



EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS DE DESCARGA EN PUNTA DEL ESTE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN MODELO NUMERICO TRIDIMENSIONAL

PARTE II: MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS

Ing. Mariana Fernández, MSc. Ing. Mónica Fossati, Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva

Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

Calle: J. Herrera y Reissig 565

Ciudad: Montevideo

Uruguay

CP: 11200

Tel: 598 (2) 711 3386 int 118

Fax: 598 (2) 711 5277

e-mail: mfernand@fing.edu.uy

RESUMEN

En este trabajo se presentan las características y los principales resultados obtenidos durante el trabajo de evaluación de las alternativas de disposición final, mediante un emisario subacuático, de los líquidos cloacales generados y que se prevén puedan generarse en los próximos años en el área Maldonado-Punta del Este. El trabajo se centra fundamentalmente en la identificación de diferentes alternativas posibles de vertimiento y en la evaluación de sus impactos sobre la calidad del agua en la zona, mediante la realización de un estudio prospectivo utilizando un modelo numérico de corrientes y de calidad de agua tridimensional implementado para representar las condiciones de la zona de interés. El estudio realizado muestra que las alternativas de descarga del líquido residual sin tratar analizadas, ubicadas en Punta Salina, San Rafael y Punta del Chileno, requieren emisarios de grandes longitudes para garantizar condiciones de balneabilidad en las playas de la zona. Por otra parte, el análisis de alternativas de descarga mediante emisarios cortos con tratamiento previo en la zona de Rincón del Indio muestra que a partir de los 800 m de longitud se garantizan condiciones de balneabilidad en toda la costa.

INTRODUCCIÓN

A principios del 2006 la empresa Tahal Consulting Engineers encomendó al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República una serie de estudios técnicos marítimos para evaluar la alternativa de descarga en Punta del Este mediante un emisario subacuático de los líquidos residuales de la ciudad y de los alrededores [1]. Estos estudios se llevaron a cabo aplicando un modelo numérico hidrodinámico baroclínico y un modelo de transporte de sustancias tridimensional en la costa del departamento de Maldonado, a partir de los cuales es posible obtener la variación temporal de las corrientes, niveles, salinidad y la concentración del contaminante descargado en cualquier punto del dominio analizado. El modelo utilizado se denomina MOHID y específicamente para el análisis de las distintas alternativas de descarga y para la evaluación de sus potenciales impactos se utilizó el módulo de calidad de aguas lagrangiano [2]. El modelo MOHID ha sido desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal y describe el flujo en diversos tipos de cuerpos de agua.

El módulo de calidad de aguas del MOHID simula el transporte de la pluma generada por la descarga de partículas de un contaminante dado utilizando el campo de corrientes calculado con el módulo hidrodinámico. Las principales características y resultados de la implementación y calibración del modelo hidrodinámico fueron presentadas en la primera parte de este trabajo.

OBJETIVOS Y METAS

El principal objetivo de este trabajo es presentar las características y los resultados obtenidos en la aplicación de una herramienta numérica sofisticada en la zona de Punta del Este para evaluar distintas alternativas de descarga. En esta segunda parte se pretende mostrar la metodología utilizada y los resultados obtenidos durante la evaluación de alternativas de descarga del líquido cloacal. Por un lado se analizaron alternativas de descarga mediante



emisarios subacuáticos de gran longitud sin tratamiento previo y por otro lado se analizaron alternativas de descarga mediante emisarios de corta longitud descargando un líquido previamente tratado en varias ubicaciones de la costa de Maldonado.

METODOLOGIA

Implementación

Para estudiar las diferentes alternativas de vertimiento del líquido residual de Punta del Este a través de emisarios subacuáticos, y para la evaluación de sus impactos, se utilizó el módulo de calidad de aguas lagrangiano del MOHID. Este módulo simula el transporte de la pluma generada por la descarga de partículas de un contaminante dado, utilizando el campo hidrodinámico y las propiedades del agua calculadas previamente en el área de estudio con una implementación tridimensional del MOIHD con 10 capas en la dirección vertical. El modelo simula el transporte del contaminante descargado considerando los procesos de advección y difusión por mezcla así como también el decaimiento bacteriano para el caso de coliformes fecales. También se representó el campo cercano de la descarga submarina con el módulo MOHIDJET, a partir del cual es posible determinar la dilución inicial de la descarga.

Cuando se calcula el transporte de una sustancia de forma lagrangiana es posible resolver la ecuación de transporte de forma desacoplada con las ecuaciones de cantidad de movimiento. Esto significa que el módulo lagrangiano puede “leer” la información hidrodinámica del sistema y actualizar sus cálculos, sin necesidad de resolver todas las variables a la vez. En esta etapa de modelación del transporte de sustancias, el modelo calcula en cada instante de tiempo la posición y la concentración del contaminante en cada una de las partículas descargadas a partir de la información de corrientes, niveles, y salinidad ya calculada en la etapa de modelación hidrodinámica baroclínica que se presentó en la primera parte de este trabajo. Esto puede realizarse solo en el nivel de detalle, lo que permite una gran agilidad a la hora de estudiar diferentes alternativas de descarga una vez modelado el campo hidrodinámico y las propiedades del agua del período que se quiere analizar.

