

XXIº Congreso Nacional del Agua 2007

Tucumán, 15 al 19 de Mayo de 2007

MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA EN EL RÍO GUALECUAYCHÚ EN CONDICIONES DE SUDESTADA

Julio Cardini, Alejandro Zabalett, Néstor Oliver y Daniel Mársico

Grupo de Estudio de la Contaminación del Río Uruguay (GECRU)
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay (FRCU)
Ingeniero Pereira 676 (CP 3260) TE/Fax: 03442425541 / 03442423803
e-mail: juliocardini@ciudad.com.ar / zabaleta@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

El Grupo GECRU desarrolla un proyecto de investigación sobre la contaminación del Río Uruguay y sus afluentes a fin de evaluar su impacto en el curso fluvial, especialmente en los balnearios de las ciudades ribereñas. Se utiliza un modelo bidimensional hidrodinámico y un modelo acoplado de transporte de contaminantes para resolver la ecuación de advección-dispersión bidimensional, con el objeto de determinar la dispersión de los contaminantes descargados en el medio fluvial. Las condiciones de borde que requiere el modelo bidimensional hidrodinámico son generadas por el modelo matemático unidimensional del Río Uruguay (tramo Concordia – Nueva Palmira) que incluye el Río Gualeguaychú.

Se describe la modelación bidimensional del impacto de los vertidos cloacales sin tratamiento de la ciudad de Gualeguaychú en Arroyo del Cura, sobre las playas de uso balneario, simulando un extenso tramo del Río Gualeguaychú hasta su desembocadura en el Río Uruguay.

Se verificaron en detalle los resultados de una modelación simplificada realizada en el año 2001, mediante la cual se detectó el alto riesgo de exposición a aguas contaminadas que corría la población en ocasión de sudestadas. En efecto, los balnearios ubicados a la vera de la ciudad teóricamente están aguas arriba de la descarga cloacal, pero podían verse afectados transitoriamente por una intensa pluma de contaminación causada por la inversión de la corriente fluvial al ascender rápidamente la marea para una situación de estiaje del río. Esta situación se puso en conocimiento de las autoridades. Posteriormente, se construyó una Planta de Tratamiento de los efluentes cloacales, que comenzó a operar en el año 2005.

Se presentan los resultados de una modelación realizada a los efectos de verificar la mejora en las condiciones del río para uso balneario, que la operación de dicha planta genera, teniendo en cuenta la concentración de bacterias coliformes medida a la salida de la misma.

Se concluyó que funcionando la planta adecuadamente, aún en caso de sudestadas con inversión de corriente, la calidad de agua en los balnearios no se ve afectada por causa de la descarga cloacal en un grado tal que impida el uso recreativo con contacto directo.

Palabras Clave: Contaminación Bacteriológica, Modelación, Calidad de Agua, Río Gualeguaychú

INTRODUCCIÓN

La cuenca Hidrográfica del Gualeguaychú es una de las siete cuencas de la provincia de Entre Ríos. El Río Gualeguaychú cuyo significado es “agua de andar despacio”, “agua tranquila” nace en la Lomada Grande, Departamento San Salvador, a 7 km. al Sudeste del pueblo Jubileo, es tributario del río Uruguay, corriendo de Norte a Sur, ocupando la depresión entre dos lomadas, siendo su longitud aproximada de 190 km. Su curso superior es angosto, se caracteriza por tener una de sus orillas barrancosa y la otra baja y pantanosa, son numerosos los arroyos y arroyuelos que drenan las aguas de lluvia al Gualeguaychú, entre ellos los arroyos Gena, Santa Rosa, San Antonio, Galeyán, Crucesitas, Isleta Capilla y San Pascual.

El río Gualeguaychú en su trayecto final, recorre con sus aguas balnearios ubicados próximos a la ciudad del mismo nombre, con lo cual es preciso lograr la determinación de las condiciones de calidad de agua para este curso debido a los potenciales riesgos que implican los cambios de concentración de contaminantes, caudal y nivel de río, lo que trae aparejados peligros sobre la salud humana.

OBJETIVO DEL ESTUDIO

El trabajo tuvo como principal objetivo estudiar la contaminación del Río Gualeguaychú frente a la ciudad homónima, a fin de evaluar su impacto sobre el curso y los balnearios ubicados a ambos márgenes del río, evaluando situaciones pasadas, presentes y futuras que nos permitan entender el problema desde sus comienzos, a los efectos de realizar recomendaciones a las autoridades competentes sobre las medidas a adoptar para solucionar estos problemas.

Como objetivo complementario, se presenta la aplicación de modelos matemáticos bidimensionales para estudiar la dispersión de contaminantes en el Río Gualeguaychú desde aguas arriba de la desembocadura del Arroyo Galeyán (incluyendo parte de este último) hasta su desembocadura en el Río Uruguay.

Esta modelación permitió evaluar el impacto en la calidad del agua debido a los vertidos cloacales de la ciudad de Gualeguaychú, buscando determinar su efecto sobre los sitios destinados a usos recreativos bajo condiciones de sudestada.

METODOLOGÍA EMPLEADA

Se aplicó el modelo bidimensional hidrodinámico RMA2 (U.S.Army Corps of Engineers - USACE), el cual permite simular flujos naturales a superficie libre, donde el movimiento es esencialmente horizontal, utilizando el método de elementos finitos para calcular las velocidades medias del flujo y los niveles de agua. La calibración del modelo consistió en el ajuste de los coeficientes de rugosidad de Manning y de dispersión hidrodinámica, hasta obtener una solución estable y con velocidades similares a las medidas.

Para simular el problema del transporte de contaminantes en el río debe resolverse la Ecuación de Advección - Dispersión Bidimensional, cuya solución depende fundamentalmente de las condiciones de borde impuestas, de los coeficientes de dispersión longitudinal y transversal; y del coeficiente de decaimiento para una reacción de primer orden.

El estudio se desarrolló en dos fases, una en el año 2001 en la cual se aplicó un modelo bidimensional simplificado de transporte de contaminantes basado en el método de las imágenes, el cual supone que el ancho y profundidad de la sección transversal del río así como la velocidad del flujo son constantes.

En la segunda fase realizada en el año 2005, en la cual se verificó el efecto de la planta de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad recientemente construida, se aplicó el modelo RMA4 del USACE, el cual permite especificar descargas de contaminantes y calcular su transporte en el campo de velocidades y niveles calculado por el modelo RMA2.

