

**SIMULACION 2D DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE CUENCOS AFECTADOS  
POR MAREA FRENTE A DESCARGAS ANTROPICAS**

Fabián A. Bombardelli, Angel N. Menéndez, Pablo A. Tarela & Carla P. X. Vilela  
Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (ex INCYTH)  
CC 21 (1802) Aeropuerto Ezeiza, Argentina

**RESUMEN**

Este artículo presenta una metodología para la simulación bidimensional del aumento de temperatura originado por descargas de sistemas de refrigeración de centrales térmicas en cuerpos de agua sometidos a la acción de la marea. La misma se basa en el cálculo desacoplado del campo hidrodinámico y del térmico.

Se describe la simulación numérica de la hidrodinámica como sucesivos estados estacionarios, se detalla la simulación térmica, indicándose el tratamiento del transporte de calor a través del concepto de manchas gaussianas y se presentan los resultados de un caso de estudio.

**ABSTRACT**

This paper presents a methodology for the two-dimensional simulation of the temperature increase originated by discharges of refrigeration systems of thermal power stations in water bodies subjected to tide action. It is based in the uncoupled calculus of the hydrodynamic and thermal fields.

The numerical simulation of the hydrodynamics, as successive stationary states, is described. The thermal simulation with the heat transport treated through the concept of gaussian spots is also described. The results of a study case is presented.

**INTRODUCCION**

Las centrales termoeléctricas se localizan, en general, en zonas de explotación alternativa baja sobre las márgenes de los ríos, de modo de utilizar sus aguas para el sistema de refrigeración. El diseño más frecuente de este sistema presenta la obra de toma aguas arriba de la central y la descarga de agua calentada aguas abajo de la misma. El agua de toma, luego de atravesar la central, eleva su temperatura en una cantidad esencialmente constante, dependiente del proceso de refrigeración. Por su parte, la temperatura del agua del río cambia de acuerdo a la variabilidad diaria y estacional.

El proyecto es más complicado cuando la central se ubica en la margen del mar o de un estuario (que son cuerpos de agua sometidos a la acción de la marea) ya que el agua calentada puede ser arrastrada hacia la toma en forma periódica, elevando así la temperatura de refrigeración. Esto puede originar una realimentación positiva potencialmente inestable ("cortocircuito térmico"), dado que puede agotarse progresivamente la capacidad refrigeradora del sistema a medida que se toma agua.

Este artículo presenta una metodología para el estudio, mediante técnicas computacionales, del aumento de temperatura del agua en zonas sometidas a la acción de la marea en las cuales se vierte una descarga de una central térmica. La misma es ilustrada mediante su aplicación al estudio del proyecto de una nueva unidad de generación que la empresa Mitsubishi Corporation está realizando en la Central Costanera, lindante con el Río de la Plata y la boca del Riachuelo. Se estudiaron las modificaciones en el campo térmico que introduciría la operación del nuevo circuito de refrigeración. Para ello, se determinaron las condiciones hidrotérmicas con las cuales la central opera en la actualidad y aquellas que tendrían lugar con la puesta en funcionamiento de las nuevas tomas y descargas.

**PLANTEO DEL PROBLEMA. CARACTERISTICAS DE LA ZONA MODELADA**

La región bajo estudio comprende una faja relativamente delgada que, con centro en la desembocadura del Riachuelo en el Río de la Plata, se extiende hacia el norte y hacia el sur a lo largo de 4 km de costa (Figura 1). La zona exterior es somera, con profundidades máximas al cero MOP (cero del Riachuelo) del orden de 3.5 m.

a excepción de las dársenas vecinas a Dock Sud, al muelle de propaneros y al Canal Sur (canal de entrada/salida del puerto) con profundidades máximas del orden de 10 m. Esta zona se halla sometida al régimen mareo-eólico del Río de la Plata, sólo afectado por el caudal del Riachuelo durante eventos de lluvias intensas sobre su cuenca.

La Central Costanera toma actualmente agua para refrigeración del Riachuelo en la posición 1 y la vierte en las ubicaciones 2 y 3 (Figura 1). En la posición 4 se prevé la ubicación de la nueva toma mientras que las nuevas descargas se ubicarán en un mismo cuerpo con las ya existentes.

