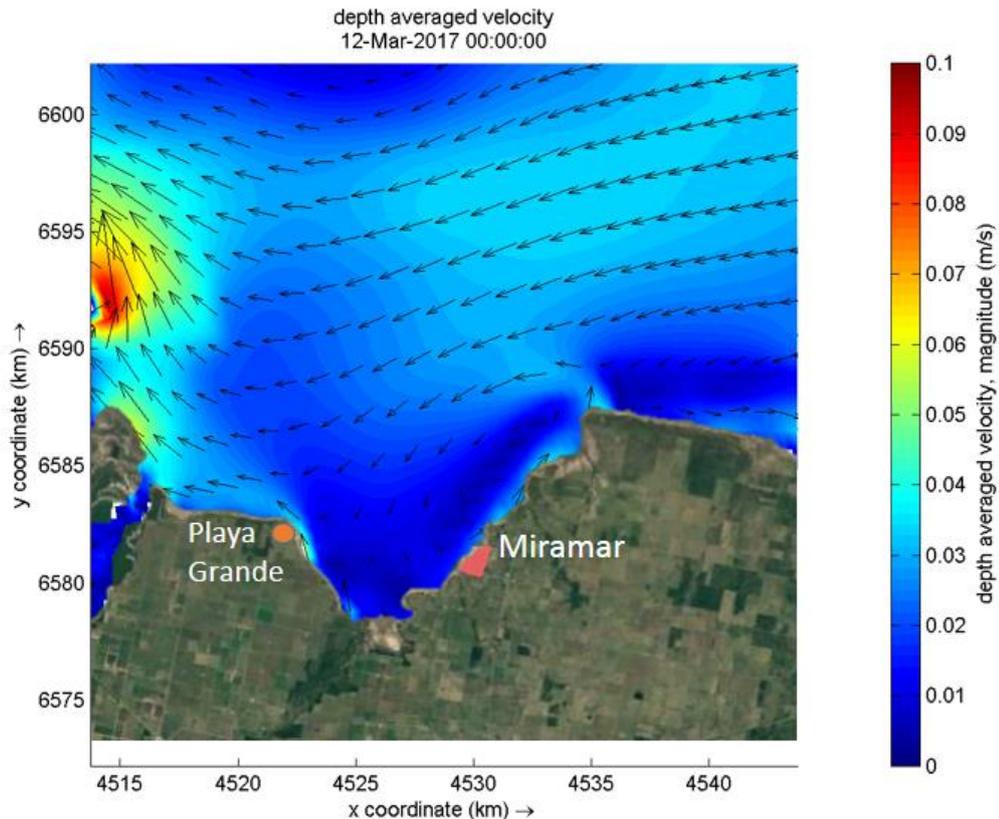


Figura 7.8 – Zona de estudio. Magnitud de la velocidad promediada en la vertical (en colores) y representación vectorial de la circulación del flujo. Flow, QUICKPLOT.

7.4. Ubicación, longitud y profundidad del emisario

De la observación de la hidrodinámica simulada se decidió ubicar el origen del emisario en dos puntos costeros estratégicos, visualizados en la *figura 7.9*. El primero hacia el Noreste de Miramar, denominado “Descarga Este”, y el segundo, cercano a Playa Grande, al Oeste de Miramar y en la costa opuesta, denominado “descarga Oeste”.



Figura 7.9 – Ubicación de los puntos de descarga. Fuente propia y Google Earth.

La descarga Oeste se plantea, ya que se encuentra al Oeste de la población de Miramar, y es el punto más desfavorable para el arrastre de contaminantes hacia sus costas y las actividades que en ellas se desarrollan, ya que debido al Viento Norte (escenario N°1) se tienen fuertes vectores de velocidad paralelos a la costa que llegan a la desembocadura del río Xanaes y alcanzan las costas de Miramar.

Por su parte, la descarga Este, se plantea porque se encuentra al Este de la población de Miramar, siendo el punto más desfavorable para el arrastre de contaminantes, donde aquí el viento Sur (escenario N°2) es el parámetro determinante, generando un flujo de circulación que arrastraría la pluma contaminante hacia sus costas.

La descarga Oeste se encuentra equidistante respecto a las cuatro localidades a servir, lo cual representa claras ventajas económicas en cuanto al tendido de tuberías maestras para llegar con el agua residual al emisario, pero esa zona cuenta con mayor biodiversidad, debiendo analizarse el impacto que generaría.

La descarga Este tiene una clara desventaja en cuanto al tendido y longitud de la red cloacal para la captación de líquidos en la planta depuradora, pero presenta una zona de menor biodiversidad. Además esta última, para el viento Norte, el flujo de agua tiende a



escapar de la costa, para ir hacia aguas profundas (centro de la laguna), consiguiendo claras ventajas en cuanto a la dilución del efluente contaminante.

Por lo expuesto y por cuestiones técnicas y comparativas respecto de otros proyectos similares, se definen las características del emisario para cada una de las ubicaciones posibles:

- Descarga Oeste:
 - Longitud del emisario: 4.000 m,
 - con la boca de descarga a una profundidad de 7,70 m aproximadamente, según el análisis de la batimetría observado en la *figura 7.10*.
 - Las coordenadas de localización son 30° 52' 4,92" S y 62° 44' 58,14 O

- Descarga Este:
 - Longitud del emisario: 3.700 m,
 - Con boca de descarga a una profundidad de 7.90 m aproximadamente, según el análisis de la batimetría observada en la *figura 7.10*.
 - Las coordenadas de localización son 30° 52' 5,70" S y 62° 40' 50,88 O.

Respecto a la longitud del emisario, se tomó la misma en función de la profundidad de la laguna, estando la boca de descarga cercana a la cota máxima, además de considerar colocarla alejada del uso lúdico de las costas de la laguna.

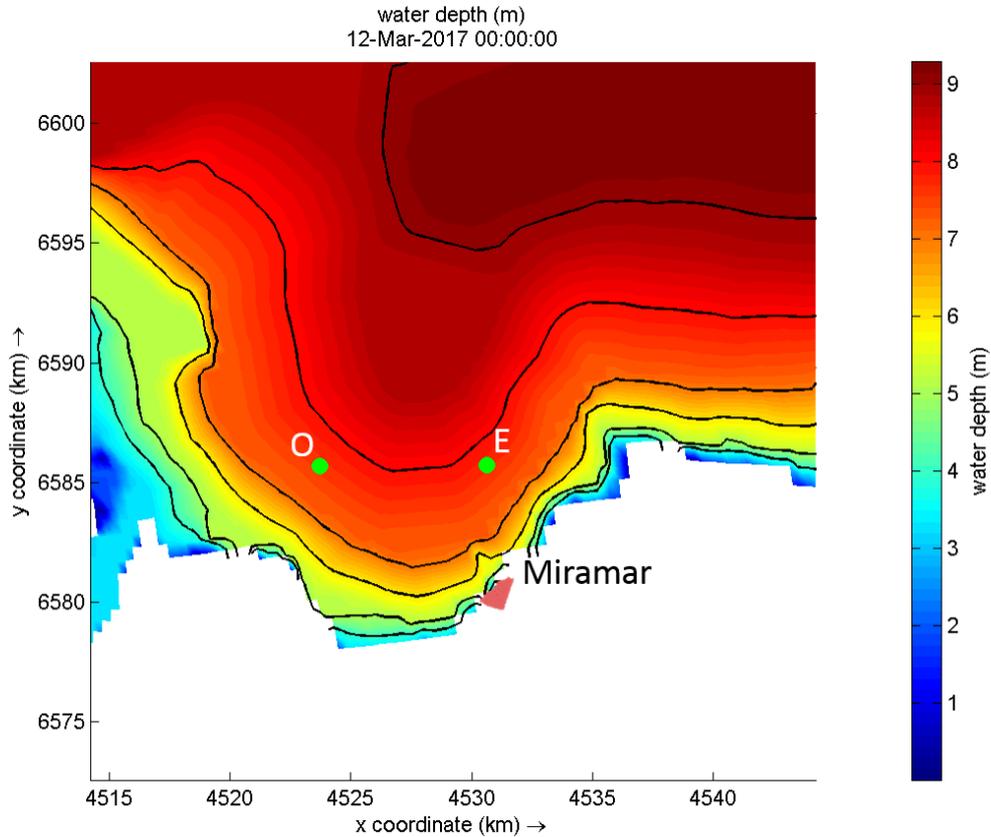


Figura 7.10 – Batimetría y ubicación de los puntos de descarga Este y Oeste.
Flow - Quickplot.