La información correspondiente a las condiciones de borde de nivel aguas abajo y caudal aguas arriba necesarias para las modelaciones bidimensionales, son obtenidas en cada caso mediante la simulación hidrodinámica unidimensional con el modelo MIKE 11, calibrado y operativo para el tramo Concordia-Nueva Palmira, incluyendo el Brazo del río Gualeguaychú, el río Gualayán y el Arroyo El Cura, donde se encuentra la descarga cloacal de la ciudad de Gualeguaychú.

Para la realización del estudio se debieron estimar caudales, adoptar valores típicos de descargas y realizar verificaciones de los valores adoptados mediante mediciones de campo, a los efectos de comprobar los valores de los parámetros que se ingresan al modelo.

MUESTREOS DE CALIDAD DE AGUA

Se realizó en el año 2001 un muestreo de tipo bidimensional (distribución areal) consistente en 18 muestras sobre el Río Gualeguaychú distribuidas en 6 perfiles (en cada uno en la margen derecha, centro del cauce y margen izquierda), más tres puntos sobre el Arroyo El Cura, que se presenta en detalle en conjunto con el resto de los muestreos.

Para las determinaciones analíticas se emplearon métodos especificados por la Agencia de protección del ambiente (EPA) y los métodos estándares para el examen del agua y de aguas residuales (AWWA, APHA, and WEF, 18th ed., 1992).

Determinación de coliformes fecales: Método de la membrana filtrante. Ufc/100 ml medio agar mFC . Se utilizan volúmenes estándares de muestra, que son pasados a través de membranas filtrantes de nitrato de celulosa, 0.45 micrones de poro las cuales retienen las bacterias presentes en la misma. Posteriormente, las membranas son colocadas en cajas de Petri conteniendo un medio de agar mFC modificado y son incubadas a 44,5 °C durante 24 horas. El número de coliformes fecales se determina por el conteo de colonias azules típicas bajo lupa. La muestra se preservó en un frasco de Plástico o Vidrio (estériles), refrigerada a 4 °C, durante un período de 6 horas a 8 horas.

En la Figura N° 1 se muestra un esquema con la distribución espacial de los puntos y con los valores de concentración de coliformes fecales medidos el 15/11/2001 (en UFC/100ml).

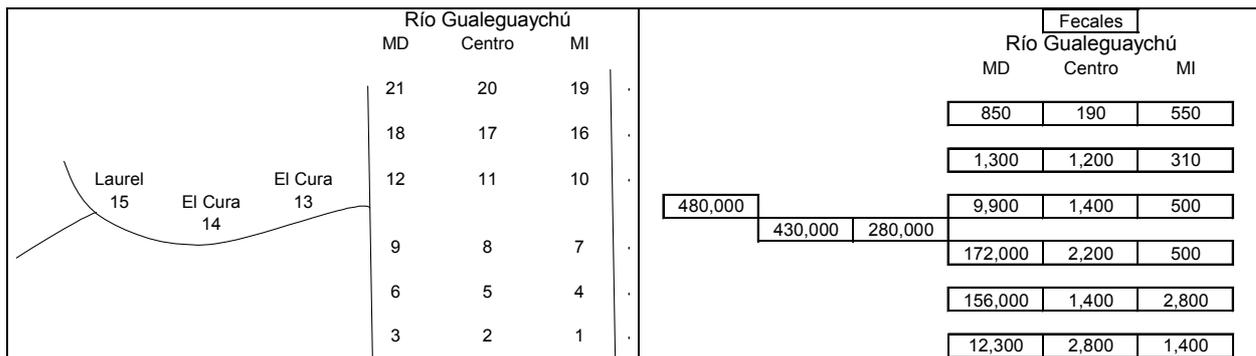


Figura N° 1: Resumen de Muestreo en inmediaciones del ingreso del Arroyo El Cura en el Río Gualeguaychú

Los valores existentes aguas arriba del Arroyo El Cura son del orden de 1.300 a 200 UFC/100ml, lo cual indica que el río ya viene con una carga de contaminación desde aguas arriba. Por lo tanto, el nivel de base de la contaminación es del orden de 10^3 UFC/100ml, nivel que se encuentra también aguas abajo de la desembocadura del Arroyo El Cura, en la margen opuesta (margen izquierda).

Los niveles de concentración de bacterias coliformes fecales medidos en el Arroyo El Cura son del orden de 0,5 Millones de UFC/100ml, aunque la descarga cloacal posee valores más elevados como se pudo apreciar en un muestreo efectuado el 29/08/01 donde se midió 3.500.000 UFC/100ml.

En el Arroyo Gualayán, afluente del Río Gualeguaychú que bordea por el Norte a la ciudad de Gualeguaychú, corresponde considerar un caudal propio mínimo de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con 100 UFC/100ml, según los análisis de condiciones mínimas fluviales efectuados en el 2001, sin considerar la descarga de efluentes industriales del Parque Industrial de Gualeguaychú, que no ha sido evaluada con exactitud en el presente estudio.

El Río Gualeguaychú posee un caudal mínimo del orden de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y habitualmente la concentración de bacterias coliformes fecales del orden de 100 UFC/100ml aunque se incrementa significativamente en la fase inicial de las precipitaciones pluviales.

PARÁMETROS EMPLEADOS EN EL MODELO BIDIMENSIONAL DE CONTAMINACIÓN DEL RÍO GUALEGUAYCHÚ

Se estimaron y ajustaron los parámetros del modelo para obtener una representación adecuada de la realidad medida, particularmente en el muestreo bidimensional efectuado el 15/11/01. El modelo hidrodinámico se simuló empleando coeficientes de dispersión turbulenta (Eddy Viscosity) iguales a $100 \text{ m}^2/\text{s}$, y coeficientes de rugosidad de Manning iguales a 0,025.

Se realizó el ajuste de los caudales fluviales para la condición del muestreo del 15/11/01. El mismo se logró con un caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque como puede apreciarse en las Figuras N° 2 a 4 el horario en que se realizó la corrida del flotador (15:30 a 16:10 aproximadamente) coincide con un brusco descenso del caudal provocado por un incremento de niveles del río (por efecto mareológico-meteorológico) por lo cual es difícil establecer el caudal más apropiado. No obstante, la estimación efectuada se considera suficientemente precisa para el objeto del presente análisis, que es brindar parámetros para un modelo bidimensional simplificado.