### METODOLOGIA

La metodología empleada en el estudio se basó en el cálculo desacoplado de las corrientes y del campo de temperaturas, considerando que los cambios térmicos no afectan la hidrodinámica, es decir, que la temperatura puede tratarse como un contaminante pasivo. Para el presente caso, en virtud de que las sobretemperaturas que se verifican en la región bajo análisis no sobrepasan 10° C en general, los cambios en la densidad del agua debidos a las variaciones térmicas pueden despreciarse. En efecto, dado que:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (1)$$

donde:

$\rho$ : densidad

$\rho_0$ : densidad de referencia

$\beta$ : coeficiente de expansión volumétrica del agua

$\Delta T$ : variación de la temperatura.

y adoptando como valor de referencia para la densidad 1000 kg/m<sup>3</sup>, 2 10<sup>-4</sup> 1/°C para el módulo volumétrico y 10 °C para  $\Delta T$ , se obtiene:

$$\rho = 0.998 \rho_0 \quad (2)$$

resultado que permite obviar la corrección y hacer valer la hipótesis de Boussinesq.

Justificado el cálculo desacoplado, surgió la inquietud de si la descarga térmica induce algún tipo de estratificación. En las aguas vecinas a Central Costanera se concluyó que no existe estratificación debido a la escasa profundidad (alrededor de 2 m como máximo), a la intensa mezcla turbulenta vertical y a la forma de la descarga, que se produce a través de un canal. En las dársenas y el Canal Sur puede esperarse algún tipo de estratificación localizada, dadas las mayores profundidades. Sin embargo, se la juzgó como de escasa relevancia a los fines de la presente simulación. En consecuencia, el cálculo se apoyó en los dos modelos siguientes, desarrollados en el INA:

- 1) HIDROBID II, un modelo hidrodinámico 2D integrado en la vertical, que resuelve las ecuaciones para aguas poco profundas;
- 2) MANCHAS, un modelo de transporte de contaminantes, basado en el concepto de seguimiento lagrangeano de "manchas" gaussianas.

La metodología se completa con un tratamiento ad-hoc para simular el mecanismo de realimentación.

#### Modelo HIDROBID II

El sistema computacional HIDROBID II resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas mediante un método en diferencias finitas implícito de direcciones alternadas (ADI). Sus detalles técnicos se presentan en la Referencia [1].

Los datos de ingreso al programa son: batimetría, velocidad, nivel de agua (instantáneos) o relaciones entre ellos sobre contornos entrantes/salientes, dirección y velocidad (instantáneas) del viento, resistencia del fondo, viscosidad de torbellino, pasos espaciales y temporal. Los resultados entregados por el modelo son: las distribuciones espaciales instantáneas del nivel de agua y las velocidades horizontales medias verticales.

### Modelo MANCHAS

El sistema computacional MANCHAS fue concebido para simular el transporte bidimensional integrado en la vertical de sustancias contaminantes de distinta índole. Su versatilidad permite agregar "procesos" en forma rápida y eficiente, lo cual posibilitó simular inicialmente el impacto de la descarga cloacal de la ciudad de Buenos Aires en Berazategui (descargas conservativas y bacteriológicas) [2] y el destino de la descarga cloacal de Bahía Blanca (vertidos conservativos, bacteriológicos y demanda bioquímica de oxígeno) [3]. En esta oportunidad, se utilizó para la simulación del transporte de calor.

Cuando se arroja un contaminante a un cuerpo de agua (por ejemplo mediante un conducto), la cantidad de movimiento del chorro entrante es la responsable del movimiento en sus primeras etapas. Simultáneamente, las fuerzas de flotación actúan a fin de llevar la sustancia hacia la superficie del cuerpo de agua, teniendo lugar efectos tridimensionales. Existen diversos modelos matemáticos que permiten cuantificar las características de la dispersión en estas circunstancias preliminares del transporte, en las que se produce una dilución inicial. Más adelante, en una segunda etapa, cuando la cantidad de movimiento del chorro decae por transferencia hacia el entorno, la sustancia es transportada y diluida por el "ambiente", a través de mecanismos físicos, químicos, bioquímicos y biológicos. La primera etapa de la evolución del chorro se denomina "campo cercano", mientras que la segunda, "campo lejano". El modelo MANCHAS no resuelve el campo cercano tridimensional (esa parte de la dilución inicial hay que especificarla), pero sí el campo cercano bidimensional horizontal (en la medida en que el modelo hidrodinámico provea las corrientes).

