

Ficha 3.4.

MÓDULO CORJET

V. 1.1

Este documento se ha obtenido como resultado del proyecto de I+D+i: **MEDVSA**.
“Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de las plantas desaladoras”
045/RN08/03.3.

La Guía Metodológica desarrollada en MEDVSA incluye los documentos:

- *GUÍA METODOLÓGICA*
- *Anexo 1. Fichas descriptivas de los modelos comerciales*
- *Anexo 2. Modelos de simulación brIHne.*
- *Anexo 3. Formulación basada en los resultados experimentales*
- *Anexo 4. Caracterización de clima marino*
- *Anexo 5. Reglas básicas para la implementación de modelos CFDs en la simulación de campo cercano*
- *Anexo 6. Reglas básicas para la implementación de modelos hidrodinámicos en la simulación de campo lejano*
- *Anexo 7. Medidas preventivas y Programa de Vigilancia Ambiental*

El presente documento es parte del **Anexo 1: Fichas descriptivas de los modelos comerciales**

Autores:

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL (IH CANTABRIA)

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS (CEDEX)

Módulo CORJET (The Cornell Buoyant Jet Integral Model) de CORMIX

VERTIDO SUMERGIDO MEDIANTE CHORROS INDIVIDUALES O MÚLTIPLES DE EFLUENTES DE FLOTABILIDAD NEGATIVA (SALMUERA)

1. INTRODUCCIÓN. AUTORES. DESARROLLO.

El modelo CORJET: *Cornell Buoyant Jet Integral Model* [1], [2] está incluido entre los módulos del CORMIX, para la simulación de chorros sumergidos, individuales o múltiples, de flotabilidad nula, positiva, y negativa, en un medio receptor ilimitado, homogéneo o estratificado, en un medio receptor en reposo o con presencia de corrientes.

El módulo CORJET es aplicado por CORMIX 1 y CORMIX2 cuando detectan que no existe impacto con los contornos laterales y la superficie y es posible asumir medio receptor ilimitado. CORMIX permite también la aplicación directa de CORJET por parte del usuario para la simulación de un vertido sumergido mediante chorro individual o múltiples, siempre que no exista interacción del flujo con los contornos.

Los autores del programa (3) estiman un error potencial (desviación típica) de los resultados obtenidos respecto a mediciones reales "in situ", de +/-50% [3].

La Ficha incluye, enfocadas a efluentes de flotabilidad negativa: una descripción de la base teórica de CORJET, sus hipótesis simplificadoras, los componentes y opciones disponibles del modelo y posibilidades y limitaciones del modelo. Se realiza un análisis de sensibilidad a los datos de entrada, una revisión de los datos de calibración y validación presentados por los autores del modelo, así como una nueva validación con estudios experimentales recientes. Como conclusión a todo lo anterior, se proponen una serie de recomendaciones a los usuarios, respecto al modelado y uso y manejo del programa. Entre los anexos, se incluye un ejemplo de aplicación real a un vertido de salmuera y una tabla de valores realistas y recomendados para los datos de entrada al programa.

Una síntesis del presente análisis del modelo CORJET y de su validación con datos experimentales, puede encontrarse en Palomar et al. (2012), [4] y [5].

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO. BASE TEÓRICA.

CORJET es un modelo euleriano tridimensional estacionario, que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes (en su versión RANS) integradas en la sección transversal del chorro, obteniendo el valor de las variables en el eje. La integración transforma el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, resoluble métodos numéricos. La integración implica asumir un medio receptor es ilimitado. La caracterización tridimensional del chorro se consigue asumiendo autosemejanza entre secciones y una distribución tipo Gauss de las variables en la sección transversal.

CORJET utiliza fórmulas semiempíricas para la difusión turbulenta como modelo de cierre, mediante un coeficiente de incorporación de agua al chorro ("entrainment"). Para simular el efecto sobre el chorro de las corrientes en el medio receptor, introduce un término de arrastre en las ecuaciones de *cantidad de movimiento*, considerando los efectos de desviación o curvatura del chorro. Así mismo considera el efecto de la velocidad del medio receptor sobre la velocidad del chorro.

En los párrafos siguientes se describe las principales variables y formulaciones relacionadas con la base teórica del modelo.