Para estimar los caudales propios del Río Gualeguaychú y del Arroyo Gualeyán, se empleó como criterio de distribución el área de la cuenca, asumiendo una precipitación homogénea y una tasa de conversión uniforme entre lluvia y escorrentía.

Área total de la cuenca: 6.600 km², caudal 150 m³/s.

- Río Gualeguaychú: Área = 5.300 km² (80%) / Q = 120 m³/s
- Arroyo Gualeyán: Área = 1.300 km² (20%) / Q = 30 m³/s

Se simuló además una condición de inversión del flujo debido a una sudestada. Para simular condiciones extremas posibles de creciente por efecto mareológico se analizó la simulación efectuada para todo el año 2001 con caudal fluvial del Río Gualeguaychú mínimo buscando una situación con fuerte inversión de caudales. La situación acaecida el 26/10/01 con un ascenso del nivel de 70 cm en 10 horas, en el caso de que el caudal fluvial hubiera sido mínimo habría provocado una inversión de la corriente con un caudal máximo de casi 150 m³/s y una velocidad del orden de 20 cm/s.

Esta condición será utilizada para comprobar con el modelo bidimensional cual es el grado de penetración en el sector fluvial adyacente a la ciudad, de la contaminación generada por la descarga cloacal en el Arroyo El Cura.

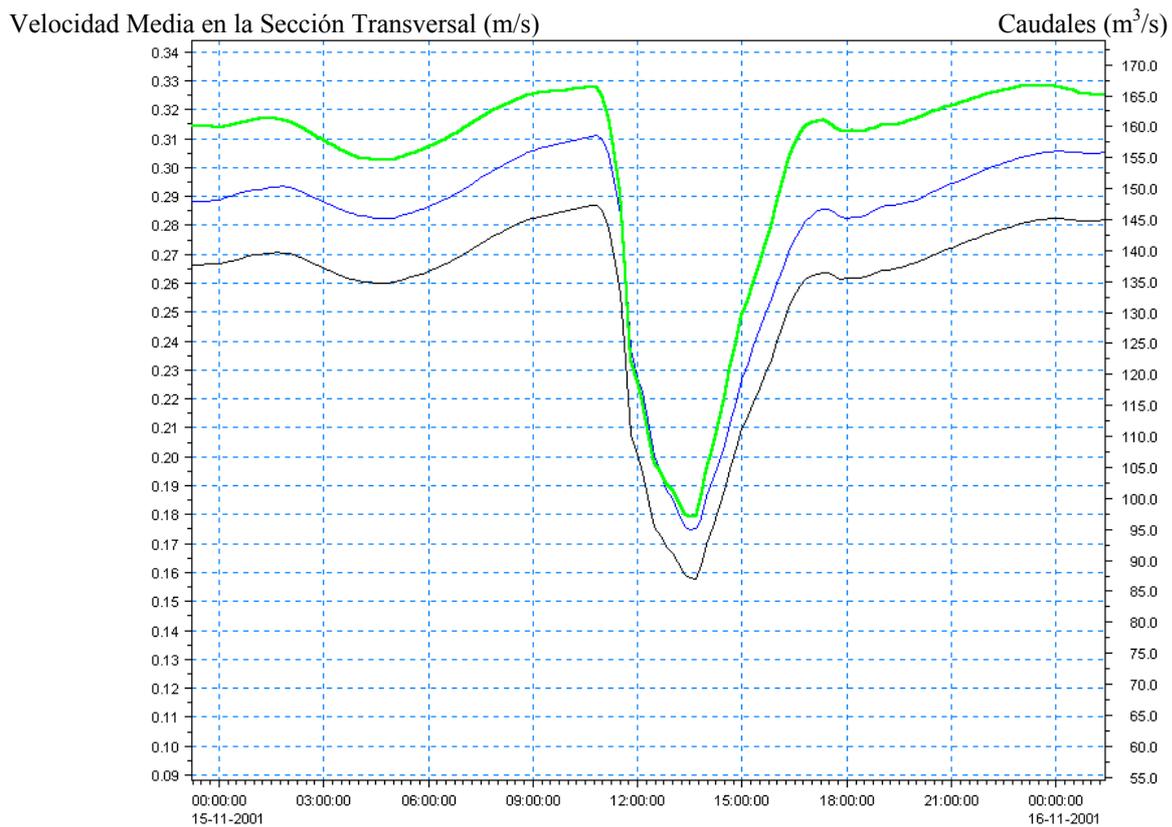


Figura N° 2 Ajuste de velocidad de la corriente (líneas negra y azul) con la corrida de flotador. Muestreo 15/11/01