El análisis de las diferentes alternativas consistió en la simulación de la evolución de la pluma descargada considerando una descarga continua durante un período de tiempo correspondiente al verano. La evolución de dicha pluma es monitoreada a través de la definición de áreas de control denominadas boxes. Estos boxes de control se definieron por un lado en la zona de playas a 300 m de la costa y además se definieron zonas de control alrededor de las Islas Gorriti y de Lobos.

Los emisarios subacuáticos descargan el líquido residual a través de varias bocas o puertos ubicados en el extremo final del emisario (difusor) de forma de mejorar la mezcla inicial del chorro descargado con el medio receptor y obtener una mayor dilución. Todas las alternativas se estudiaron con un difusor estándar formado por 24 puertos de descarga horizontal de 0,2 m de diámetro equidistribuidos en una zona de difusor de 100 m de largo y ubicados a 1,5 m del fondo.

Alternativas analizadas

Se evaluaron en primer lugar las alternativas de descarga del líquido cloacal de Punta del Este y Maldonado sin considerar un tratamiento previo del mismo, lo que se refleja en la alta concentración de contaminante en el líquido vertido al cuerpo de agua receptor. La descarga se caracteriza por un caudal igual a $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración de coliformes igual a $1 \times 10^8 \text{ ufc}/100\text{ml}$. Se consideraron tres trazas posibles de emisario, Punta del Chileno, Punta Salina y San Rafael, cuya ubicación y alineación se pueden observar en el esquema de la zona que se presenta en la Figura 1.

En la traza de Punta del Chileno se estudiaron tres longitudes de emisario, 1.700 m, 3.500 m y 6.000 m, con profundidades de 14 m, 15,3 m y 18,2 m respectivamente. En la traza de Punta Salina se definieron dos longitudes a estudiar, 2.100 m y 5.500 m, y la profundidad en las mismas es de aproximadamente 22 m y 24 m, respectivamente. Por último en la traza de San Rafael fueron analizadas cuatro longitudes de emisario, 2.000 m, 3.000 m, 4.000 m y 5.000 m, cuyas profundidades son 15 m, 16 m, 18 m y 20 m, respectivamente. Las alternativas de descarga en las trazas de Punta Salina y San Rafael fueron analizadas utilizando la malla de detalle 1, mientras que las descargas en Punta Chileno se analizaron utilizando la malla de detalle 2 que representa mejor la zona

cercana a Punta Chileno. Las características de las distintas mallas de detalle definidas en este estudio se presentaron en la primera parte de este trabajo.

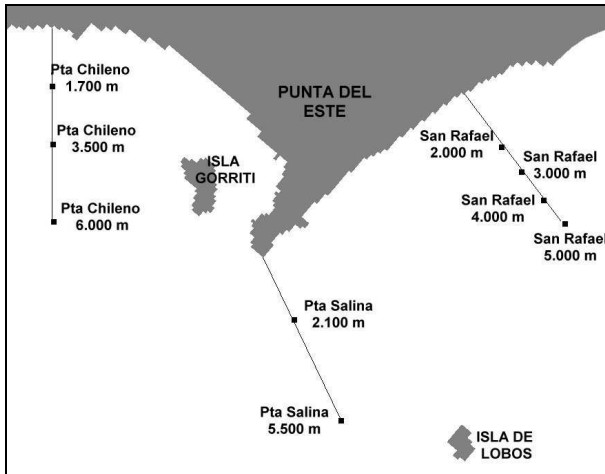


Figura 1: Ubicación y alineación de las alternativas de emisarios largos analizadas en Punta Chileno, Punta Salina y San Rafael.

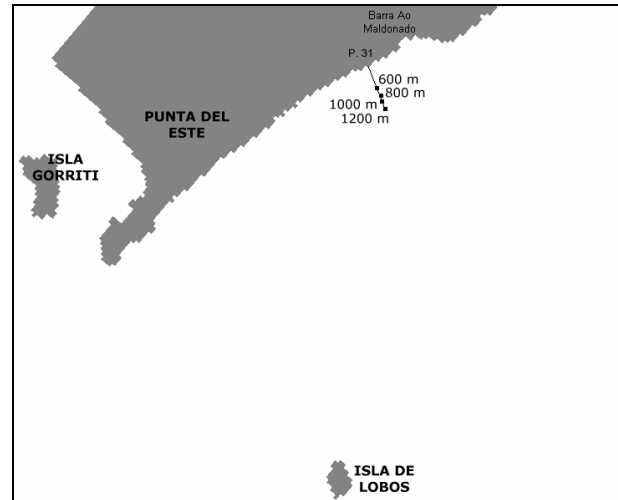


Figura 2: Ubicación y alineación de la traza definitiva, y longitudes de emisarios cortos analizados.