2.1. Variables axiales de CORJET

La Figura 1 muestra un esquema del chorro individual simulado por CORJET:

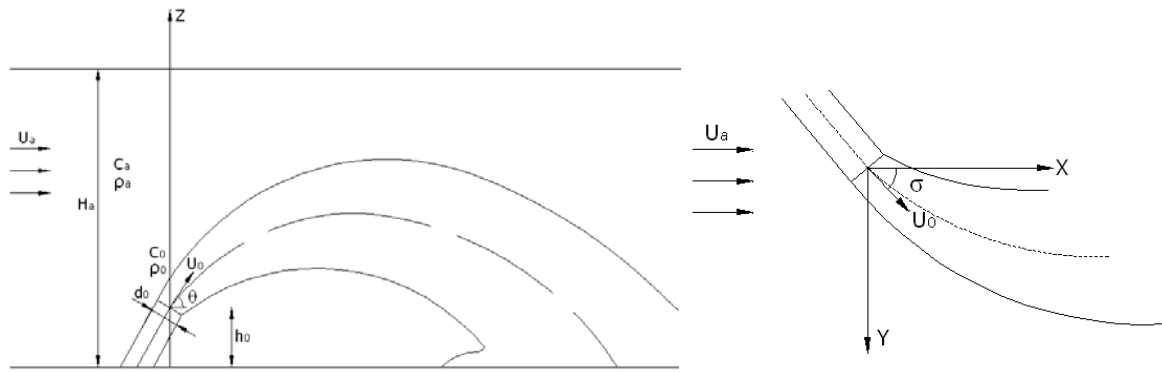


Figura 1: esquema en perfil y `planta de chorro individual simulado por CORJET

Glosario de variables en el subsistema CORMIX 2:

- H_A : profundidad media, calado en la columna de agua.
- U_A : velocidad de la corriente en el medio receptor. Se considera siempre paralela a la costa.
- ρ_A : densidad del medio receptor. Es posible definirla también mediante la temperatura y la salinidad.
- h_o : altura de la boquilla con respecto al fondo
- U_o : velocidad inicial del chorro en la descarga
- D : diámetro de la boquilla.
- b : medida del semiancho del chorro, definido como la distancia radial desde el eje, donde la concentración es igual al 50% de la concentración en el eje, y la velocidad es igual al 37% de la velocidad en el eje.
- ρ_o : densidad del efluente vertido. Se puede definir partir de la temperatura y de la concentración salina.
- C_o : concentración inicial del efluente con respecto a la concentración en el medio receptor. En nuestro caso: concentración salina del efluente menos salinidad del medio receptor.
- θ : ángulo de inclinación del chorro en el vertido.
- σ : ángulo horizontal entre el chorro y la corriente en el medio receptor.
- $g_o' = g \frac{\Delta\rho_o}{\rho_a}$: Gravedad reducida; g =valor de la gravedad (9.81m/s²).
- r : distancia radial desde el eje del chorro.
- S : trayectoria del chorro.
- C : subíndice referido al valor de las magnitudes en el eje del chorro: $U_c, C_c, \rho_c, \theta_c$, etc.

2.2. Variables integrales o Flujos de CORJET.

Las ecuaciones de gobierno se expresan a través de variables integrales o flujos, por ser magnitudes más conservativas. Para una distribución de tipo Gauss, los flujos se expresan mediante:

- Flujo de volumen: $Q = \pi b^2 (U_c + 2U_A \cos \theta \cos \sigma)$
- Flujo de cantidad de movimiento: $M = \pi \frac{b^2}{2} (U_c + 2U_A \cos \theta \cos \sigma)^2$

- Flujo de flotabilidad: $J = \pi b^2 (U_c \frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} + \lambda^2 U_A \cos \theta \cos \sigma) g'_c$
- Flujo de masa del trazador: $Q_c = \pi b^2 (U_c \frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} + \lambda^2 U_A \cos \theta \cos \sigma) C_c$

Siendo λ el ratio de dispersión del ancho de distribución de las magnitudes escalares con respecto a las vectoriales en la sección transversal del chorro (inverso del N° adimensional de Schmidt).