8. Simulaciones de vertidos por emisario submarino en la laguna Mar Chiquita

8.1. Acoplado del módulo Flow y Waq

El modelo D-Waq utiliza el modelo de Mancini, explicado en los títulos 6.2.2 y 6.2.3, acoplado a las ecuaciones de hidrodinámica resueltas previamente. Una vez resuelta la hidrodinámica por medio del módulo Flow, en el mismo se exporta un archivo que conlleva alturas, velocidades, pasos de tiempo y demás, enmarcadas en columnas de agua que interactúan con un balance de masa y a partir de esa solución acopla la dispersión, difusión y concentración del contaminante.

Los pasos a seguir para modelar en el módulo Calidad de Agua (Waq) son:

1. Tener el resultado de la simulación hidrodinámica realizada en el módulo FLOW.



2. Realizar el acoplamiento. El programa convierte los resultados de los cálculos hidrodinámicos en el formato requerido por WAQ. Los mismos se almacenan y son verificables en un menú Report.
3. Definir las sustancias y procesos de calidad de agua. Aquí, una vez realizado el acople se activan las herramientas para seleccionar las variables de estado y los procesos de calidad de agua para incluir en la simulación.
4. Definir la simulación de la calidad de agua utilizando los resultados de los pasos 1 y 2, considerando condiciones iniciales, de frontera, las concentraciones de desechos, el tiempo de simulación, etc.
5. Ejecutar la simulación.
6. Comprobar la salida.

En el diagrama de la *figura 8.1* se observa una visión general de los módulos y el diagrama de flujo para modelar en D- Water quality. La zona encerrada en línea de trazos corresponde al módulo Water Quality

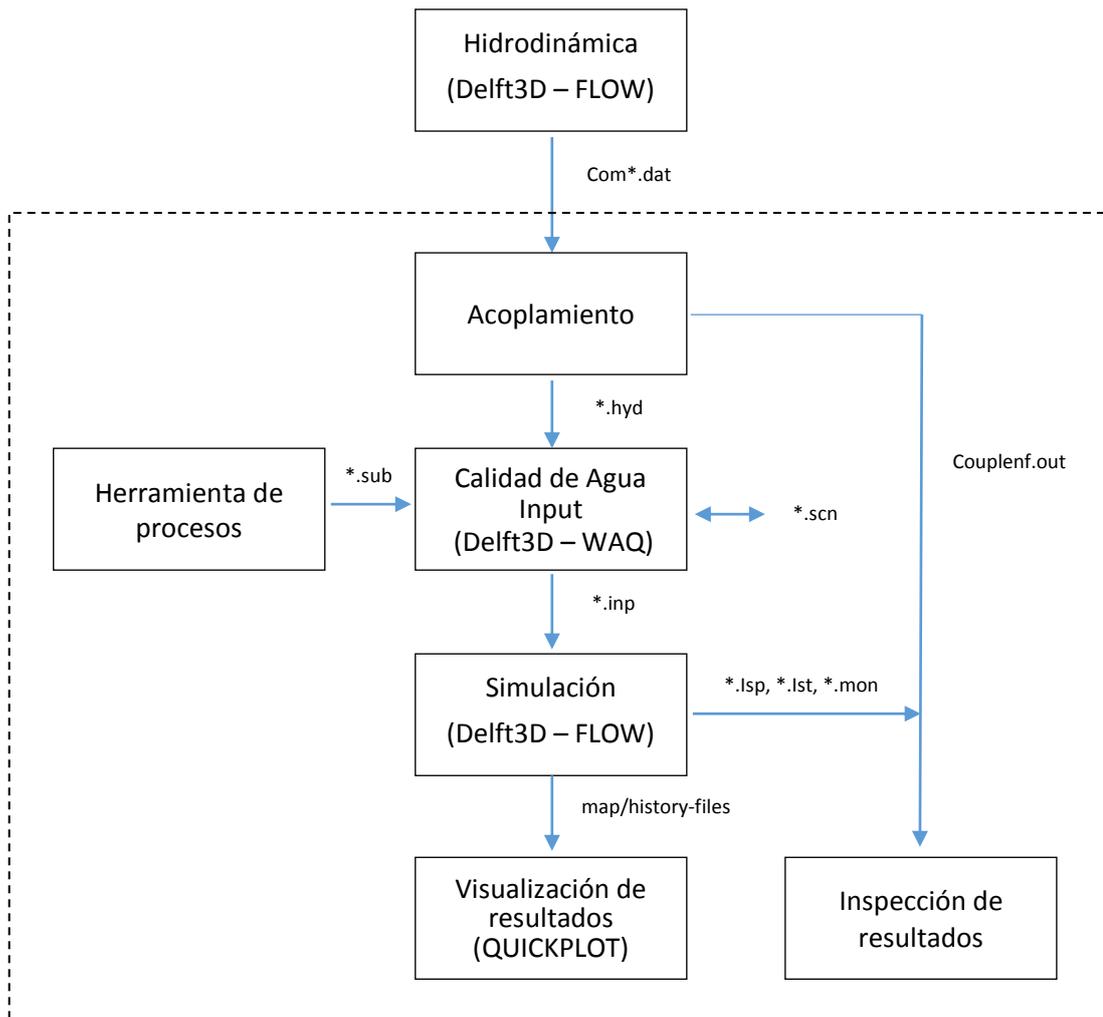


Figura 8.1 – resumen de los módulos y diagrama de flujo de los datos en D-Water Quality.



8.2. 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 la descarga de efluentes a un cuerpo receptor, en este caso la Laguna Mar Chiquita, sería que la hipotética planta de tratamiento no funcionara con la eficiencia correspondiente, teniendo como consecuencia un aumento de la concentración de contaminantes en el efluente descargado y por lo tanto, de la futura mancha en el cuerpo de agua. Esta condición crítica se analizará en este trabajo. En la *tabla 8.1* 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 CaCO ₃)	150	100	50
Aceites y grasas	150	100	50

Tabla 8.1 - Características del agua residual doméstica. Kiely (1999)



En cuanto a la concentración de coliformes en las mismas, los valores varían entre 1×10^6 y 1×10^8 por cada 100 mililitros de agua. El coeficiente de decaimiento k para la *Escherichia Coli*, de acuerdo lo visto en el título 5.5 y la figura 6.1, en aguas saladas toma valores de alrededor de 0.08 día^{-1} y 2 día^{-1} . Otros valores estudiados arrojaron valores de hasta 10 día^{-1} (Gyssels et al. 2011).

Con la información recolectada y el rango de valor permitido por el software, se decidió adoptar un valor intermedio del coeficiente de decaimiento igual a 3 día^{-1} , con la consiguiente valorización del parámetro $T90$ igual a 18,4 horas.