En una segunda instancia se analizaron con el modelo numérico las alternativas de descarga a través de emisarios cortos considerando un tratamiento del líquido residual bruto. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de emisarios largos, y por motivos relacionados con la posible implementación de una planta de tratamiento en la zona terrestre, el análisis de alternativas de emisarios cortos se realizó considerando una descarga en la zona de Rincón del Indio, entre la parada 30 y 31 de la Playa Brava a aproximadamente 1.000 m de la Barra del Arroyo Maldonado (traza definitiva). La ubicación y alineación de dicha traza se presenta en la Figura 2, donde también se puede observar la ubicación de los puntos de descarga analizados en relación a la morfología de la zona, como la Barra del Arroyo Maldonado, Punta Salina, las Islas Gorríti y de Lobos, etc. Se estudiaron cuatro alternativas de longitudes de emisarios sobre la traza definitiva, 600 m, 800 m, 1.000 m y 1.200 m. La descarga se caracteriza por un caudal igual a $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración de coliformes igual a 1×10^4 ufc/100ml en condiciones de diseño e igual a 1×10^6 ufc/100ml en condiciones de contingencia (bajo el supuesto de que la unidad de desinfección o alguna otra unidad de la planta de tratamiento sufra un desperfecto y quede inoperante durante cierto período de tiempo).

Calibración del modelo

Para resolver el sistema de ecuaciones que gobiernan el transporte de una determinada sustancia es necesario definir o calcular algunos parámetros del modelo lagrangiano. En el caso de los coliformes fecales el valor de T_{90} es uno de los parámetros que hay que definir para que el modelo calcule la evolución de las partículas. En el modelo el valor de T_{90} puede definirse como constante en el tiempo o variable. En este trabajo se utilizó la formulación de Chapra que calcula el T_{90} a partir de los valores de salinidad, temperatura y radiación solar. La salinidad y la radiación solar son calculadas en el modelo en cada instante de tiempo, mientras que la temperatura se considera constante en todo el dominio de cálculo e igual a 20°C . El modelo calcula entonces un factor T_{90} que varía en el tiempo y espacialmente, tanto en el plano horizontal como en la dirección vertical, en función de los valores de salinidad y radiación solar en cada celda de la malla. Ensayos de T_{90} y análisis de los mismos presentados en trabajos realizados para el PEC 11 concluyen que el parámetro T_{90} posee un valor mínimo diurno de entre 2 y 4 horas en las aguas de la zona cercana a la costa de Punta del Este. Este valor fue considerado de referencia para ajustar el T_{90} determinado por el modelo.

Otros de los parámetros que deben ingresarse al modelo de transporte lagrangiano son los parámetros equivalentes a los coeficientes de difusión turbulenta del contaminante descargado. Para este trabajo no fue posible realizar la

calibración de dichos parámetros ya que no se cuenta con mediciones de la evolución del transporte de plumas de descarga en la zona de estudio. Debido a esto fueron seleccionados para la modelación valores estándares de los coeficientes de difusión turbulenta que se presentan en los manuales del modelo y luego se realizó un análisis de sensibilidad de la solución a estos parámetros del modelo lagrangiano una vez seleccionada la alternativa final de diseño del emisario.

Evaluación de los impactos

La evaluación de las diferentes alternativas de emisarios subacuáticos analizadas se realizó a partir del impacto generado sobre la balneabilidad en las playas del balneario y sobre las zonas de mariscos en las Islas Gorriti y de Lobos por cada alternativa. Además, se realizó un análisis comparativo de los impactos generados por las distintas alternativas para una misma traza y para todas las trazas en conjunto. Este impacto fue evaluado a través del control de las curvas de frecuencia acumulada de la concentración de coliformes fecales calculada por el modelo cada una hora en varias áreas de monitoreo distribuidas en toda la zona, denominados boxes. Para cada una de las mallas de detalle utilizadas se definieron tres grupos de boxes de monitoreo, que pueden incluir una celda o varias en la dirección horizontal, y en cada uno se calcula en cada instante de tiempo la concentración de coliformes fecales en toda la columna de agua, es decir, en un volumen que incluye las diez capas de agua en la dirección vertical. Uno de los grupos de boxes se denomina puntos costeros e incluye celdas de control ubicadas a 300 m de la costa cada 500 m aproximadamente. El segundo grupo de boxes de control se denominan islas y son zonas que incluyen varias celdas alrededor de la Isla Gorriti y de la Isla de Lobos. El tercer grupo de celdas de monitoreo está formado por una red de boxes definida alrededor de las trazas de emisario consideradas. Los dos primeros grupos de boxes son los que se utilizan para evaluar el impacto de las distintas alternativas, siendo el último utilizado solamente para observar la variación espacial de la colimetría en la zona de estudio. A modo de ejemplo en las Figuras 3 y 4 se presentan los boxes costeros, los boxes de monitoreo definidos en la costa de la Isla Gorriti y los boxes definidos alrededor de la traza de Punta del Chileno en la malla de detalle 2.