Los contaminantes pasivos son acarreados por el movimiento natural de las aguas. Este movimiento puede descomponerse en un flujo medio más otro turbulento, en el sentido de Reynolds. El flujo medio no solamente transporta la sustancia sino que, debido a los gradientes espaciales verticales (advección diferencial), la esparce en la dirección de la corriente. Por su parte, la turbulencia desparrama la sustancia por un proceso difusivo. Este proceso es más eficiente que la difusión molecular, originada por la agitación térmica de las moléculas del fluido. El efecto combinado de la advección diferencial y la difusión turbulenta se llama dispersión.

La ecuación de transporte de un contaminante conservativo (es decir, aquel que no decae debido a procesos biológicos, bioquímicos o químicos), surge de la aplicación de la ecuación de balance de masa a un flujo turbulento. En coordenadas generalizadas, en una descripción bidimensional promediada sobre la profundidad, tiene el siguiente aspecto:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (hC \underline{v}) = \underline{\nabla} \cdot [h \underline{K} \cdot \underline{\nabla} (C)] \quad (3)$$

donde  $C$  es la concentración media en la vertical,  $t$  el tiempo,  $h$  la profundidad de agua,  $\underline{v}$  el vector velocidad medio temporal en la vertical y  $\underline{K}$  el tensor de dispersión.

En forma paralela, si se plantea la ecuación de balance de energía de un flujo turbulento en coordenadas generalizadas, luego de realizar la promediación temporal, se obtiene:

$$\rho \frac{\partial(e)}{\partial t} + \rho \underline{\nabla} \cdot (e \underline{v}^*) = \underline{\nabla} \cdot [ \underline{\chi} \cdot \underline{\nabla} (T^*) ] + 2 \mu \underline{d}' : \underline{\nabla} \underline{v}' \quad (4)$$

donde:

- $e$ : energía interna media temporal
- $\underline{\chi}$ : tensor de difusión térmica turbulenta
- $T^*$ : temperatura media temporal
- $\underline{d}'$ : tensor velocidad de deformaciones fluctuante
- $\underline{v}'$ : vector fluctuación de la velocidad
- $\underline{v}^*$ : vector velocidad medio temporal
- $\mu$ : viscosidad dinámica del agua

Cabe acotar que la Ecuación (4) fue obtenida haciendo uso de la Ecuación de Fourier, ley constitutiva para la transferencia de calor por conducción. El segundo término del segundo miembro de dicha ecuación es una tasa de disipación viscosa y tiene en cuenta el aumento de la energía interna por transferencia de energía cinética turbulenta.

Reemplazando en (4) a la energía interna por su expresión en función de la temperatura, despreciando la disipación viscosa y llevando a cabo la promediación en la vertical, se puede arribar a:

$$\rho c_p \frac{\partial(h T)}{\partial t} + \rho c_p \underline{\nabla} \cdot (h T \underline{v}) = \underline{\nabla} \cdot \left[ h \underline{\chi} \cdot \underline{\nabla} (T) \right] \quad (5)$$

en la cual  $\underline{v}$  y  $T$  representan, al igual que en (3) magnitudes medias temporales medias verticales. Esta ecuación es equivalente a la (3) si se identifica  $C$  con  $T$  y  $\underline{K}$  con  $\underline{\chi} / \rho c_p$ . Por lo tanto, se concluye que resulta posible aplicar el sistema computacional MANCHAS para la simulación de problemas térmicos en cuerpos de agua.