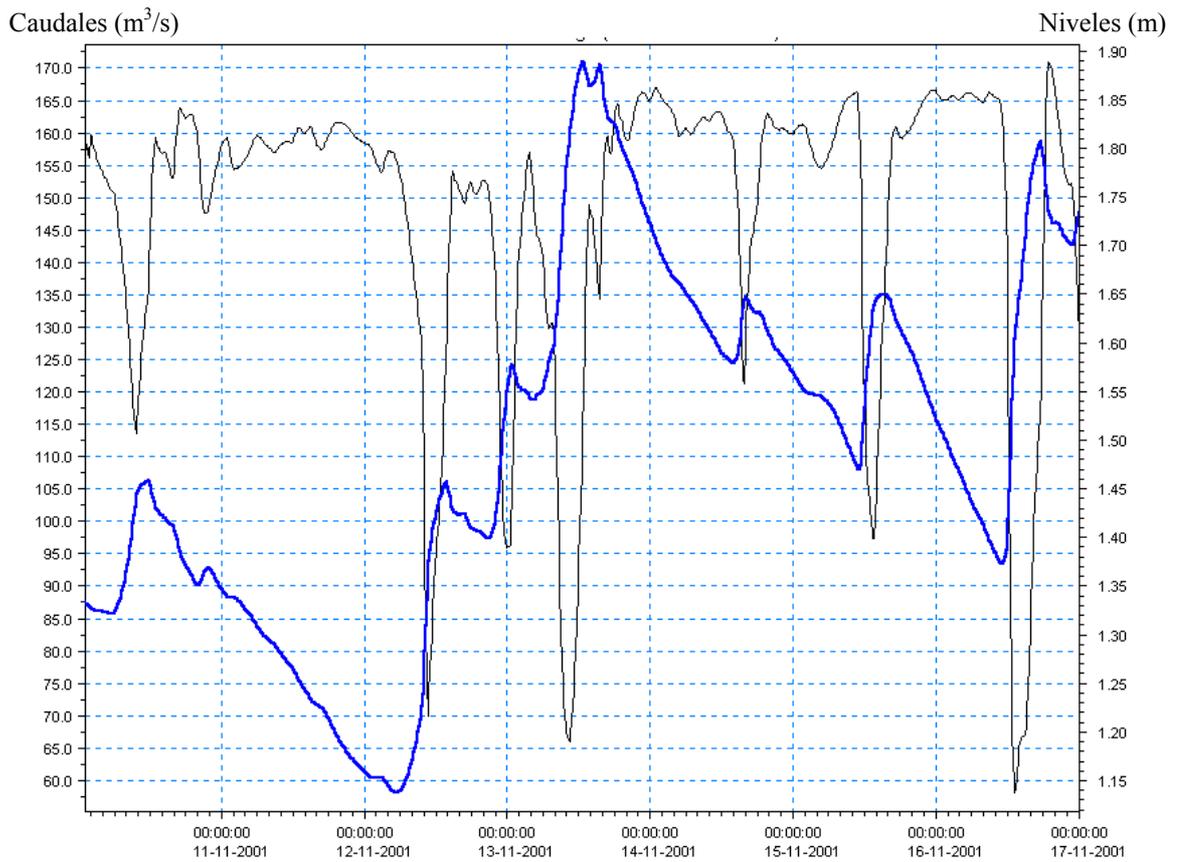


Figura N° 3 Cronología de niveles (water level: línea azul) y caudales (discharge: línea negra) para los días previos al Muestreo 15/11/01

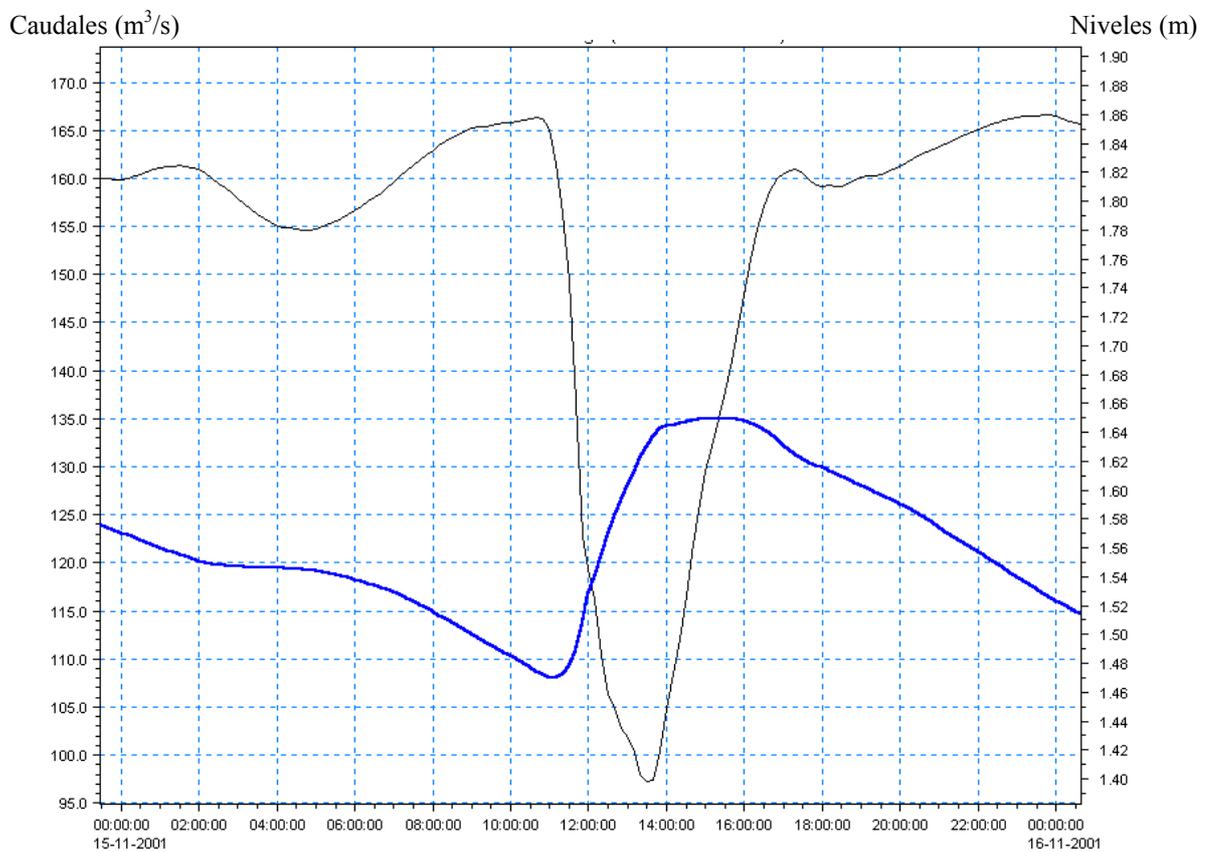


Figura N° 4 Cronología de niveles (línea azul) y caudales (línea negra) para el día de Muestreo 15/11/01

La inversión de velocidades de la corriente se produce entre las 6 y 18 horas del día 26/10/01. En las Figuras N° 5 y 6 puede apreciarse la situación en dos momentos diferentes, uno a las 9 hs cuando el pico de la contaminación pasa en cercanías del Puerto de Gualeguaychú (sólo 3 horas después de iniciada la inversión de corriente) y otro prácticamente al final del proceso (17:30 hs) cuando la contaminación alcanza los últimos balnearios ubicados en cercanías del Puente de la Ruta 136, según los resultados del modelo MIKE 11.

Para resolver el problema del transporte de contaminantes en un río debe resolverse la ecuación de Advección - Dispersión bidimensional. El modelo RMA4 posee algunas limitaciones en cuanto a la posibilidad de especificar en forma flexible los coeficientes de dispersión ya que los mismos son valores fijos pudiendo ser especificados como diferentes para distintos sectores del río, y se especifican las magnitudes correspondientes a los ejes x e y, que no se corresponden estrictamente con las componentes longitudinal y transversal al flujo en cada punto. Estrictamente, desde un punto de vista teórico, se deberían especificar las componentes longitudinal y transversal, en relación con la magnitud y dirección local de la corriente en cada punto de cálculo. En el caso particular que nos ocupa la dirección y es prácticamente la dirección transversal al escurrimiento y la x es la longitudinal.