8.3. Escenarios

Por lo analizado en la hidrodinámica y en la ubicación de los puntos posibles de descarga del emisario, considerando como factor principal las consecuencias del vertido para la salud humana y las actividades desarrolladas en las costas de Playa Grande y en las costas de la localidad de Miramar, se definieron los siguientes escenarios a simular:

- 1- **Simulación 2D: descarga Este con tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, con tratamiento en planta depuradora, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.
- 2- **Simulación 2D: descarga Este sin tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.
- 3- **Simulación 2D: descarga Oeste con tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, con tratamiento en planta depuradora, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 4- **Simulación 2D: descarga Oeste sin tratamiento:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 5- **Simulación 2D: descarga Este, Viento Norte:** descarga en la laguna al punto cardinal Este de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Norte y tasa de decaimiento bacteriano.
- 6- **Simulación 2D: descarga Oeste, Viento Sur:** descarga en la laguna al punto cardinal Oeste de la localidad de Miramar, sin tratamiento, con viento Sur y tasa de decaimiento bacteriano.



8.3.1. Datos de entrada

Definido el punto de descarga, se procede a la modelación del vertido a través del módulo Water Quality del software Delft3D, especificando previamente en la *tabla 8.2* los parámetros necesarios para luego llevar a cabo la simulación, teniendo en cuenta que estos serán los mismos para los escenarios descritos, variando únicamente la condición de si la descarga se realiza con o sin tratamiento (por ende cambia la concentración de E. Coli) y la dirección de viento analizada de acuerdo al punto de descarga.

Datos de entrada	Valores adoptados
Tiempo simulado	5 días
Contaminante	E. Coli
Caudal de descarga	0.25 m ³ /s
Descarga de E. Coli	Tratada: 1 x 10 ⁷ MPN/m ³
	No tratada: 1x10 ¹² MPN/m ³
Descarga de Salinidad	1 g/kg
Descarga de Mat. Inorg.	30 g/m ³
Dispersión	1°direc: 10 m ² /s longitudinal
	2°direc: 20 m ² /s transversal
Materia Inorg. de medio	10 g/m ³
Salinidad del medio	32 ppt (g/L)
E. Coli del medio	10 MMPN/m ³
Tasa de decaimiento	3 día ⁻¹
Temperatura del medio	23 °C
Radiación sobre el agua	200 W/m ²
Coef. Extinción UV	0.862 m ² /g
Extin. por UV profundidad	0.08 m ⁻¹

Tabla 8.2 – Variables de entrada y valores adoptados para el Modelo Waq.



Observaciones

- La descarga se realiza de manera constante durante todo el tiempo de simulación con valores constantes de concentración.
- El contaminante es Escherichia Coli, dato ingresado al módulo a través de un archivo ya generado por los desarrolladores del software.
- Los valores de concentración de E. Coli corresponden a lo expresado en la *tabla 5.2* y en el *título 8.2* del presente informe. Se aclara que la E. Coli es un bacteria termotolerante, por lo que de acuerdo a la tabla 5.2 el valor límite de descarga en aguas superficiales es de 1000 MPN/100ml (1×10^7 MPN/m³). En el caso de funcionamiento deficiente de la hipotética planta depuradora el valor de concentración descargado es de 1×10^8 MPN/100ml (1×10^{12} MPN/m³).
- El caudal de descarga es según lo desarrollado en el título 5.6 a 5.6.3 inclusive.
- Los valores de la dispersión son los adecuados para el agua salada, como el de la laguna.
- La materia inorgánica del medio fue un valor ingresado para el funcionamiento del módulo Waq, quedando este parámetro fuera del objeto de estudio.
- Los valores de salinidad, temperatura y la E. Coli de la laguna son los mismos que se utilizaron en el módulo Flow.
- La tasa de decaimiento se justificó en el título 8.1.
- El valor de radiación solar se justifica según el “Mapa solar de la provincia de Córdoba”, Secretaría de desarrollo energético, gobierno de la provincia de Córdoba.

8.4. Resultados

Se exponen a continuación, los resultados obtenidos de la simulación de las descargas realizadas con el módulo Water Quality para los escenarios definidos.

Cabe aclarar, que los valores de concentración limitados por ley, son para el “efluente descargado” en un cuerpo receptor. El análisis sobre el alcance de la mancha y sus concentraciones en el cuerpo receptor (agua de la laguna más efluente) se harán tomando estos límites como aquellos que no generarían un daño a las personas en el uso de las costas de la misma.



8.4.1. Simulación 2D: descarga Este con tratamiento

Se observa en la *figura 8.2*, la pluma de contaminante generada por la descarga con tratamiento previo, con una concentración de E. Coli de 1×10^7 MPN / m³.

La pluma se dispersa radialmente, esto por las bajas velocidades de flujo del sector, con una dirección hacia el Sur-Oeste, acompañando la hidrodinámica generada por el viento Sur.

Los valores de concentración, luego de 5 días de descarga continua, en un radio de 400 m de la boca de descarga son muy bajos, en el orden de 0,05% de la concentración de vertido.

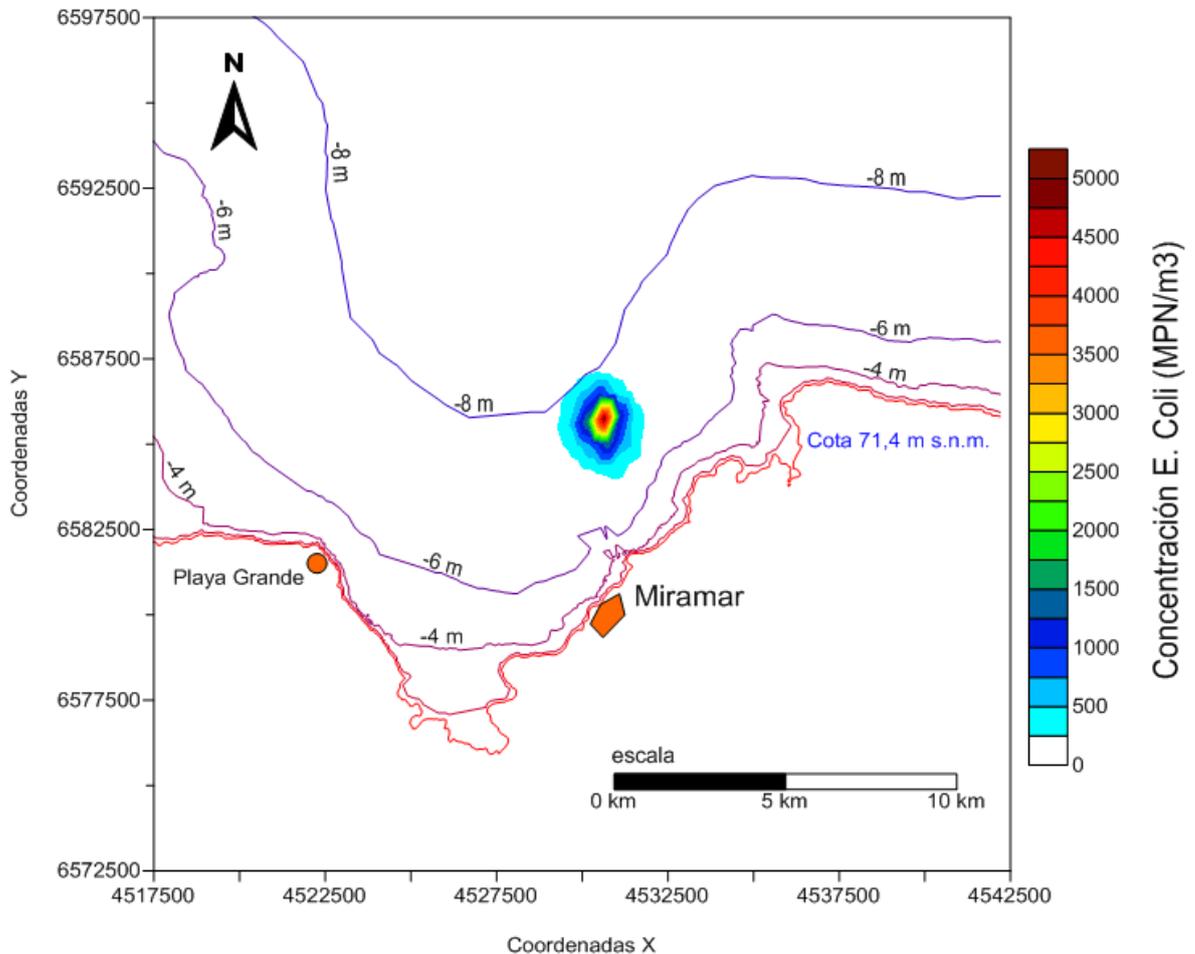


Figura 8.2 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante con tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.