El nombre MANCHAS alude a la representación de la descarga continua de un contaminante mediante descargas discretas sucesivas (pulsos) en intervalos regulares de tiempo, de modo que con cada descarga discreta se genera una mancha. Todas las manchas se siguen en su evolución para cada paso en el tiempo.

Se denomina mancha a una región contaminada con una extensión mucho menor que la escala de longitud hidrodinámica [4]. Se asume que la concentración media vertical dentro de una mancha tiene una distribución gaussiana y, en consecuencia, puede describirse por la expresión:

$$C(x, y, t) = \frac{Q \sqrt{D}}{\pi h_0} \exp \left\{ a_{11} (x - x_0)^2 + 2 a_{12} (x - x_0)(y - y_0) + a_{22} (y - y_0)^2 \right\} \quad (6)$$

donde  $Q$  es para el presente problema el calor asociado a la mancha ( $Q$  se mantiene constante si no hay fuentes o disipación de calor),  $x_0, y_0$  las coordenadas del centro de la mancha,  $h_0$  la profundidad correspondiente al centro de la mancha,  $a_j$  los parámetros de forma, y:

$$D = a_{11} a_{22} - a_{12}^2 \quad (7)$$

es siempre una cantidad positiva. Merece destacarse que, en el contexto térmico, las concentraciones corresponden a sobretemperaturas respecto a la del río en cada punto.

Los parámetros de forma definen la extensión y orientación de la mancha. La Ecuación 6 es la solución local de la ecuación diferencial para el caso de un pulso de contaminante (matemáticamente representado por una delta de Dirac). Los diferentes procesos se calculan mediante una técnica de desdoblamiento ("splitting"), de modo que se trabaja con ecuaciones diferenciales ordinarias para los parámetros de forma de cada proceso [4]. En cualquier instante, la pluma total puede obtenerse mediante la adición de las contribuciones de las manchas individuales. El paso de tiempo es calculado automáticamente por el programa en base al mínimo entre las escalas de tiempo relacionadas a los fenómenos involucrados.

En escurrimientos naturales para los que en general predominan los números de Péclet elevados, técnicas como las del sistema computacional MANCHAS evitan lidiar con el conocido problema de la generación de difusión numérica cuando no se adoptan pasos espaciales muy reducidos, a la vez que permiten resolver con adecuada precisión las capas límites térmicas, evitando oscilaciones indeseables.

## RESOLUCION DEL PROBLEMA

### Determinación del campo hidrodinámico

A priori, los desafíos de la modelación hidrodinámica en las aguas vecinas a la Central Costanera pasaban por los siguientes temas:

- Se disponía de datos de corrientes en el Río de la Plata sólo en aguas abiertas (a unos 3 km, aproximadamente, de la costa), mientras que las corrientes de interés para el cálculo eran las cercanas a la costa.
- Debía representarse lo más fehacientemente posible el campo cercano bidimensional, tanto en su fase actual como en la futura.
- El modelo implementado debía ser robusto frente a los mencionados cambios bruscos de profundidad.

Para resolver el primer tema se usaron modelos anidados. Así, se empleó inicialmente un modelo "regional" de 3 km de ancho por 4 km de largo, con centro en el Riachuelo, el cual alimentó a un modelo "local" de 2 km de ancho por 1.8 km de largo. Mientras en el modelo "regional" se empleó un paso de malla de 100 m, en el "local" se usó uno de 25 m. Este modelo "local" fue capaz de representar adecuadamente los chorros generados por las descargas, resolviendo el segundo problema planteado. El tercer punto se logró introduciendo difusión numérica en concordancia con las dársenas y el Canal Sur.

Se determinaron dos escenarios hidrodinámicos de estudio en base a una caracterización estadística del régimen mareológico, uno de ellos reflejando condiciones medias y el restante presentando niveles más importantes. En ambos casos se mantuvo la descarga del Riachuelo oscilando entre  $\pm 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En virtud del relativamente reducido tamaño de la zona modelada, la hidrodinámica se representó como una sucesión de estados estacionarios. Lo anterior puede justificarse a partir de la ecuación de balance de masa de la mezcla:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

Si en la Ecuación (8) se desprecia la velocidad  $v$ , se desarrolla la derivada parcial remanente, se tiene en cuenta que la amplitud de marea en el Río de la Plata es de 0.6 m con un semiperíodo de 6 horas (lo que arroja una tasa de 0.1 m/h) y se considera una pendiente de la superficie libre de  $7.5 \cdot 10^{-6}$  (que corresponde a un desnivel de 3 cm en 4 km), se puede calcular una variación de la velocidad  $u$ , en módulo, de  $6.2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s/m}$ . En los 4 km del recinto, el cambio de velocidad es del orden del mm/s y, en consecuencia, despreciable.