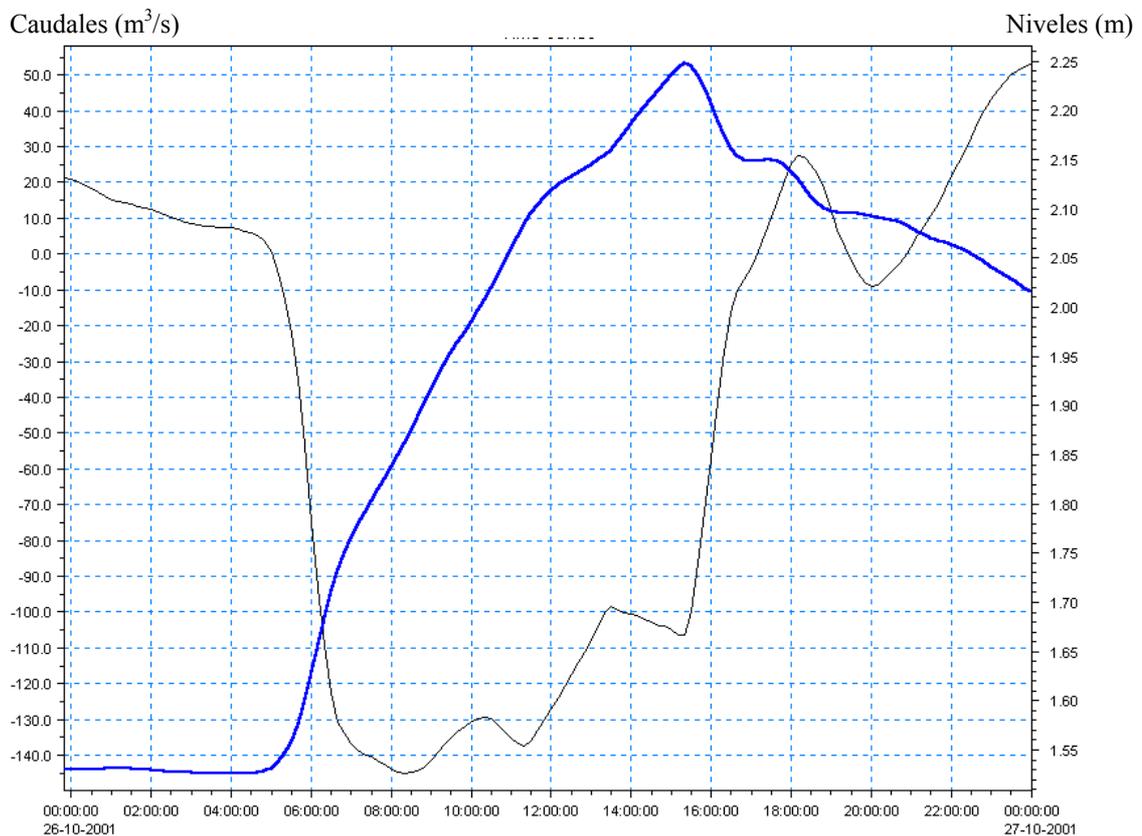


Figura N° 5 Nivel (línea azul) y Caudal (línea negra) del Río Gualeguaychú para una condición de rápida marea creciente

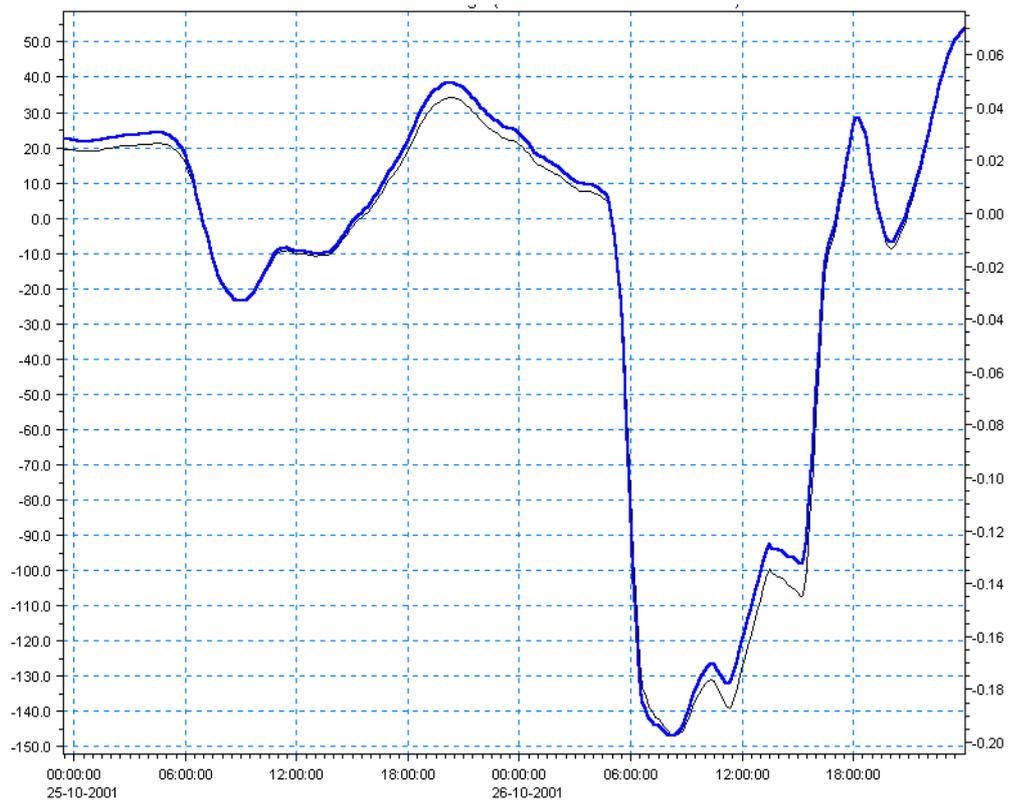


Figura N° 6 Velocidad (línea azul) y Caudal (línea negra) del Río Gualeguaychú para una rápida marea creciente

Los coeficientes de dispersión longitudinal (D_{lon}) y transversal (D_{tran}), que tienen en cuenta el efecto de no uniformidad en la distribución de velocidades sobre la distribución de los contaminantes en el flujo, se pueden expresar en función de parámetros adimensionales dependientes de la profundidad h y de la velocidad de corte u^* , de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$D_{lon} = k_l * h * u^*$$

$$D_{tran} = k_t * h * u^*$$

$$u^* = \sqrt{g * h * i} = 3,13 * U * n / h^{(1/6)}$$

donde i es la pendiente del río, n el coeficiente de rugosidad de Manning (valor típico $n=0,024$ para el Río Uruguay) y U la velocidad media en profundidad de la corriente.