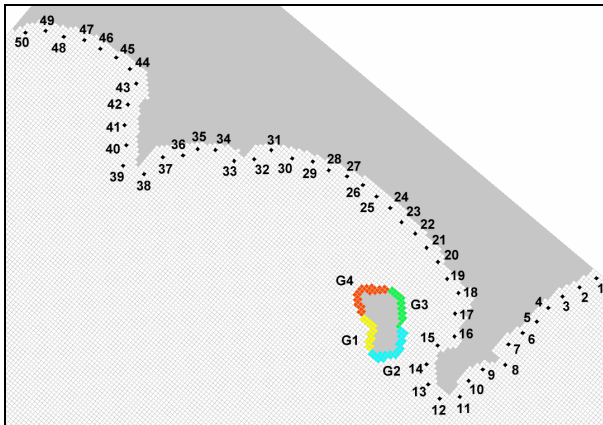


Figura 3: Ubicación de los boxes de monitoreo costeros y de las Islas definidos en la malla de detalle 2.

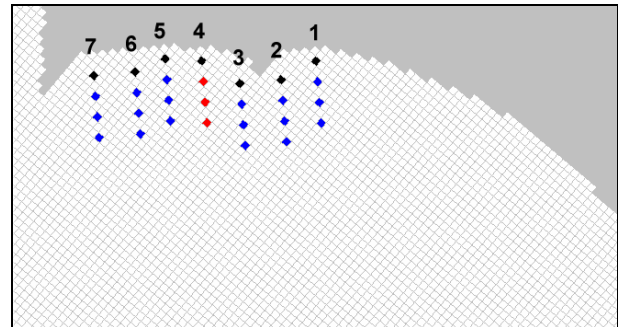


Figura 4: Ubicación de las líneas de boxes definidos alrededor de la traza de Punta del Chileno en la malla de detalle 2. Se marcan en negro los boxes costeros y en rojo los boxes que están definidos sobre la traza del emisario de Punta del Chileno.

La modelación permite realizar un monitoreo cuasi continuo, con un valor de concentración promedio en las diez capas verticales que conforman cada box cada una hora durante todos los días simulados. De esta forma para cada simulación se cuenta con una serie de valores de concentración en los boxes de monitoreo definidos. Los resultados obtenidos en el estudio de las distintas alternativas de emisario simuladas se evaluaron en base a la normativa europea relativa a la calidad de aguas de baño [3] en las cuales se trabaja con frecuencias de ocurrencia (Tabla 1). Dicha normativa establece que aquellas aguas en las que al menos el 95% de los muestreos no sobrepasa las 2.000 ufc/100ml son aguas aptas para el baño de buena calidad. Aquellas aguas que cumplan con lo anterior y además cumplan con que al menos el 80% de los muestreos no sobrepase las 100 ufc/100ml se clasifican como aguas aptas para el baño de muy buena calidad, mientras que aquellas aguas que no cumplan ni siquiera con la primera condición se clasifican como aguas no aptas para el baño. Para evaluar los resultados obtenidos con las distintas alternativas de descarga en los boxes definidos alrededor de la Isla de Lobos se utilizó el criterio exigido en la



normativa europea relativa a la calidad de aguas para la cría de mariscos [4]. Dicha normativa propone como criterio de calidad de agua para asegurar la buena calidad de los moluscos directamente consumidos por el hombre que al menos el 75% de los muestreos no sobrepase las 300 ufc/100ml.

Aguas de baño	Cant. Muestrros \leq 2000 ufc/100 ml	Cant. Muestrros \leq 100 ufc/100 ml
Aptas		
Muy buena calidad	$\geq 95\%$	$\geq 80\%$
Buena calidad	$\geq 95\%$	$< 80\%$
No Aptas	$< 95\%$	-

Tabla 1: Clasificación de las aguas de baño en base a los valores de concentración de coniformes fecales según la normativa europea.

Análisis de la alternativa seleccionada

Una vez determinada la ubicación del emisario y la longitud necesaria para descargar sin impactar las playas cercanas a la zona de vertido se realizó un análisis del diseño del difusor seleccionando distintas orientaciones de los puertos de descarga con el objetivo de seleccionar un diseño que maximice la dilución inicial obtenida minimizando además la concentración de coliformes en la zona costera. Se analizaron, entre otros, puertos de descarga horizontal y vertical, así como también difusores descargando a 90°, 45° y colineales con el eje del difusor.

Por ultimo, se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a determinados parámetros del mismo que fueron definidos en base a valores recomendados. Se estudió la sensibilidad del modelo de transporte a tres parámetros diferentes, dos que intervienen en la representación del movimiento turbulento de las partículas descargadas y un tercer parámetro que interviene en la representación de la difusión turbulenta.

RESULTADOS

Emisarios Largos

El análisis de alternativas de descarga a través de emisarios largos consistió en la simulación de la evolución de la pluma considerando una descarga continua durante 18 días en época de verano y su monitoreo a través de la definición de boxes en la zona de playas a 300 m de la costa y en la costa de las Islas Gorriti y de Lobos.