Cada estado estacionario se caracteriza con un par nivel/velocidad. Por ejemplo, la sucesión de estados representando un escenario de condiciones medias ("escenario 1") se muestra en la siguiente tabla [5]:

Estado	Nivel de agua (m MOP)	Velocidad (m/s)	Caudal Riachuelo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1	0.38	0.50	10.00
2	0.50	0.34	6.00
3	0.60	0.21	2.67
4	0.70	0.07	-0.67
5	0.80	-0.06	-4.00
6	0.98	-0.30	-10.00

En todos los casos, las velocidades contemplan no sólo la contribución de la onda de marea sino también la descarga de base proveniente de los ríos Paraná y Uruguay. El signo positivo de las velocidades indica bajante para el Río de la Plata y descarga hacia éste en el caso del Riachuelo.

En las Figuras 2 y 3 se muestran campos de velocidad para el recinto del modelo "local", correspondiendo a distintas situaciones de marea. Estas simulaciones mostraron que, en un esquema general de escasas velocidades en la desembocadura del Riachuelo, el efecto de "llamada" del fluido proveniente de las tomas ejerce una influencia significativa.

#### Determinación del campo térmico

A diferencia del cálculo de la hidrodinámica, la valoración de la transferencia de calor fue realizada en régimen impermanente, ya que el tiempo de viaje de cada mancha entre la descarga y la toma es del orden del periodo de mareas.

Entre los parámetros de ingreso al modelo deben especificarse los coeficientes de dispersión térmica longitudinal y transversal. Se emplearon valores habitualmente utilizados en el Río de la Plata, que corresponden a 0.23 para el coeficiente adimensional transversal y 20 para el longitudinal. No obstante, se comprobó una baja sensibilidad de los resultados a variaciones en éstos coeficientes, seguramente debida al carácter fuertemente advectivo de la transferencia de calor (con alto número de Péclet).

Uno de los temas de interés de la simulación consistió en la necesidad de representar no sólo la extracción de cantidad de movimiento y masa por las tomas, realizada en el cálculo hidrodinámico, sino también la quita de

calor del sistema. El esquema de resolución de MANCHAS permite efectuar tal extracción en forma directa del siguiente modo: cuando una mancha se acerca suficientemente a una toma, resulta eliminada del cálculo. La ventaja de esta forma de simular la quita de calor resulta evidente: como el calor que sale del sistema a través de las tomas es función del estado de la marea (pues de ello depende el acercamiento del agua calentada a las mismas), la eliminación de calor se produce en forma natural, siendo mayor durante las crecientes.

Los principales resultados del modelo vienen dados por las series temporales de la temperatura del agua en las tomas actuales y futuras para las condiciones de operación vigentes y las que tendrán lugar una vez puesta en funcionamiento la nueva unidad.

En la Figura 4 se presenta una visualización de la posición de los centros de las manchas en un instante determinado para la descarga de la posición 3, lo cual, dado el carácter advectivo del flujo, puede interpretarse como puntos pertenecientes a "filetes" (líneas que unen puntos que han pasado, pasan y pasarán por un punto), ya que todos han surgido de la descarga.

En la Figura 5 se muestra una pluma térmica (líneas de iso-sobretemperatura) en la cual se observa la influencia de las descargas en las tomas.

En la Figura 6 se muestran las series temporales de temperaturas en las tomas futura y actual para las condiciones finales de operación. Se observan aumentos de temperatura en concomitancia con las crecientes de la onda de marea, en las que se produce un "ingreso" de las corrientes en el Riachuelo.