2.3. Fuerzas que actúan sobre cada porción de chorro.

CORJET considera tres tipos de fuerzas actuando sobre cada porción del chorro sumergido.

- Fuerza de intrusión en la dirección X: debido a la cantidad de movimiento transmitida en la descarga y a la diferencia de velocidades entre el efluente y el medio receptor.
- Fuerza de flotabilidad en la dirección Z: debido a la diferencia de densidad entre el efluente y el medio receptor
- Fuerza de arrastre o rozamiento: perpendicular al chorro, debido a la presencia de corrientes en el medio receptor.

2.4. Ecuaciones de Gobierno.

Las ecuaciones de Navier Stokes integradas en la sección transversal y expresadas mediante las variables flujo derivan en las expresiones:

► E. de Continuidad: $\frac{dQ}{ds} = E$

► E. Conservación C. Movimiento (X): $\frac{d(M \cos \theta \cos \sigma)}{ds} = EU_A + F_D \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}$

► E. Conservación C. Movimiento (Y): $\frac{d(M \cos \theta \text{sen} \sigma)}{ds} = -F_D \frac{\cos^2 \theta \text{sen} \sigma \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}}$

► E. Conservación C. Movimiento (Z): $\frac{d(M \text{sen} \theta)}{ds} = \pi \lambda^2 b^2 g'_o - F_D \frac{\cos \theta \text{sen} \theta \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}}$

► E. Conservación del flujo de flotabilidad: $\frac{dJ}{ds} = Q \frac{g}{\rho_{ref}} \frac{d\rho_A}{dz} \text{sen} \theta$

► E. Conservación de la masa de trazador: $\frac{dQ_c}{ds} = 0$

► E. Trayectoria del chorro: $\frac{dx}{ds} = \cos \theta \cos \sigma$, $\frac{dy}{ds} = \cos \theta \text{sen} \sigma$, $\frac{dz}{ds} = \text{sen} \theta$

Se trata de un sistema de nueve ecuaciones diferenciales ordinarias con nueve incógnitas $(Q, M, J, Q_c, \theta, \sigma, x, y, z)$, que CORJET resuelve numéricamente por el método de Runge Kutta.

2.5 Ecuaciones de Cierre.

Para resolver el sistema se requieren expresiones para los términos de cierre de los términos turbulentos de "entrainment" y para la fuerza de arrastre: "Fd".

La incorporación de agua del medio receptor al chorro ("entrainment") responde a la siguiente ecuación que incluye una componente transversal (de incorporación de agua al chorro por diferencia de velocidad entre el chorro y la corriente transversal) y un término acimutal:

$$E = 2\pi b U_c \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2 \sin \theta}{F_l^2} + \frac{\alpha_3 U_A \cos \theta \cos \sigma}{U_o + U_A} \right) + 2\pi b \alpha_4 U_A |\cos \theta \cos \sigma| \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}$$

La Figura 2 muestra un esquema gráfico de las componentes transversal y acimutal de incorporación de agua del medio receptor al chorro:

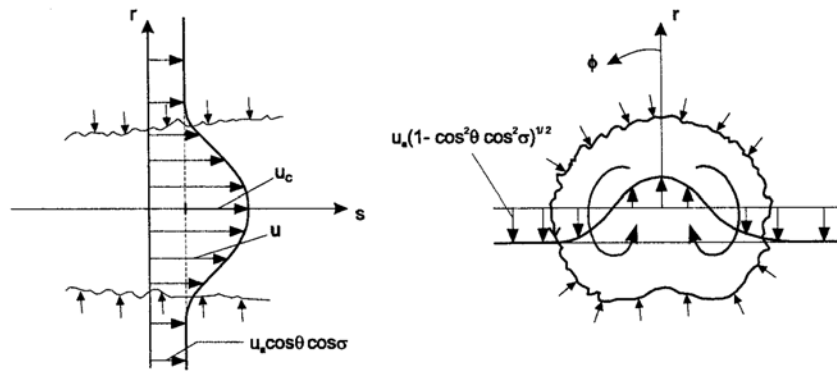


Figura 2: Términos que definen el "entrainment" en el modelo CORJET. Izquierda: término transversal. Derecha: término acimutal.