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la pluma de descarga superficial y la concentración de coliformes fecales en la misma, obtenida con el modelo en dos instantes de tiempo seleccionados al descargar en la traza de Punta Salina a 5.500 m de la costa. El primer instante (a) corresponde a una situación de flujo entrante al Río de la Plata, en donde la pluma se desplaza hacia el Noroeste alcanzando con concentraciones muy bajas la costa Sureste de la Isla Gorriti pero sin afectar la zona de Punta Salina, principalmente debido a la gran distancia existente entre la costa y el punto de descarga. El segundo instante seleccionado (b) se corresponde con una situación de flujo saliente y paralelo a la costa de la Playa Brava en el cual se observa la cercanía de la descarga a la Isla de Lobos y la afectación que la pluma genera sobre la misma.

La dilución inicial calculada por el modelo con el difusor estándar mencionado anteriormente para las distintas alternativas de emisarios largos se presenta en la Tabla 2. En la misma se observa que las mayores diluciones iniciales se obtuvieron con las alternativas de descarga en Punta Salina y San Rafael, siendo el valor más alto el obtenido en San Rafael a 5.000 m de la costa. En la Figura 6 se presenta a modo de ejemplo la variación temporal de la dilución inicial durante los 18 días de simulación de la descarga en la traza de Punta Salina a 5.500 m de la costa, donde se observa que la dilución inicial en general oscila alrededor de 85, con picos mayores a 150 y valores bajos menores a 50.

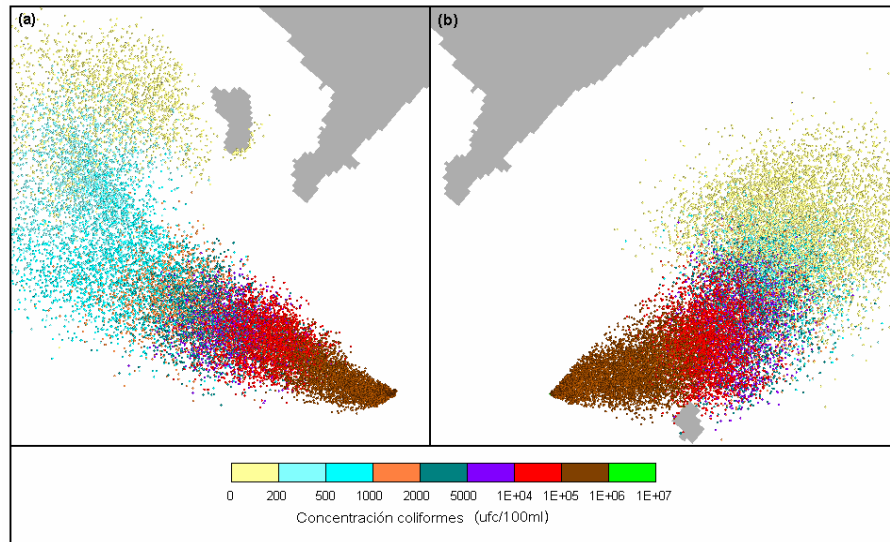


Figura 5: Ubicación y concentración de la pluma de descarga obtenida con el modelo al descargar en Punta Salina a 5.500 m de la costa en dos instantes del período modelado.

Alternativa	Dilución inicial
Punta Salina	
2.100 m	85
5.500 m	87
San Rafael	
2.000 m	75
3.000 m	83
4.000 m	87
5.000 m	90
Punta Chileno	
1.700 m	49
3.500 m	67
6.000 m	75

Tabla 2: Dilución inicial media obtenida para las alternativas de descarga a través de emisarios largos.

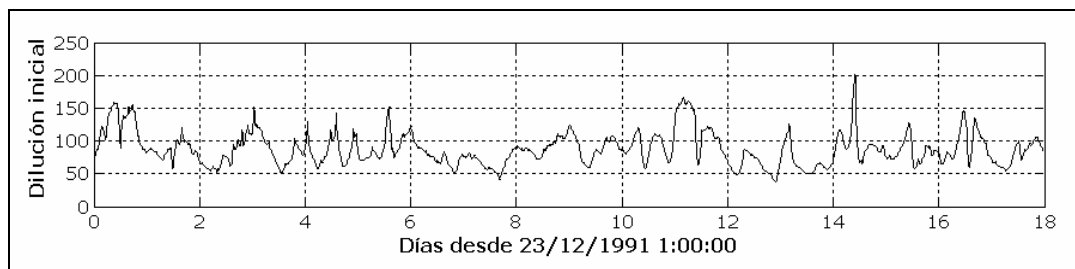


Figura 6: Variación temporal de la dilución inicial obtenida durante los 18 días simulados con la descarga en Punta Salina a 5.500 m de la costa.