#### **Análisis del mecanismo de realimentación**

Las series temporales de temperatura del agua fueron luego utilizadas para analizar el mecanismo de realimentación. El tratamiento desarrollado tiene en cuenta los tiempos de viaje de las partículas de fluido a través del río (obtenidos del modelo) y a través del sistema de refrigeración. Este último fue estimado a partir de la suposición de una velocidad media en el recorrido interior. De esta forma, el cálculo se organizó como sigue: para cada paso temporal, se consideró la temperatura de la partícula en la toma y con el tiempo de recorrido interior y la sobretemperatura de la central, se determinaron el tiempo y la temperatura en la descarga; adicionándole el tiempo de recorrido en el río y la dilución, se obtuvieron las condiciones en la toma. Estos pasos se repitieron para un período de marea. En la Figura 7 se muestran series temporales de temperaturas en las tomas futura y actual. De la figura surge que, dada la relación entre los tiempos de viaje y el período de mareas, la realimentación es muy débil.

### **CONCLUSIONES**

Se ha presentado una metodología para el análisis bidimensional integrado en la vertical del transporte de calor en un cuenco afectado por la marea. Se ejemplificó dicha metodología a través de su aplicación al estudio de las condiciones hidrotérmicas actuales y futuras en la Central Costanera.

La misma resultó eficiente para extraer conclusiones respecto a la posibilidad de un cortocircuito térmico, concluyéndose que dada la relación entre el tiempo de viaje de las partículas y el período de la onda de marea, tal efecto no ocurrirá.

### **REFERENCIAS**

- [1] Menéndez, A. N., "Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos", Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, Vol. 6, 1, 25-36, Catalunya, marzo de 1990.
- [2] Carreras, P. E., Menéndez, A. N., "Mathematical Simulation of Pollutant Dispersion", Journal of Ecological Modelling, 52: 29-40, 1990.
- [3] Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., "2-D Mathematical Modelling of Pollutants Transport in Coastal Zones", Proceedings of the International Conference on "Pollution Processes in Coastal Environments", pp. 36-41, Mar del Plata, Argentina, 2-6 diciembre de 1996.
- [4] Menéndez, A. N., "Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas", Informe LHA-INCYTH 066-01-86, Ezeiza, diciembre de 1986.
- [5] Menéndez, A. N., "Hydraulic Studies for the Water Intake of Central Costanera", Report LHA-INA 01-155a-97, Ezeiza, may 1997.

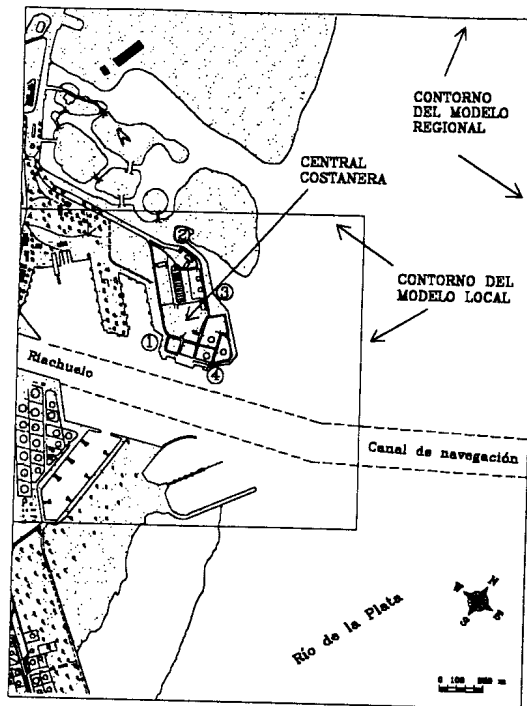


Figura 1 - Zona modelada. Recintos. Tomas y descargas.