La fuerza de arrastre sobre el chorro por presencia de una corriente ambiental se expresa por:

$$F_d = C_D \sqrt{2} b u_a^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma)$$

Donde C_D es el coeficiente de fricción, que CORJET considera: $C_D = 1.3$

Para las llamadas constantes universales, CORJET adopta los siguientes valores, deducidos a partir de experimentos en chorros:

$$\alpha_1 = 0.055; \alpha_2 = 0.6; \alpha_3 = 0.055; \alpha_4 = 0.5.$$

2.6. Distribución de las magnitudes en la sección transversal del chorro.

CORJET asume, acorde con lo obtenido experimentalmente, una distribución de tipo Gauss para las variables escalares y transversales en la sección transversal, que cumplen con las expresiones:

$$U = U_c e^{-r^2/b^2} + U_A \cos \sigma \cos \theta;$$

$$g' = g'_c e^{-r^2/\lambda b^2}$$

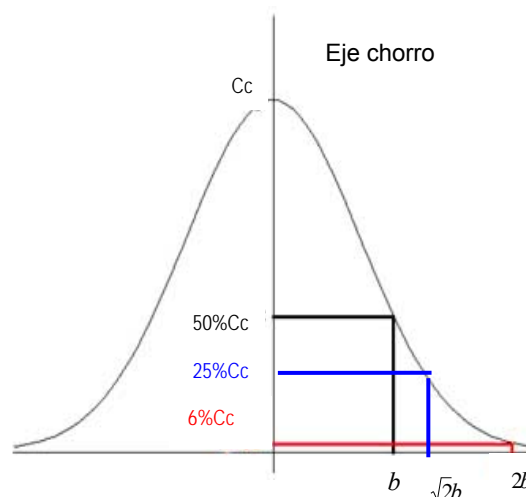
$$C = C_c e^{-r^2/\lambda b^2}$$

En la gráfica de la derecha se explica el significado del radio del chorro y las distintas expresiones de su valor:

$r = b$, distancia radial donde la concentración es el 50% y la velocidad un 37% de la del eje del chorro.

$r = \sqrt{2}b$, distancia radial donde la concentración es el 25% y la velocidad un 14% de la del eje del chorro

$r = 2b$, c distancia radial donde la concentración es el 6% y la velocidad un 2% de la del eje del chorro.



2.7. Zona de desarrollo de los perfiles autosemejantes (ZDPA).

El modelo CORJET considera la denominada zona de desarrollo de los perfiles autosemejantes o zona de establecimiento del flujo (ZOFE). Se trata de la zona inmediatamente a continuación de la boquilla donde se produce la transición entre una distribución uniforme de variables en la sección transversal (en la boquilla) a una distribución de tipo Gauss (característica de flujo completamente desarrollado en chorros). A partir de la ZOFE se asumen las hipótesis y se resuelven las ecuaciones expuestas anteriormente.

Para calcular la longitud de la ZDPA, CORJET aplica la siguiente expresión experimental:

$$L_e = 5.0D \left(1 - 3.22 \frac{\text{sen} \gamma_o}{R} \right) \left(1 - e^{\frac{-2F_o}{F_p}} \right)$$

Siendo el ángulo transversal de la descarga con respecto a la dirección de la corriente en el medio receptor: $\gamma_o = \text{asen}(\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma})$ y $R = \frac{U_o}{U_A}$

3. HIPÓTESIS SIMPLIFICATIVAS.

En la simulación de vertidos mediante chorro de efluentes de flotabilidad negativa, CORJET asume las siguientes hipótesis:

- **Medio receptor ilimitado**, lo que implica que la presión alrededor del chorro sea la misma que en el medio receptor (hipótesis que no se cumple en caso de una fuerte curvatura o expansión del chorro).. No es posible simular interacción del flujo con los contornos.
- Autosemejanza entre secciones a lo largo de toda la trayectoria del chorro.
- Distribución de tipo Gauss de las variables en la sección transversal.
- El modelo CORJET es estrictamente válido únicamente en la simulación de los cinco regímenes asintóticos autosemejantes (chorro, pluma y estela puros, bocanadas y térmicas advectivas). Para el resto de casos intermedios, como es el caso de vertido de chorro de flotabilidad negativa, CORJET constituye una aproximación.
- Las fórmulas que establecen la transición entre estos cinco regímenes asintóticos, por ejemplo: la variación de los coeficientes experimentales, es arbitraria. Las funciones de transición se obtienen en base a soluciones prácticas de ajuste con modelos experimentales en estados de transición, intermedios, de estos cinco estados puros. Si se mantienen el resto de condiciones, esta limitación no afecta al rigor de los resultados.