Para cada una de las alternativas de descarga analizadas se obtuvo la variación temporal de la concentración de coliformes en cada uno de los boxes de control definidos. A partir de cada serie se calculó la curva de frecuencia en cada box para cada alternativa. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 7 la variación temporal obtenida para la alternativa de descarga en Punta Salina a 2.100 m en un box ubicado a 300 m de la costa sobre la punta. En la misma se observa que la afectación en la costa no ocurre de forma continua, sino que se da a través de diferentes eventos en los cuales la pluma se dirige hacia la costa. Se observa por ejemplo que entre los días 4 y 8 en la costa

de Punta Salina se registran colimetrías mayores a 100 ufc/100ml casi todo el tiempo, y en cambio entre los días 8 y 10 la zona no se ve afectada.

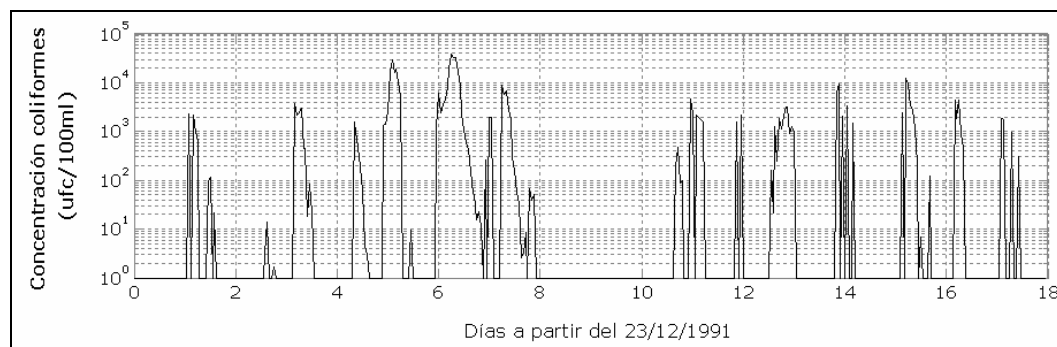


Figura 7: Variación temporal de la concentración de coliformes durante los 18 días simulados con la descarga en Punta Salina a 2.100m en un box costero ubicado sobre la punta.

Con el fin de realizar un análisis conjunto de las nueve alternativas de emisarios largos analizadas se presentan en la Tabla 3 las curvas de frecuencia en el box más afectado con cada una de las alternativas de descarga analizadas.

Rangos (ufc/100ml)	Pta Sal 2100	Pta Sal 5500	San Raf 2000	San Raf 3000	San Raf 4000	San Raf 5000	Pta Chi 1700	Pta Chi 3500	Pta Chi 6000
	Box nº 20	Box L1	Box nº 1	Box nº 1	Box nº 1	Box nº 1	Box nº 34	Box G1	Box G1
< 100	76.6	80.1	46.1	63.4	87.5	97.2	53.2	67.1	92.1
< 200	78.9	84.3	49.3	66.7	89.1	97.5	57.4	69.4	93.3
< 500	81.0	89.1	53.2	73.1	91.9	98.6	62.3	73.8	94.2
< 1000	83.8	92.6	58.8	79.9	94.9	98.6	67.6	76.2	95.8
< 2000	87.5	94.9	66.4	83.8	97.0	99.5	70.8	78.9	97.5
< 5000	91.4	97.9	75.0	91.4	99.8	100.0	75.7	82.2	98.1
< 1E+04	94.0	99.1	85.0	97.5	100.0	100.0	78.9	86.1	98.6
< 2E+04	96.8	99.5	95.1	99.5	100.0	100.0	85.2	89.6	99.1
< 5E+04	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.4	94.9	100.0
< 1E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	97.7	100.0
< 5E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+06	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+07	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla 3: Frecuencia de ocurrencia (%) para los distintos rangos de colimetría obtenidos con el modelo en los boxes costeros más afectados para cada alternativa de emisarios largos analizada.

Los resultados muestran que con las alternativas de descarga Punta Salina 2.100 m, San Rafael 2.000 m y 3.000 m y Punta Chileno 1.700 m y 3.500 m, se registraron colimetrías mayores a 2.000 ufc/100ml durante porcentajes de tiempo mayores al 5% en la zona más afectada. Por lo tanto, en base a la clasificación de aguas de baño definida en la normativa europea, dichas alternativas de descarga contaminan alguna zona costera cercana impidiendo su uso para el baño recreativo. Por otro lado, aun las zonas costeras más afectadas con las alternativas de emisarios de descarga Punta Chileno 6.000 m, y San Rafael 4.000 m y 5.000 m cumplen con la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad.

Cabe destacar que a pesar de que la zona más afectada de las alternativas de descarga en Punta Chileno 3.500 y 6.000 m coincide con una zona de cría de mariscos (costa de la Isla Gorriti) también es una zona de baños. Por lo tanto, dichas alternativas fueron evaluadas en base al criterio de balneabilidad ya es más restrictivo que el criterio de calidad de agua para la cría de mariscos.