Existen diversos antecedentes para intentar especificar los valores de los coeficientes k_t y k_l , como los trabajos de Elder (1959), Fisher (1969), Harleman (1971) y Boxall (2003). El coeficiente longitudinal tiene escasa influencia en el resultado, mientras que el transversal es determinante para el ajuste. El coeficiente de dispersión adimensional transversal k_t fue estudiado por Rutherford (1994), quien arribó a los resultados indicados en la Tabla N° 1:

Tabla 1: Coeficientes de dispersión según características fluviales

Canales rectos:	$0,15 < k_t < 0,3$
Canales meandrosos:	$0,3 < k_t < 1,0$
Canales con fuerte curvatura:	$1,0 < k_t < 3,0$

Para el tramo en cuestión, en las condiciones de aguas bajas ocurridas durante el muestreo, se obtuvieron valores de $U=0,3$ m/s, $h = 4$ m (cerca de la margen y no muy lejos de la descarga), y $u^*= 0,02$ m/s ; por lo que el coeficiente de dispersión adimensional transversal kt se seleccionó como $kt=0,3$ según lo sugerido por Rutherford (1994) resultando entonces un valor de $D_{tran} = 0,02$ m²/s.

De los ajustes realizados en el año 2001 con el modelo bidimensional simplificado resultó $D_{lon}= 1,5$ m²/s y $D_{tran} = 0,07$ m²/s. Para la simulación se empleó un coeficiente de dispersión homogéneo igual a $0,10$ m²/s, dado que el modelo RMA4 no permite especificar coeficientes distintos según la dirección del flujo, y se requiere incrementar el valor del coeficiente para obtener convergencia.

El coeficiente de decaimiento de coliformes posee escasa influencia en los resultados en la zona analizada y se fijó en $2 \times 10^{(-5)}$ 1/seg, representativo de condiciones de verano.

SIMULACION BIDIMENSIONAL DE LA CONTAMINACIÓN PARA EL CASO DE UNA SUDESTADA CON INVERSIÓN DE LA CORRIENTE – CASO: SIN PLANTA DE TRATAMIENTO

En el caso de ocurrir una sudestada, con un caudal ingresante desde el Río Uruguay de 150 m³/s según se estimó mediante la simulación con el modelo MIKE 11, se obtuvo con el modelo RMA2 el campo de velocidades que se ilustra en la Figura N° 7:

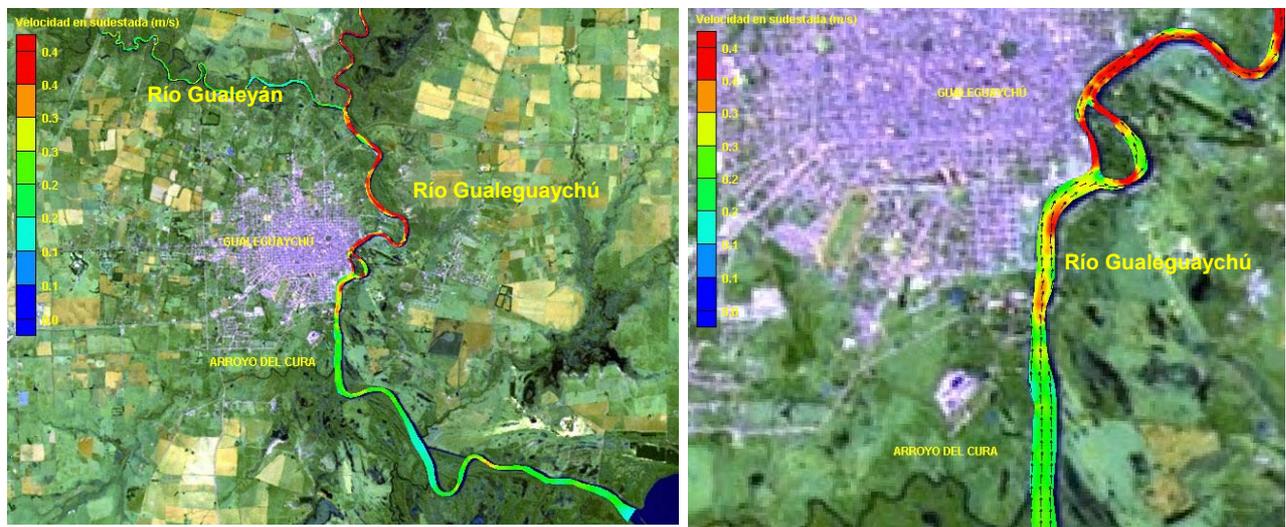


Figura N° 7 Campo de velocidades en el Río Gualeguaychú y Arroyo Gualeyan para una condición de Sudestada

Los resultados obtenidos mediante el modelo RMA4 para una simulación de 9 horas de duración de la inversión del flujo, confirman las conclusiones alcanzadas en el año 2001, mediante el uso de un modelo simplificado, presentándose a continuación resultados de ambos modelos a los efectos de comparar su respuesta (Figuras N° 8 y 9 para el Modelo RMA4 y N° 10 para el Modelo simplificado).

En ambos casos, los valores máximos de concentración de coliformes fecales son del orden de 50.000 UFC/100ml, pasando frente a los balnearios (en 4,5 horas se alcanza una concentración superior a los 10.000 UFC/100ml frente al Balneario Municipal).