Por otra parte, las fórmulas de "entrainment" utilizadas son las obtenidas del caso de chorro con flotabilidad pero sin inclinación. Para considerar la inclinación del chorro en la incorporación de agua, se han multiplicado el término de pluma pura por el parámetro $\text{sen} \theta$, lo que constituye una aproximación. Los modelos de "entrainment" (para chorro 3D y pluma 2D), sin embargo no han sido ni calibrados ni validados para el caso de chorros inclinados hiperdensos.

4. COMPONENTES Y OPCIONES DEL MODELO.

La tabla 1 indica los datos de entrada y resultados del módulo CORJET, indicándose entre paréntesis el nombre de la variable aparece en la interfaz, que gráficamente aparecen en la figura 1:

DATOS DE ENTRADA DEL MODELO CORJET de CORMIX	
Parámetros de descarga (DISCHARGE)	Número de boquillas (<i>Number of openings</i>) Diámetro de la boquilla (<i>port diameter</i>) Altura de la boquilla con respecto al fondo (<i>Height above origin</i>) Velocidad de salida del chorro (<i>Exit velocity</i>). Angulo de inclinación de salida (<i>Vertical angle</i>); Angulo horizontal entre el chorro y la corriente en el medio receptor (<i>Horizontal angle</i>); Concentración inicial (<i>Concentration</i>). Coeficiente de decaimiento del contaminante (<i>Coeff. Decay</i>). Temperatura del efluente (<i>Discharge temperatura</i>). Concentración salina del efluente (<i>Discharge salinity</i>) Densidad del efluente (<i>Discharge density</i>) Longitud del tramo difusor (<i>Diffuser length</i>) Angulo entre el tramo difusor y la corriente en el medio receptor (<i>Aligment angle</i>) Cota máxima de simulación (<i>Max.Vertical Distance</i>); Cota mínima de simulación (<i>Min. Vertical Distance</i>); Longitud máx. de simulación (<i>Max.Dis.along trayect</i>) Intervalos de representación (<i>Print intervals</i>)
Condiciones ambientales, en el medio receptor (AMBIENT)	Discretización vertical Nº niveles (<i>Levels</i>) Para cada nivel: Calado del nivel (<i>Elevation</i>) Densidad del medio receptor en el nivel (<i>Density</i>) o Temperatura/salinidad (<i>temperature/salinity</i>)
	Condiciones hidrodinámicas Para cada nivel: Velocidad de la corriente en nivel (<i>velocity</i>) Dirección de la corriente respecto al eje x (<i>Angle of velocity</i>)
RESULTADOS DEL MODELO CORJET de CORMIX	
Datos de salida (OUTPUT)	Informe con los datos del caso simulado (<i>Session Report</i>) Resultados numéricos de la simulación (<i>Prediction file</i>). Clasificación y descripción de la clase de flujo (<i>Flow class description</i>) Recomendaciones para el diseño (<i>Design Recommendations</i>) Pasos intermedios, flujos, reglas de calculo, etc. (<i>Ambietn Rulebase Browser, etc.</i>) Valores en el eje del chorro: coordenadas del punto (x,y,z), valores en el eje: dilución mínima, concentración máxima respecto al vertido, velocidad, aceleración, nº Froude densimétrico. Valor de b: distancia radial desde el eje del chorro donde la velocidad es 1/e=37% de la velocidad en el eje del chorro.

Tabla 1: Datos de entrada de alimentación del modelo CORJET, y resultados.

CORJET utiliza el sistema cartesiano, con origen en la boquilla para las coordenadas horizontales (x,y) y el fondo, para la coordenada vertical (z).