En la *figura 8.3* se observa la curva de disminución de la concentración con la distancia hacia las costas de Miramar, en el último día de vertido. La distancia desde la boca de

descarga del emisario hasta la costa de Miramar es de 5200 m, estando los valores de concentración muy por debajo de los límites a pocos metros de la descarga, llegando a ser nula a los 3000 m de la misma, aproximadamente a 2200 m de la costa.



Figura 8.3 – Descarga Este. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.

8.4.2. Simulación 2D: descarga Este sin tratamiento

Se observa en la *figura 8.4*, la pluma de contaminante generada por la descarga sin tratamiento previo, con una concentración de E. Coli de 1×10^{12} MPN / m³.

La pluma se dispersa en la dirección Sur-Oeste, con geometría radial por las bajas velocidades de flujo del sector, acompañando la hidrodinámica generada por el viento Sur, alcanzando un ancho aproximado de 3400 m en base al valor límite de 1×10^7 MPN/m³ de concentración (1000 MPN/100ml).

Los valores de concentración, luego de 5 días de descarga continua, alcanzan los valores permitidos a mayor distancia de la boca de descarga respecto a la descarga con tratamiento.

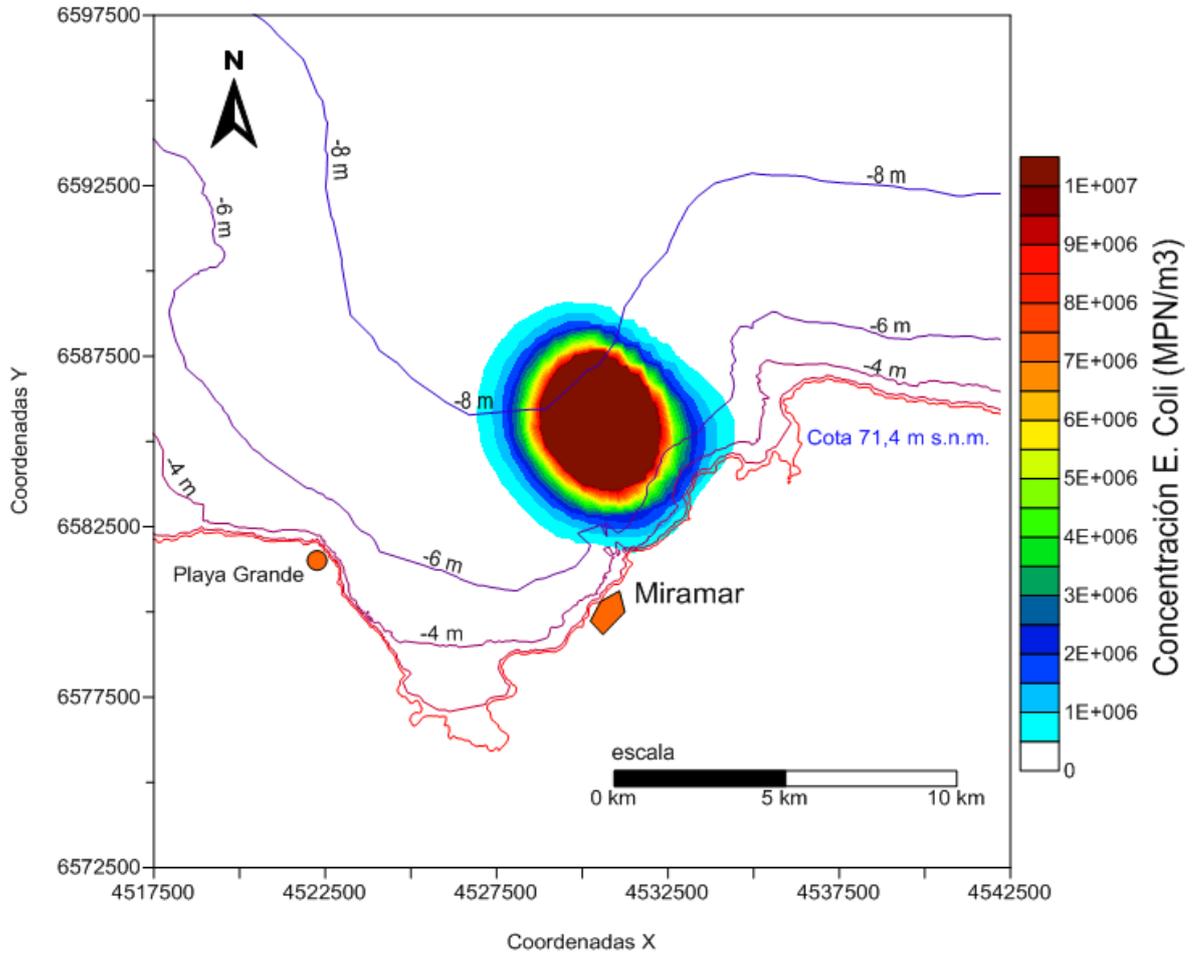


Figura 8.4 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.

En la *figura 8.5* se observa la curva de disminución de la concentración con la distancia hacia las costas de Miramar, en el último día de vertido. Se alcanza los valores límites de concentración de E. Coli de 1×10^7 MPN/m³ a 1700 m de la boca de descarga, aproximadamente a 3500 m de la costa.

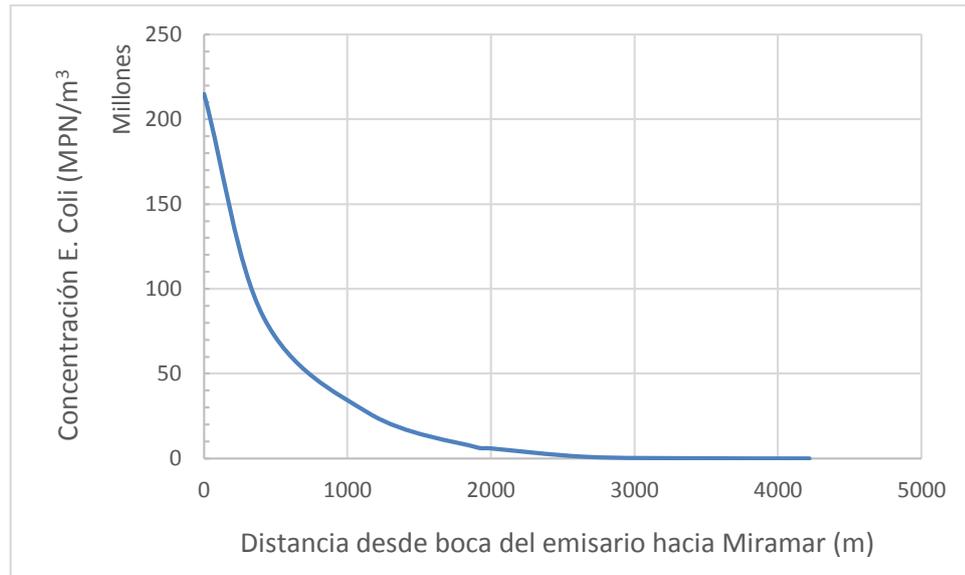


Figura 8.5 – Descarga Este. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.