Para evaluar la alternativa de descarga en Punta Salina 5.500 m a la luz de la normativa europea fue necesario comparar los resultados obtenidos en la simulación con el criterio exigido en dicha normativa relativo a la calidad de aguas para la cría de mariscos. La normativa europea propone como criterio de calidad de agua para asegurar la buena calidad de los moluscos directamente consumidos por el hombre que al menos el 75% de los muestreos no sobrepase las 300 ufc/100 ml. Por lo tanto, las aguas costeras de la Isla de Lobos cumplen con el criterio de aptitud para cría de moluscos al descargar en la traza Punta Salina a 5.500 m. Por otro lado, la zona de baño más afectada con esta alternativa de descarga entra dentro de la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad.



En síntesis, los resultados presentados muestran que los emisarios más cortos analizados en cada traza generan un impacto significativo sobre las playas cercanas, con concentraciones menores a 2000 ufc/100ml durante porcentajes de tiempo menores a un 95%. En general el aumento de longitud mejora la calidad de las playas cercanas a la descarga aunque en ciertos casos aparecen otras afectaciones. En Punta Salina la mayor longitud analizada mejora la calidad en las playas cercanas a Punta Salina que se veían afectadas por un emisario más corto, no así en la costa de la Isla de Lobos. En San Rafael en cambio, ocurre que a medida que se aumenta la longitud del emisario el impacto sobre todas las playas cercanas disminuye, siendo mayor esa disminución al pasar de los 2.000 m a los 3.000 m de longitud. En Punta Chileno aumentar de 1.700 m a 3.500 m mejora considerablemente la calidad en las playas pero impacta profundamente la Isla Gorriti y al aumentar a 6.000 m los resultados muestran que la afectación generada en la zona de playas y en la Isla Gorriti es aceptable.

Finalmente se concluye a partir de este análisis de emisarios largos que la descarga en la traza definida como San Rafael es la que genera menor afectación en las playas y en las islas a igual longitud de emisario. En dicha traza se puede afirmar que, a partir de una longitud de emisario entre 3.000 m y 4.000 m, las condiciones de balneabilidad en las playas cercanas se verían muy poco afectadas, garantizándose condiciones de calidad para el uso de baño recreativo en las mismas a partir de los 4.000 m de longitud.

Emisarios Cortos

El análisis de alternativas de descarga a través de emisarios cortos consistió en la simulación de la evolución de la pluma considerando una descarga continua durante 30 días en época de verano y su monitoreo a través de la definición de boxes en la zona de playas a 300 m de la costa y en la costa de las Islas Gorriti y de Lobos.

En todas las alternativas de descarga con emisarios cortos ubicados sobre la traza definitiva que fueron analizadas en este trabajo se registraron colimetrías menores a 100 ufc/100ml el 100% del tiempo en todos los boxes de monitoreo definidos bajo las condiciones de diseño. Por lo tanto, en base a la clasificación de aguas de baño definida en la normativa europea, las aguas de baño de las zonas costeras cercanas a la descarga entran dentro de la clasificación de aguas aptas para baño de muy buena calidad para las cuatro longitudes de emisario analizadas.

Los resultados obtenidos al analizar la descarga de la planta bajo condiciones de contingencia muestran en cambio que un emisario de 600 m ubicado en la traza definitiva generaría un impacto significativo sobre la balneabilidad de la zona costera cercana, es decir sobre la Playa Brava de Punta del Este y las playas de La Barra. Este impacto disminuye considerablemente al aumentar la longitud de dicho emisario pero la mejora más significativa se observa al aumentar a 800 m la longitud del mismo.

La Tabla 4 presenta la curva de frecuencia en los boxes más afectados en situación de contingencia para cada alternativa de descarga analizada. A partir de los valores presentados en dicha tabla se puede observar que ninguna de las longitudes de emisario analizadas cumple, bajo condiciones de contingencia, el requisito impuesto por la norma para clasificar a las aguas como aptas para el baño de muy buena calidad. Sin embargo, todas las longitudes verifican la condición que clasifica a las aguas como aptas para baño de buena calidad. Es importante resaltar también que ninguna de las alternativas, aún en situación de contingencia, afecta bacteriológicamente a las Islas cercanas (Gorriti y Lobos) ni a la costa Oeste de Punta de la Salina.

Rangos (ufc/100ml)	600 m		800 m		1000 m		1200 m	
	Box n°21	Box n°26	Box n°20	Box n°25	Box n°18	Box n°23	Box n°18	Box n°23
< 100	52.2	65.1	63.9	72.9	67.1	72.8	72.6	80.4
< 200	61.9	75.1	72.6	79.4	78.9	79.0	82.8	86.8
< 500	76.0	84.6	88.5	89.3	96.1	88.9	97.8	93.2
< 1000	88.5	91.5	96.4	95.6	100.0	96.1	100.0	97.5
< 2000	97.6	96.8	99.7	98.5	100.0	98.8	100.0	99.0
< 5000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 2E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 5E+04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
< 1E+05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla 4: Frecuencia de ocurrencia (%) para los distintos rangos de colimetría obtenidos con el modelo en los boxes costeros más afectados para cada alternativa de emisarios cortos analizada.