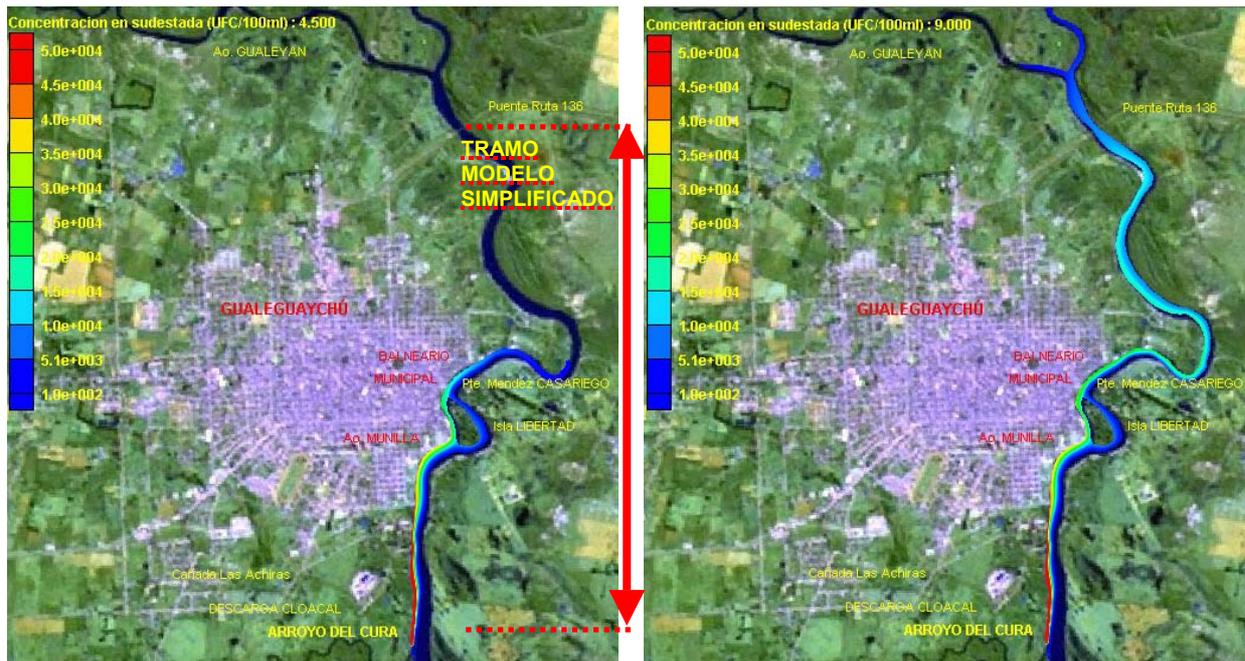


Figura N° 8 Avance de la contaminación durante una sudestada, para 4,5 y 9 horas de plazo desde la inversión de la corriente. Sin Planta de Tratamiento. Vista General. Indicación del Tramo Modelado Simplificadamente en 2001

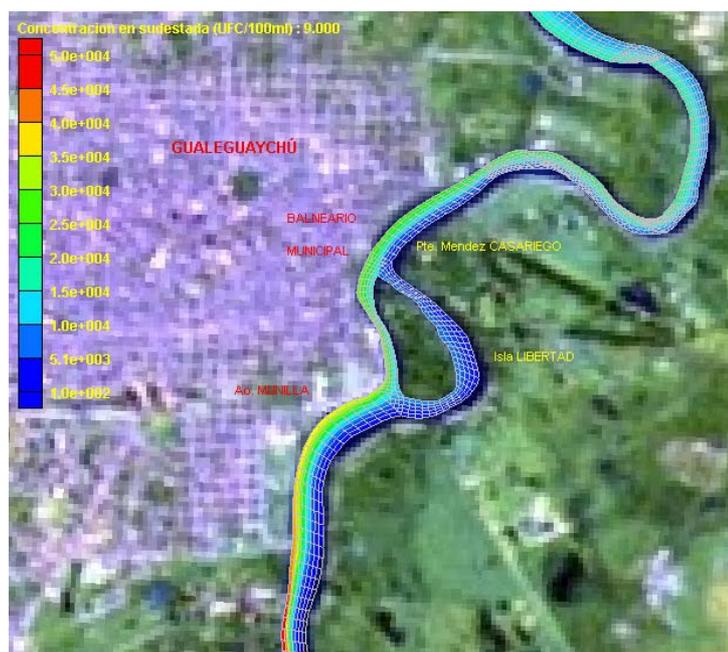


Figura N° 9 Avance de la contaminación durante una sudestada, para 9 horas de plazo desde la inversión de la corriente. Sin Planta de Tratamiento. Vista de detalle de la malla sobre una imagen satelital georeferenciada de baja resolución

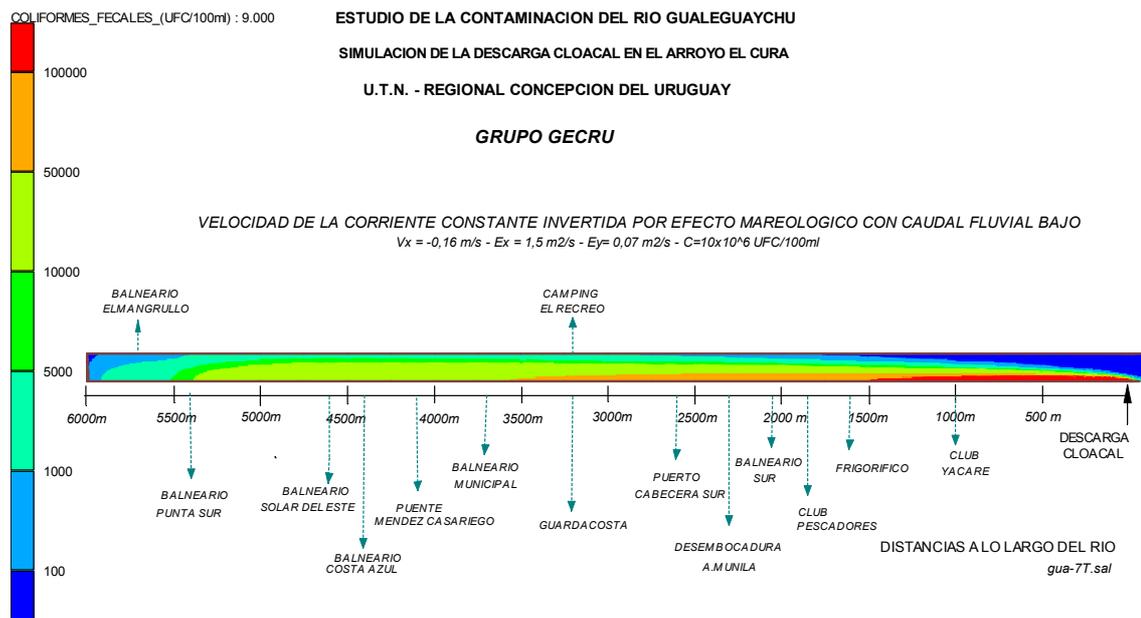


Figura N° 10 Avance de la contaminación hacia aguas arriba por efecto mareológico (Modelo simplificado año 2001)
 Ver tramo representado en la Figura N° 7

SIMULACION BIDIMENSIONAL DE LA CONTAMINACIÓN PARA EL CASO DE UNA SUDESTADA CON INVERSIÓN DE LA CORRIENTE – CASO: CON PLANTA DE TRATAMIENTO.