8.4.3. Simulación 2D: descarga Oeste con tratamiento

Se observa en la *figura 8.6*, la pluma de contaminante generada por la descarga con tratamiento previo, con una concentración de 1×10^7 MPN / m³.

La pluma se dispersa hacia el Noreste, esto por las velocidades de flujo del sector generadas por el viento Norte, que, aunque son bajas, son mayores que en la zona de la descarga Este.

Los valores de concentración, luego de 5 días de descarga continua, en un radio de 400 m de la boca de descarga son muy bajos, en el orden de 0,05% de la concentración de vertido.

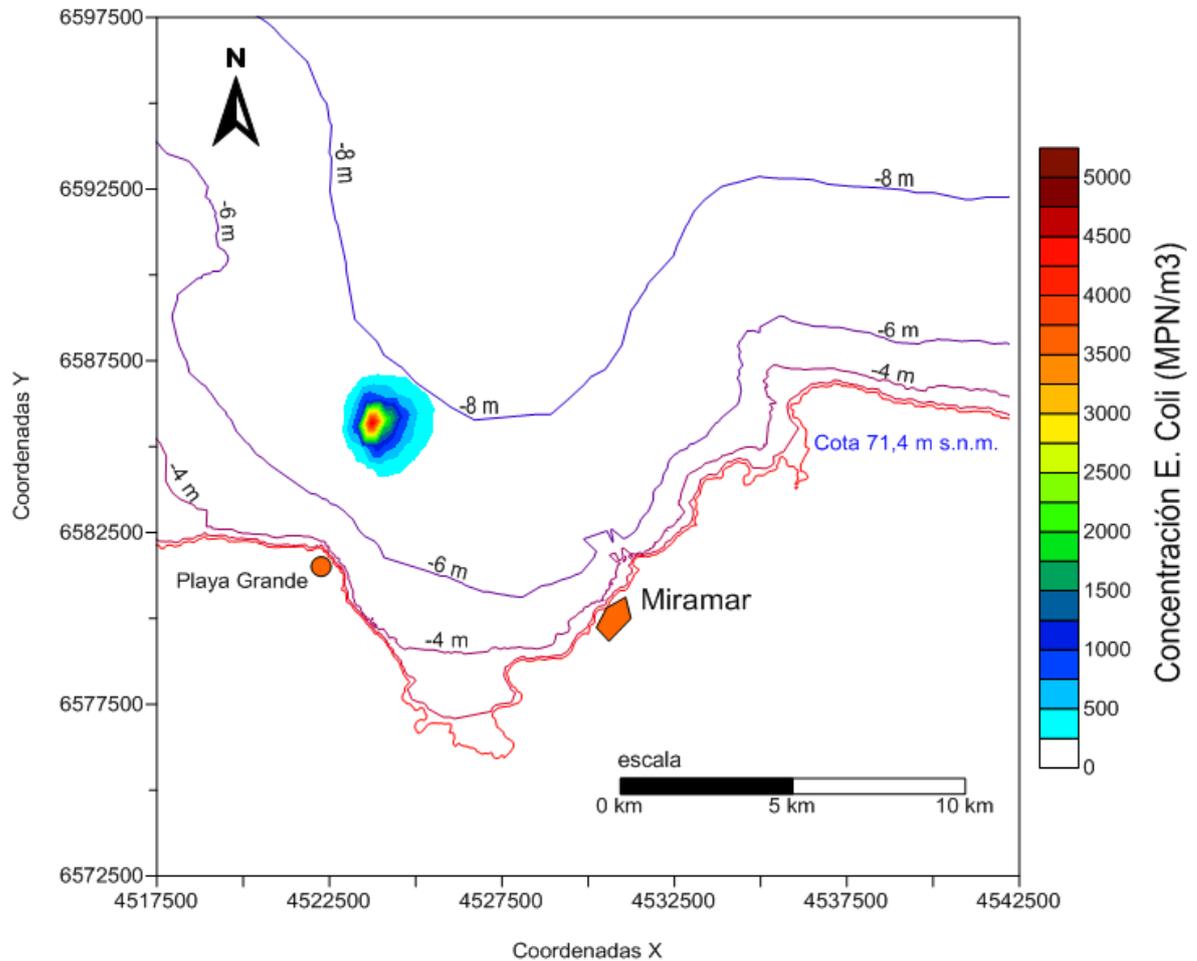


Figura 8.6 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante con tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.

En la *figura 8.7* se observa la curva de disminución de la concentración con la distancia hacia las costas de Miramar, en el último día de vertido. La distancia desde la boca de descarga del emisario hasta la costa de Miramar es de 8200 m, estando los valores de concentración muy por debajo de los límites a los pocos metros de la descarga, llegando a ser nula a los 3000 m de la misma, aproximadamente a 5200 m de la costa.

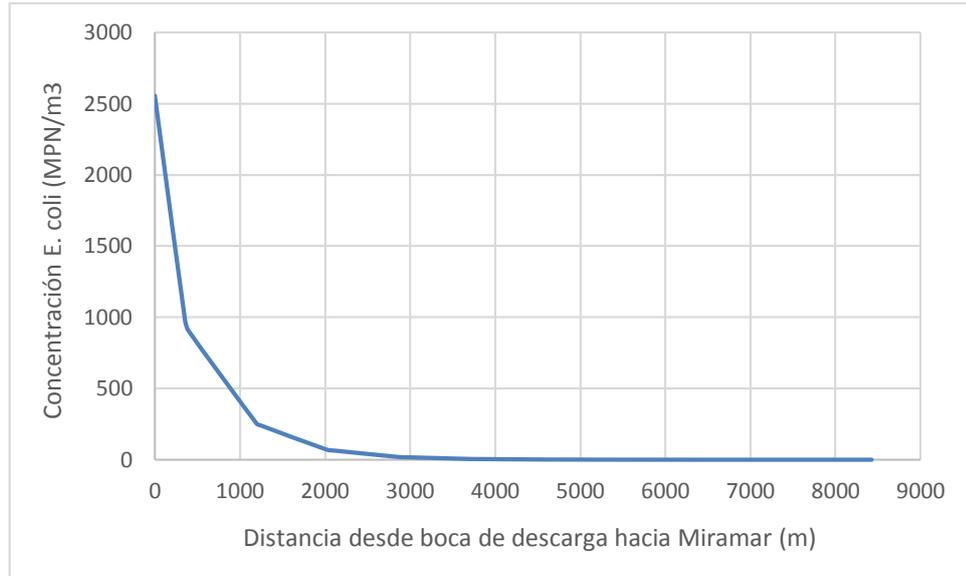


Figura 8.7 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.

En la *figura 8.8* se observa la curva de disminución de la concentración con la distancia hacia las costas de Playa Grande. La distancia desde la boca de descarga del emisario hasta su costa 4000 m, estando los valores de concentración muy por debajo de los límites a los pocos metros de la descarga, llegando a ser nula a los 3000 m de la misma, aproximadamente a 1000 m de la costa.



Figura 8.8 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Playa Grande. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.



8.4.4. Simulación 2D: descarga Oeste sin tratamiento

Se observa en la *figura 8.9*, la pluma de contaminante generada por la descarga sin tratamiento previo, con una concentración de 1×10^{12} MPN / m³.

La pluma se dispersa en la dirección Noreste, acompañando la hidrodinámica generada por el viento Norte, alcanzando un ancho aproximado de 3900 m en base al valor límite de 1×10^7 MPN/m³ de concentración.

Los valores de concentración, luego de 5 días de descarga continua, alcanzan los valores permitidos a mayores distancias de la boca de descarga respecto a la descarga tratada.