A partir de lo anterior se considera que dentro del rango de longitudes analizadas sobre la traza definitiva la alternativa aceptable desde el punto de vista de la balneabilidad de las playas del balneario es un emisario de 800 m. Con un emisario de dicha longitud, los resultados obtenidos con el estudio de modelación muestran que se estarían garantizando playas clasificadas como de muy buena calidad para baños en toda la costa de Punta del Este y Maldonado bajo las condiciones de diseño del funcionamiento de la planta de tratamiento proyectada. Por otra parte, en caso de que dicha planta sufriera algún tipo de mal funcionamiento y se descargara bajo condiciones de contingencia, las playas cercanas a la zona de descarga se transformarían en playas aptas para baños de buena calidad durante el corto período de tiempo que se supone durarían las fallas.

Una vez seleccionada la ubicación y la longitud del emisario subacuático a través del cual será descargado el líquido cloacal tratado de la zona de Punta del Este y Maldonado al Océano Atlántico, se realizó un diseño preliminar del difusor. Los resultados obtenidos en el análisis del diseño del difusor muestran que la alineación de los puertos influye considerablemente en los valores de dilución inicial y en las colimetrías registradas en los boxes de control definidos en la zona costera cercana a la descarga. Por un lado, el análisis comparativo de las diluciones iniciales obtenidas con los distintos difusores analizados muestra que una descarga vertical o a 45 ° del plano horizontal no favorece la mezcla del líquido descargado con el medio receptor. Esto se debe principalmente a que dichas alineaciones favorecen la flotación del líquido descargado que existe naturalmente por la diferencia de densidades, ya que la descarga es menos densa que el agua salada del Océano Atlántico. Las descargas en el plano horizontal en cambio favorecen la mezcla inicial y dentro de las distintas alineaciones horizontales analizadas la que logra una mayor mezcla inicial es una descarga perpendicular a la costa, es decir, paralela a la alineación del emisario. Esto se debe principalmente a que la alineación de dicho difusor optimiza la influencia de las corrientes en la mezcla inicial, ya que las mismas en el punto de descarga tienen una dirección preferencial de flujo paralela a la costa, es decir, perpendicular al emisario y por ende perpendicular a los puertos de descarga.

Los resultados obtenidos durante el análisis de sensibilidad de la solución a los parámetros del modelo muestran que los parámetros asociados a la componente turbulenta del movimiento de las partículas tienen gran influencia en la modelación de las colimetrías en la zona de los boxes costeros. De todas formas, aún duplicando los valores de estos parámetros (condición más desfavorable), el emisario a 800 m garantiza condiciones de alta calidad para baños en las playas cercanas a la descarga. Por otro lado, los resultados muestran que el parámetro relacionado con la difusión turbulenta del contaminante tiene una menor influencia en los resultados obtenidos que los parámetros que controlan el movimiento turbulento de las partículas. No obstante, se ha identificado que variaciones de dicho parámetro generan mayores colimetrías máximas en los boxes costeros. Nuevamente en este caso hay que observar que se garantizan condiciones de muy buena calidad en las playas ya que las colimetrías máximas en los boxes no superan el valor de 35 ufc/100 ml. Para mayor seguridad se realizaron las simulaciones con los parámetros más desfavorables para las condiciones de contingencia pero se observó que incluso bajo estas condiciones las playas de la zona se clasificarían como de buena calidad para el baño recreativo según la normativa europea.

CONCLUSIONES DEFINITIVAS

La implementación y calibración del modelo hidrodinámico tridimensional MOHID para representar el flujo en la zona de Punta del Este y alrededores ha permitido aplicar un modelo lagrangiano de transporte de sustancias basado en el flujo simulado por el mismo para realizar un estudio prospectivo de las alternativas de descarga del líquido residual del área Maldonado-Punta del Este a través de un emisario subacuático.

La alternativa seleccionada corresponde con un emisario a 800 m de la costa en la zona de Rincón del Indio (traza definitiva) con un difusor alineado con la traza del emisario, de 100 m de longitud y conformado por 20 puertos equiespaciados con descarga horizontal y perpendicular a la línea de costa, por el cual se realizaría la descarga del líquido cloacal tratado de Punta del Este y Maldonado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1.- IMFIA. Informe Final del Convenio “Estudios técnicos marítimos para evaluar la alternativa de descarga en Punta del Este” entre Tahal-Fing (IMFIA). 215 pp. Agosto 2007.



2.- MARETEC. Lagrangian Module (Mohid). User Guide. 11 pp. September 2006.

3.- Comunidad Europea. TEXTO consolidado producido por el sistema CONSLEG de la Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. CONSLEG: 1976L0160 — 05/06/2003.

4.- Comunidad Europea. Directiva 79/923/CEE del Consejo, de 30 de Octubre de 1979 relativa a la calidad exigida a las aguas para cría de moluscos. DOCE 281/L, DE 10-11-79.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Empresa Tahal Consulting Engineers Ltd por financiar el estudio.