El 10/05/2005 se inauguró oficialmente la Planta de Tratamiento de efluentes cloacales, construida con participación del Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA), y el Programa BID 1118.

Al predio donde se construyeron las lagunas llegan los dos colectores cloacales de 700mm de diámetro, que volcaban los efluentes cloacales directamente a la Cañada de Las Achiras. Desde su inauguración, la Planta de Tratamiento de Efluentes Cloacales opera procesando el 100% de los efluentes volcados por la planta urbana a la red colectora cloacal, la cual tiene una cobertura que se va acercando al 100%.

La información disponible indica que los volúmenes de líquido cloacal tratados en la planta oscilan entre los 400.000 a 800.000 litros por hora, dependiendo estas variaciones de múltiples variables (hora, día de la semana, estación, temperatura, lluvia, etc.). Ello implica un caudal de 0,11 a 0,22 m³/s, inferior a la capacidad de bombeo máxima, y compatible con las estimaciones previas efectuadas en el año 2001, teniendo en cuenta el incremento de población y del área servida en los últimos 5 años. A los efectos del estudio del impacto en el medio, se adoptará un valor típico de 0,2 m³/s, con una concentración del efluente del orden de 10.000.000 UFC/100 ml, resultando una carga másica igual a 2x10⁶ UFC/100 ml.

De acuerdo a las simulaciones realizadas con el Modelo RMA4, para evitar la afectación de la zona balnearia frente al área urbana de la ciudad durante una sudestada, se requiere disminuir las concentraciones desde un orden de magnitud de 50.000 UFC/100ml estimado sin la Planta, a unas 200 UFC/100ml, lo cual implica que se debe lograr un descenso en un factor 0,004 para poder cumplir con los estándares establecidos de recreación con contacto directo.

Aplicado a la concentración de coliformes fecales asumida para la descarga sin tratamiento, de 10.000.000 UFC/100ml, la máxima concentración admisible a la salida de la Planta de Tratamiento, compatible con la no afectación del uso balneario (sin considerar otros aportes existentes en el área), sería de 40.000 UFC/100ml. La Figura N° 11 muestra los resultados obtenidos.

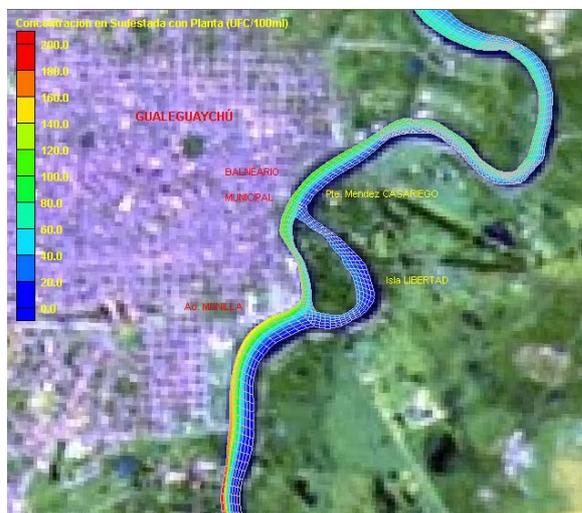


Figura N° 11 Avance de la contaminación durante una sudestada, para 9 horas de plazo desde la inversión de la corriente. Considerando una concentración máxima a la salida de la Planta de Tratamiento del orden 40.000 UFC/100ml.

Se realizaron mediciones en la descarga cloacal luego de la salida de la Planta de Tratamiento, para verificar si el nivel de concentración de contaminantes es inferior a este valor, resultando de los muestreos valores de concentración de coliformes fecales cercanos a las 2.000 UFC/100ml. Cuanto menor sea este valor de la concentración de salida, menor será el impacto de la descarga cloacal en el caso de suceder una sudestada.

CONCLUSIONES

En el Río Gualeguaychú, se ha verificado la validez de la modelación simplificada efectuada en el año 2001, empleando en esta oportunidad los modelos RMA2 y RMA4.

Se verificó que normalmente el aporte cloacal al ingresar al Río Gualeguaychú es conducido hacia aguas abajo debido a la deriva neta provocada por los caudales fluviales, aunque en momentos de creciente mareológica puede retroceder hacia aguas arriba.

Las condiciones riesgosas para el uso recreativo de los balnearios de la ciudad (especialmente los ubicados en la margen derecha del río) que se producían cuando los caudales fluviales eran bajos, y debido al efecto de una marea creciente rápida, se han solucionado con la puesta en funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Efluentes Cloacales. Esto implica que el tratamiento actual del efluente cloacal resulta extremadamente beneficioso para la población dado que disminuye drásticamente el riesgo cierto de contaminación, bajo una combinación de condiciones fluviales y mareológicas desfavorables.

Se ha verificado esta conclusión midiendo la carga contaminante en la salida de las Plantas de Tratamiento a los efectos de controlar que cumpla con el requisito de máxima concentración para no afectar su uso como aguas recreativas. La concentración de coliformes fecales medida fue de 2.000 UFC/100ml, lo cual es sólo un 5% del valor necesario para superar el límite para su uso como

aguas recreativas en el río (40.000 UFC/100ml), lo que demuestra que la correcta operación de la planta soluciona los problemas de contaminación de las playas del Río Gualeguaychú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Elder, J.M. (1959) "*The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow*". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 5, 541-560.

Fisher, H.B. (1969) "*The Effects of Bends on Dispersion in Streams*". Water Resources Research. 5(2), pp. 496–506.

Harleman, D.H.F. (1971) *Estuarine Modelling: An Assessment*. TRACON, Inc., for the Water Quality Office – EPA.

Rutherford, J.C. (1994) *River Mixing*. J.Wiley & Sons, New York.

Boxall, J.B.; I. Gymer and A. Marion, "*Transverse mixing in sinuous natural open channel flows*". Journal of Hydraulic Research Vol. 41, No. 2 (2003) pp. 153–165.