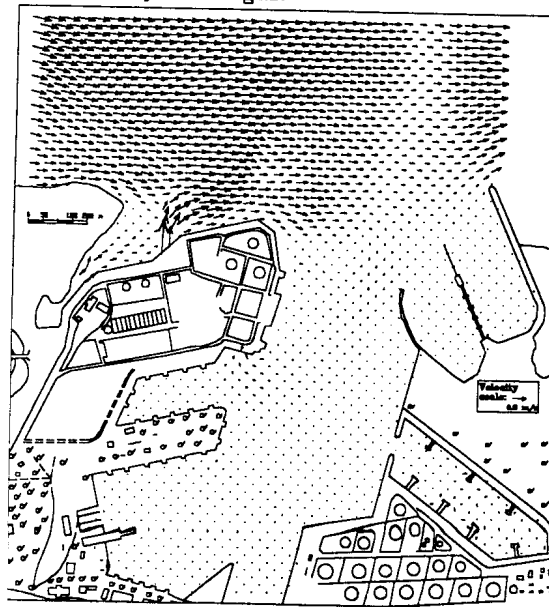


Figura 2 - Campo de velocidades para T=0 y T=12 hs. Escenario 1. Condiciones futuras

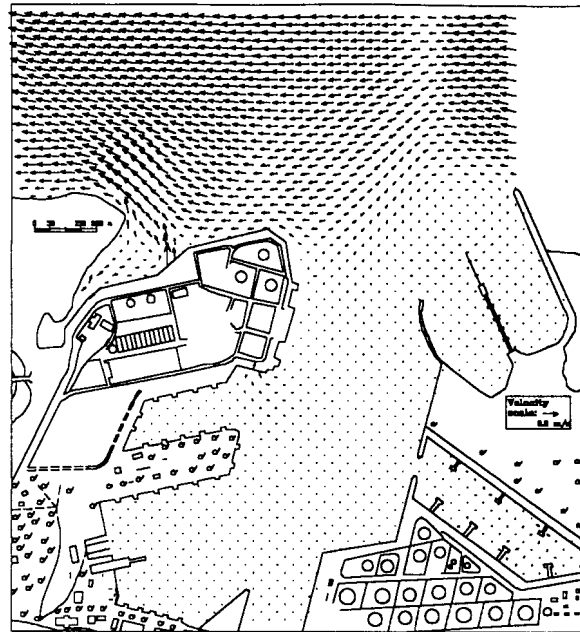


Figura 3 - Campo de velocidades para T=5 hs.  
Escenario 1. Condiciones futuras

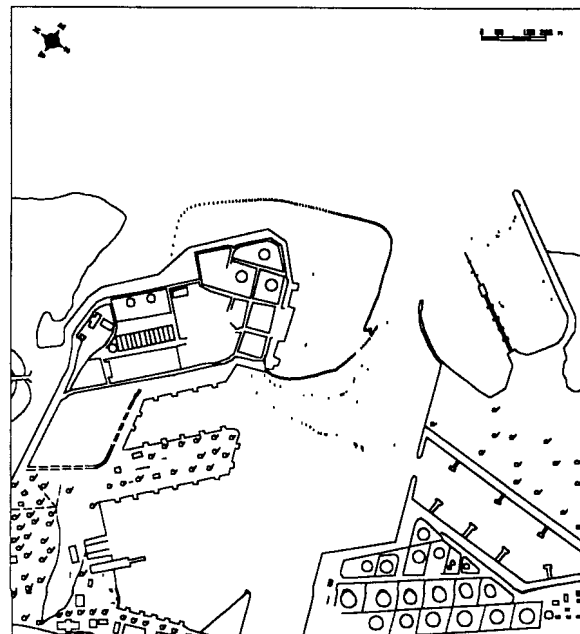


Figura 4 - Ubicación de partículas de agua emergentes de la descarga 3  
para T=2 hs. Escenario 1. Condiciones futuras