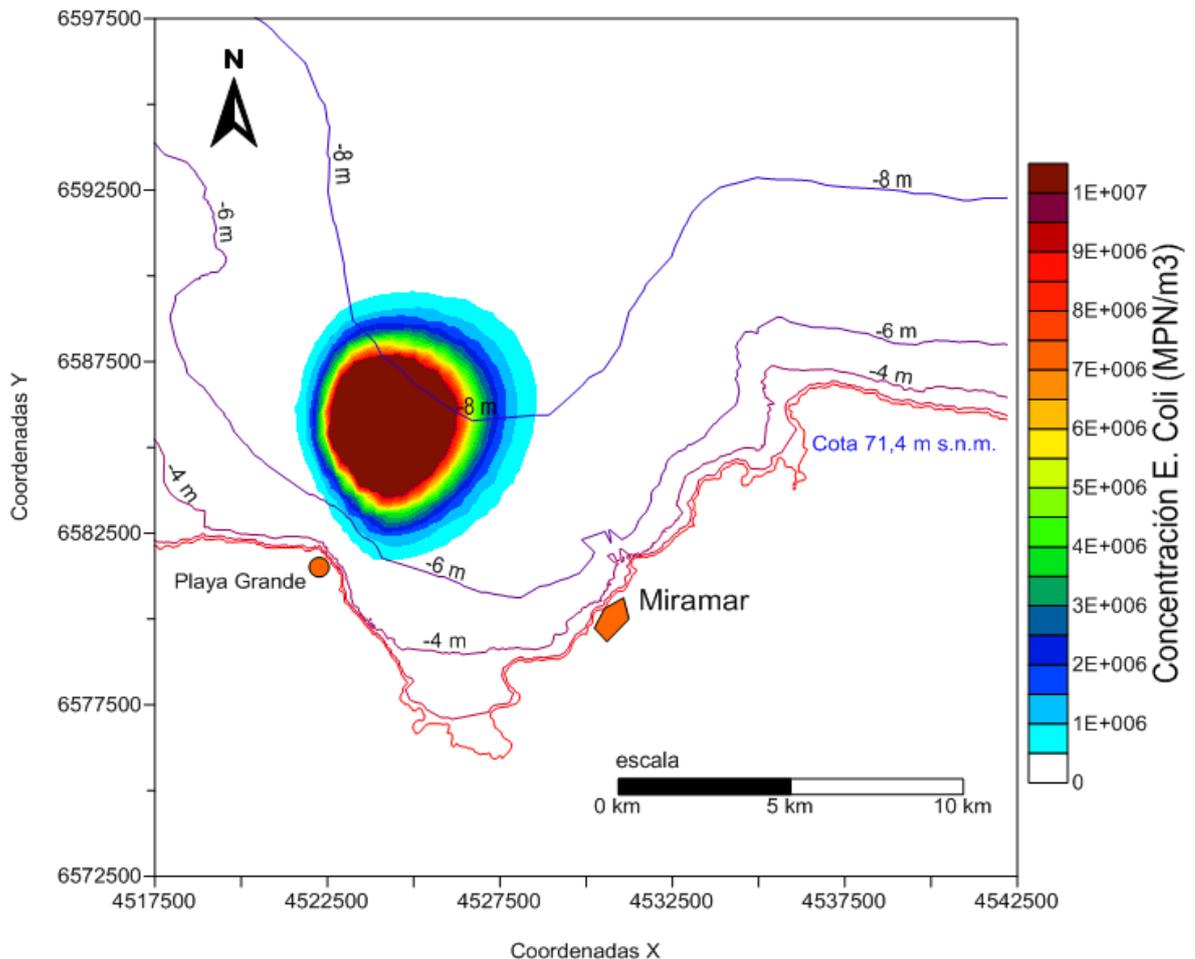


Figura 8.9 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.



En la *figura 8.10* se observa la disminución de la concentración con la distancia hacia las costas de Miramar, en el último día de vertido. Se alcanza los valores límites de concentración de E. Coli a 2000 m de la boca de descarga, aproximadamente esta última a 6200 m de la costa.



Figura 8.10 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Miramar. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.

En la *figura 8.11* se observa la disminución de la concentración con la distancia hacia las costas Playa Grande. Se alcanza los valores límites de concentración de E. Coli a los 2000 m de la misma, aproximadamente esta última a 2000 m de la costa.

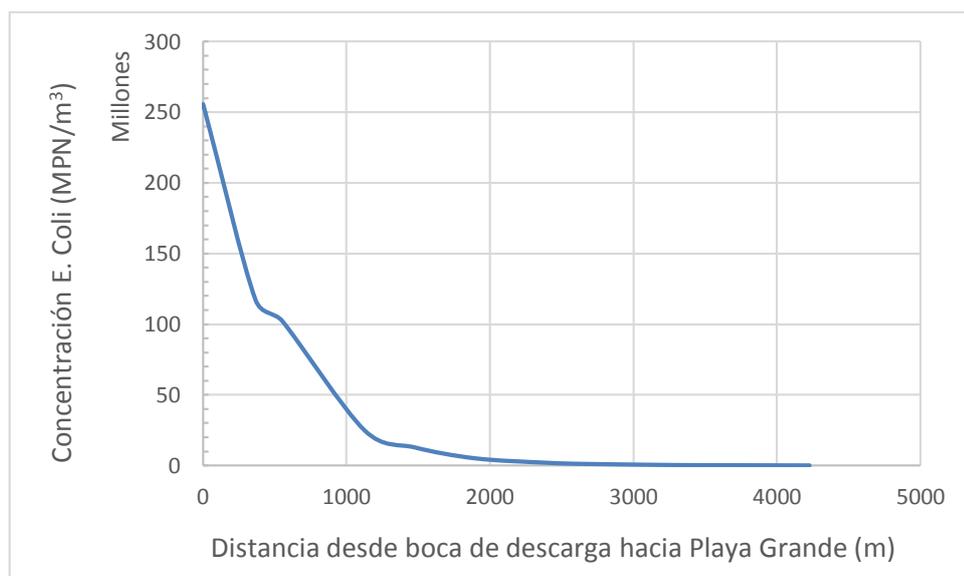


Figura 8.11 – Descarga Oeste. Disminución de la concentración desde la boca de descarga hacia las costas de Playa Grande. Water Quality-Quickplot y Microsoft Excel.



8.4.5. Simulación 2D: descarga Este, viento Norte, sin tratamiento.

Se observa en la *figura 8.12*, la pluma de contaminante generada por la descarga sin tratamiento previo, con una concentración de 1×10^{12} MPN/m³, trasladada por el viento Norte.

La pluma se dispersa en la dirección Noreste, dirigiéndose al centro del cuerpo de la laguna, alejándose de las costas de Miramar, acompañando la hidrodinámica generada por el viento Norte, alcanzando un ancho aproximado de 4000 m en base al valor límite de 1×10^7 MPN/m³ de concentración.

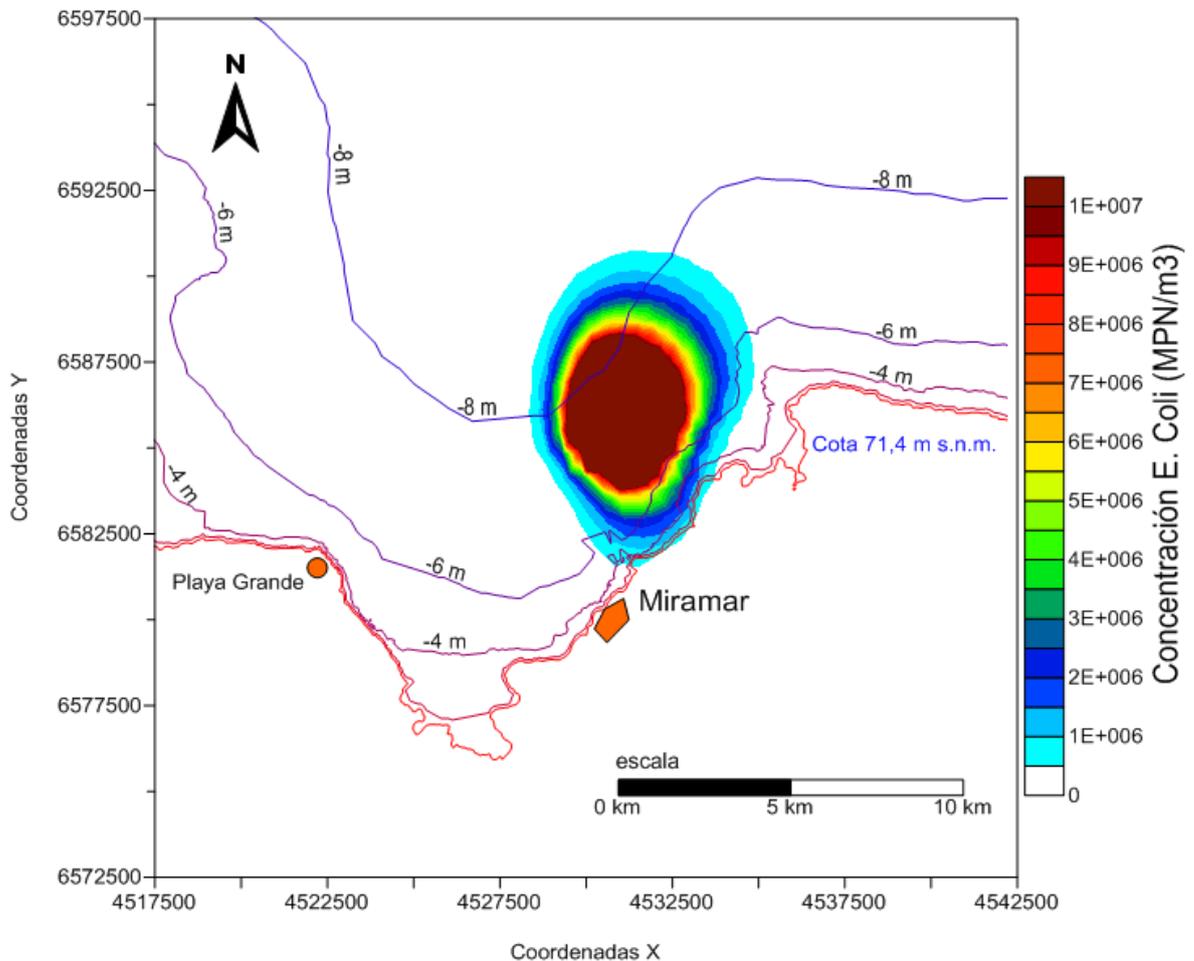


Figura 8.12 – Descarga Este. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.

8.4.6. Simulación 2D: descarga Oeste, viento Sur, sin tratamiento

Se observa en la *figura 8.13*, la pluma de contaminante generada por la descarga sin tratamiento previo, con una concentración de 1×10^{12} MPN/m³, trasladada por el viento Sur.

La pluma se dispersa en la dirección Sur-Oeste, dirigiéndose hacia las costas de Playa Grande, alejándose de las costas de Miramar, acompañando la hidrodinámica generada por el viento Sur.

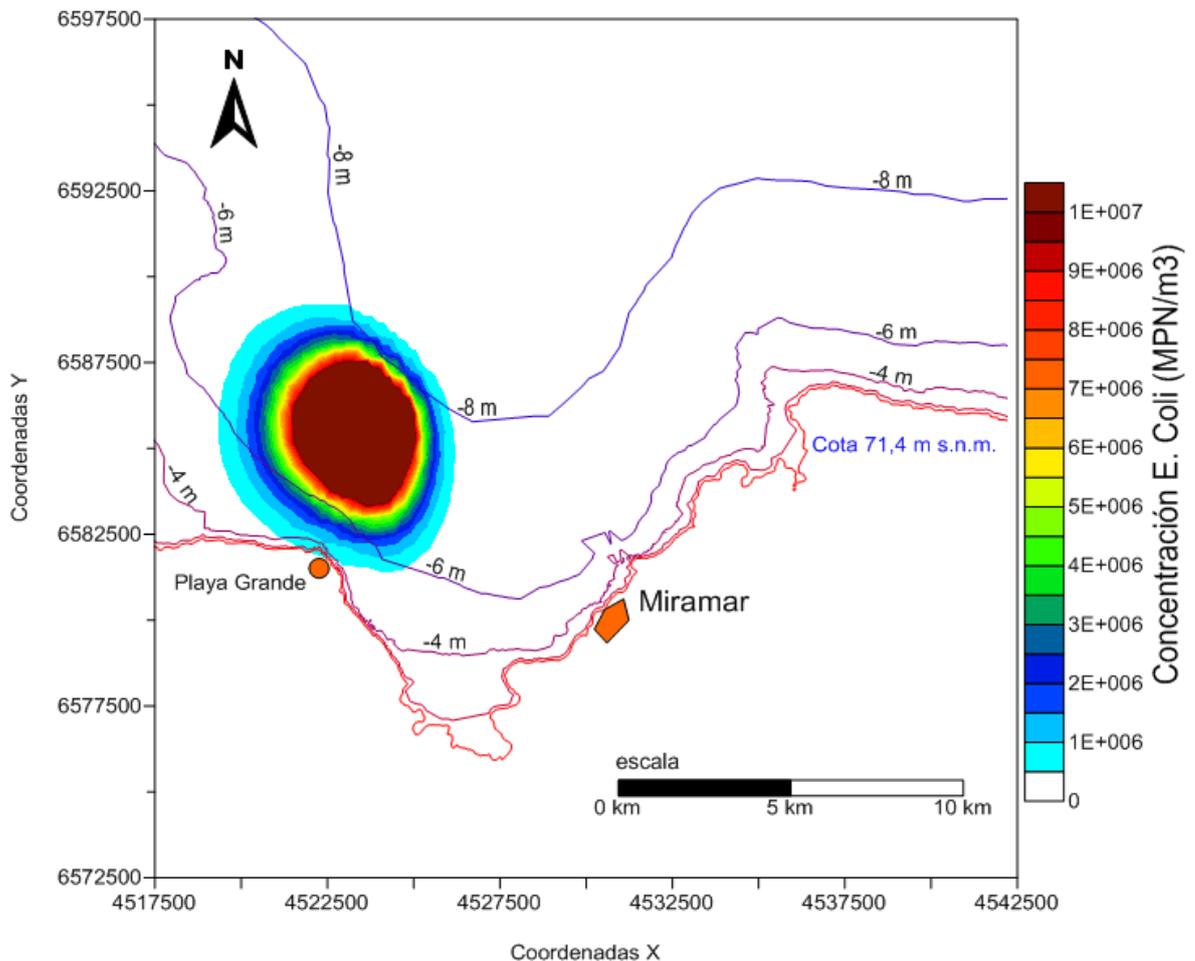


Figura 8.13 – Descarga Oeste. Pluma generada por la descarga de contaminante sin tratamiento. Concentración de Escherichia Coli. Water Quality-Quickplot y Golden software Surfer 10.



9. Conclusiones

9.1 Sobre los resultados obtenidos

Respecto a los resultados obtenidos de las simulaciones de descargas a través de dos puntos posibles en el interior del cuerpo de agua de la laguna, se puede inferir que ambos resultaron representativos, en el sentido de que abarcaron las zonas de importancia en cuanto a la circulación de los volúmenes de agua de la misma y su incidencia con la zona costera de la localidad de Miramar y las costas de Playa Grande.