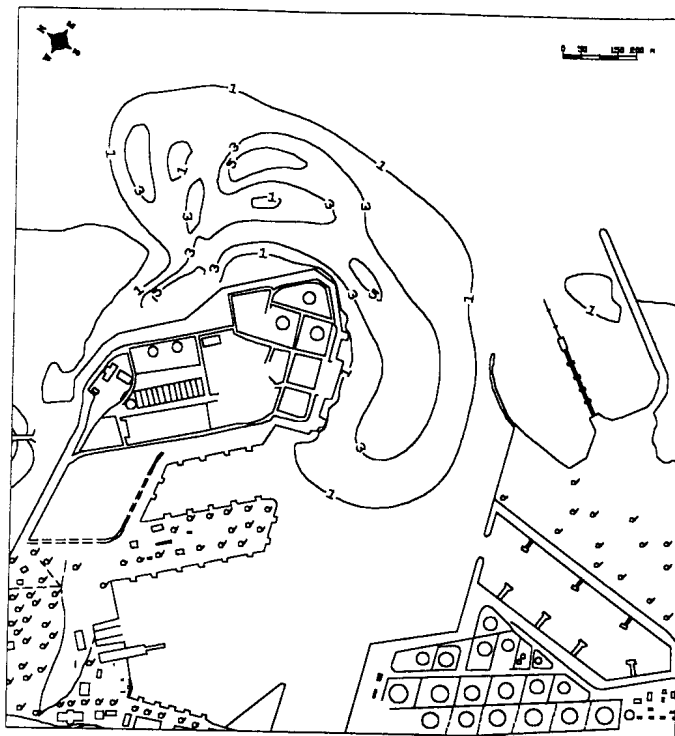
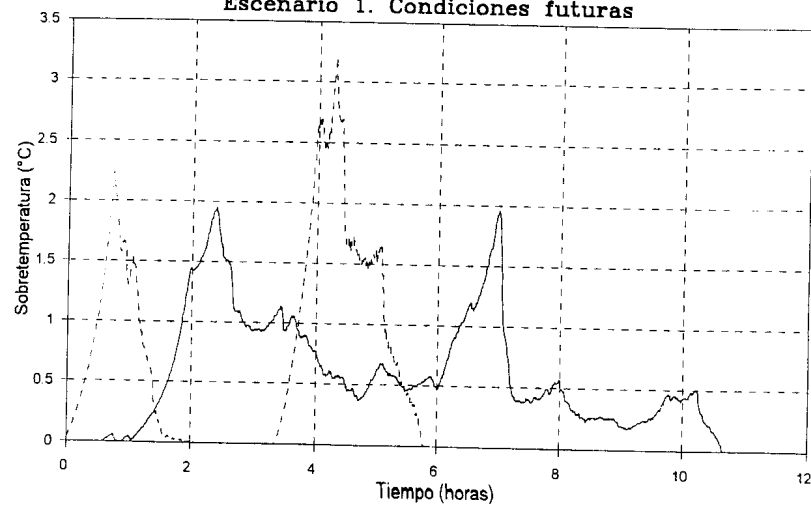


Figura 5 - Pluma termica para T=3 hs.  
Escenario 1. Condiciones futuras



--- Toma futura — Toma actual

Figura 6 - Sobrettemperatura en las tomas sin realim.. Esc. 1. Cond. futuras

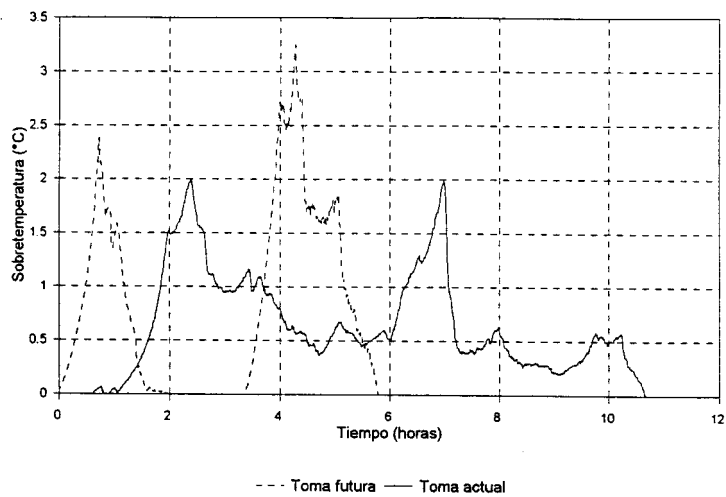


Figura 7 - Sobretemperatura en las tomas con realim.. Esc. 1. Cond. futuras