Para un caudal de descarga constante de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, tanto para las descargas Este (a 3700 m de la costa) y Oeste (a 4000 m de la costa) con tratamiento previo en la hipotética planta depuradora, los valores de concentración de Escherichia Coli en el campo lejano de la pluma se encontraron muy por debajo de los 1000 MPN/100ml que estipula el decreto 847 de la ley provincial 10.208 (Córdoba) para la descarga, no implicando riesgo alguno para el uso de las costas de Miramar y de Playa Grande.

Para la descarga Oeste sin tratamiento y viento Norte, el valor de concentración límite máximo de 1000 MPN/100ml se encontró a más de 2000 m de las costas de Playa Grande y a 6200 m de las costas de Miramar, mucho más que los 500 m que estipula la ley, dándose la particularidad de que la pluma tiende a dirigirse hacia el centro de la laguna.

Para el caso de esta descarga Oeste sin tratamiento, pero con viento Sur, las condiciones para las costas de Miramar son más que óptimas, ya que la pluma se aleja de la misma, pero para las costas de playa Grande son desfavorables, ya que la pluma tiende a acercarse hacia ellas, aunque el valor de concentración límite siguen estando a más de 500 m de sus costas (aproximadamente a 1500 m).

Para la descarga Este sin tratamiento y viento Sur, el valor límite de concentración se encontró a 3500 m de las costas de Miramar, satisfaciendo holgadamente los 500 m por ley. De la misma manera, para esta descarga pero con viento Norte, la pluma avanza hacia el centro de la laguna, alejándose de las costas de Miramar, sin riesgo alguno para sus usos.



Si bien por la ubicación simétrica respecto de las localidades a servir, con las ventajas económicas del caso y la poca implicancia sobre las costas de Miramar, la descarga Oeste no tiene un comportamiento ambientalmente favorable para las costas de Playa Grande, ya que la pluma tiende directamente hacia ella en caso de viento Sur, debiendo analizar más en profundidad el caso.

Por su parte, la descarga Este, se encontraría mejor posicionada en cuanto a la pluma de dispersión y sus consecuencias para las costas de Miramar, siendo estas nulas para sus usos. Como contrapartida se menciona el aumento de coste económico para las ciudades de La Para y Marull en el tendido del sistema de saneamiento.

Se podrían haber planteado otras condiciones de simulación, teniendo en cuenta factores que afecten los procesos de transporte de la laguna, como ser la fluctuación del nivel de agua anual, su salinidad, vientos más elevados y demás, estando este trabajo fuera de esas evaluaciones, debiendo especializarse en el tema, profundizar conocimientos y tener datos en continua actualización.

9.2. Sobre el software DELFT3D

Se destaca la gran importancia que tiene para la ingeniería el estudio y conocimiento de programas de modelación y simulación de diversos fenómenos, ya que permiten reducir el número de ensayos necesarios para obtener soluciones ingenieriles que se puedan llevar a la práctica y, consecuentemente, disminuir el tiempo y los costos involucrados en alcanzar dichas soluciones.

El programa utilizado en este trabajo, el software Delft3D, constituye una herramienta útil en el abordaje eficiente de distintas problemáticas asociadas a fenómenos hidrodinámicos, logrando analizar diferentes fenómenos en una misma interfaz de trabajo. Aquí se desarrolló el estudio bidimensional de la hidrodinámica de la laguna para su posterior acople con la simulación del vertido de contaminante, analizando la calidad de agua del medio receptor, obteniendo resultados favorables y representativos.

El estudio y conocimiento de este programa resulta de gran valor para trabajos futuros para quien escribe el informe, aclarando que aún queda mucho por profundizar debido a las múltiples variables que involucra el software, siendo que solo se utilizaron las necesarias para un comportamiento bidimensional.



9.3. Sobre la realización de la Practica Supervisada

La realización de la práctica supervisada ha sido muy positiva para quien la escribe, ya que la temática abordada permitió aplicar conocimientos adquiridos durante la carrera de grado y dilucidar otros que iban surgiendo en el momento de su desarrollo.

En la actualidad, con el gran avance de las tecnologías en el desarrollo de potentes procesadores y programas de simulación, los problemas ingenieriles pueden ser representados y simulados a través de estos, resultando imprescindible; como complemento a la formación académica; el estudio y manejo de un programa que brinde soluciones a diferentes temáticas de la ingeniería Civil.

El tema aquí expuesto, profundizó la mirada sobre este inmenso espejo de agua, descubriendo la importancia que representa a nivel ambiental y social para la región, dándole la correspondiente dimensión al tema de Calidad de Agua, resultando vital su desarrollo y estudio para preservar estas maravillosas aguas y el uso que hacen de ella, brindado una posible solución al volcamiento de aguas residuales por medio de un emisario submarino; sistema relativamente económico y fiable para estas latitudes; para evitar la contaminación de las napas freáticas de las cuales se abastecen las poblaciones intervinientes.

Por último, y a modo de agradecimiento, mencionar al Laboratorio de Hidráulica de esta casa de estudios y a las personas que trabajan en él, por permitirme la realización de la práctica, estando siempre a disposición, facilitando sus conocimientos para la correcta concreción de la misma.



10. 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>

Decreto 847 (2016) – REGLAMENTACIÓN DE ESTÁNDARES Y NORMAS SOBRE VERTIDOS PARA LA PRESERVACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO PROVINCIAL

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 Report on the Environment (2003). Technical Document. Unites States Environmental Protection Agency.

Ley Provincial 10.208 (2014) – POLÍTICA AMBIENTAL PROVINCIAL

✓ Bibliografía consultada:

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2000). Informe número 43. Evaluación del Impacto Ambiental.

Comisión Nacional del Agua. Guía para el diseño de emisarios submarinos. México. 2007.



- Corral M., Pozzi C., Plencovich G., Hillman G., Pagot M., Rodríguez A., Oroná C. *Modelación hidrodinámica con apoyo satelital de la circulación en la laguna Mar Chiquita.*
- Corral, M., Pagot, M., Oroná, C., Rodriguez, A. y Patalano, A. (2011). *Modelación Numérica para la definición de escenarios hidrodinámicos críticos del futuro emisario submarino de puerto Madryn.*
- Delft3D-FLOW. *Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flow sand transport phenomena, including sediments.* User manual. 2014.
- D-Water Quality. *Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio) chemical and biological processes.* User manual. 2014.
- Documentos estadísticos 2015. Gobierno de la provincia de Córdoba.
- Enrique H. Bucher, Gregorio Pizarro, Erio D. Curto (2006). *Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina.*
- F. Javier Sánchez San Román. *Transporte de contaminantes.* Dpto. Geología. Universidad de Salamanca (España)
- Gyssels, P., Corral, M., Rodriguez, 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. & 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.*
- Muchiut, Jonathan (2016). *Diseño de emisario submarino en el sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenzuza), Córdoba, Argentina"*
- Muñoz Hernández A., (1990). *Saneamiento y alcantarillado.* Col. Señor 7, Publicaciones de la Escuela de Caminos de Madrid. Editorial Paraninfo, Madrid, segunda edición.



- Paolo Gyssels, C. Marcelo Baldissoni, Gerardo Hillman, Andrés Rodríguez, Javier Bosc, Mariano Corral, Mariana Pagot, Daniel Brea, Pablo Spalletti, Hector Daniel Farías. *Aplicaciones del modelo numérico Delft3D a diferentes problemas hidrosedimentológicos en casos argentinos*. 2013.
- 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.
- Rodríguez, A.; Pagot, M.; Hillman, G.; Pozzi, C.; Plencovich, G.; Caamaño Nelli, G.; Bucher, E. y Oroná, C. Sistema Laguna Mar Chiquita.
- Sorrequeta Augusto (2010). *Aguas residuales: Reuso y tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para Latinoamérica*.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. *Desarrollos de niveles guías nacionales de calidad de agua ambiente correspondiente a Escherichia Coli/Enterococos*. 2003