La tabla 2 muestra el rango de valores admisible por CORJET para los datos de entrada. Si el valor introducido por el usuario se encuentra fuera de este rango, el programa avisa y no se ejecuta:

Velocidad de corriente	0 – 10m/s	Densidad del efluente	800 – 1200Kg/m ³
Densidad del medio receptor	800 – 1200Kg/m ³	Ángulo horizontal entre los chorros y la corriente: σ	-90° – 360°
Temperatura del medio receptor	-2 – 100°C	Angulo de inclinación del chorro	-90° - 90°
Diámetro de boquilla	0 -3m	Longitud del difusor	0.01 -1000m

Altura de la boquilla respecto al fondo	0 -40m	Ángulo horizontal entre el tramo difusor y la corriente: γ	0 – 180°
Velocidad de salida del chorro	0 -11m/s	Número de boquillas	3 -300

Tabla 2. Rango de valores de variables admisible por CORJET

La tabla 3 señala las principales posibilidades y limitaciones del modelo CORJET; entendidas posibilidades como opciones o ventajas del programa, y limitaciones como restricciones, carencias o desventajas, para la simulación de vertidos de efluentes de flotabilidad negativa. A éstas se les suma las indicadas en la ficha general de software CORMIX:

POSIBILIDADES DEL MODELO CORJET de CORMIX (aplicación SALMUERA)
<ul style="list-style-type: none"> - Simula el comportamiento de un vertido mediante chorro individual y mediante chorros múltiples. - Distintas posibilidades de diseño del dispositivo de vertido: diámetro, altura de la boquilla con respecto al fondo, inclinación en la descarga, número y separación entre elevadores, configuración del tramo difusor, etc. - Posibilidad de discretizar la columna de agua en niveles, con distintos valores para las variables ambientales (densidad, dirección e intensidad de la corriente, etc.). - Resultados detallados del comportamiento del chorro. Evolución del valor de las magnitudes a lo largo del eje, que responde a resolución numérica de las ecuaciones de gobierno. - El modelo se interrumpe cuando detecta el impacto del eje del chorro con la superficie.
LIMITACIONES DEL MODELO CORJET de CORMIX (aplicación SALMUERA)
<ul style="list-style-type: none"> - La simulación con CORJET está limitada a la región de campo cercano, previamente al impacto del chorro con el fondo, hecho que invalida la hipótesis de medio receptor ilimitado. Así pues no es posible simular con CORJET la capa de esparcimiento lateral (spreading layer) ni la corriente de gravedad en campo lejano. - A pesar de lo anterior, al estar inicialmente diseñado para el vertido de efluentes de flotabilidad positiva, CORJET sólo se interrumpe cuando detecta el impacto del eje del chorro con la superficie, pero no el impacto de la envolvente superior. En este sentido, es el usuario el que debe calcular la posición de la envolvente superior, identificar si hay impacto y desechar resultados. - Limitaciones respecto al dispositivo de vertido. CORJET solamente simula un tramo difusor recto, con elevadores de una boquilla, chorros unilaterales al mismo lado del difusor, vertiendo en la misma dirección y con ángulo horizontal perpendicular al tramo difusor. Las boquillas han de situarse equiespaciadas y todas con el mismo diámetro, inclinación y altura con respecto al fondo. - No simula efecto COANDA, saltos hidráulicos internos, inestabilidades y fenómenos de recirculación. - Trabaja con valores constantes. Estado estacionario. No permite introducir regímenes temporales de variables. - El programa no interpola datos, por lo que deben introducirse valores en todas las capas en que se haya discretizado la columna de agua. El número de niveles de discretización no puede ser superior a 10.

Tabla 3: Posibilidades y limitaciones en la simulación de vertidos de efluentes hiperdensos con el modelo CORJET.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO FRENTE A VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS DE ENTRADA.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo CORJET para conocer la influencia de la variación de los datos de entrada en los resultados del subsistema. La horquilla de valores de los datos de entrada del análisis de sensibilidad corresponde al rango de valores realistas de un vertido de salmuera de osmosis inversa en el Mar Mediterráneo (ver Anexo 2).

Se considera un vertido mediante chorro individual sumergido. Se estudia la sensibilidad en los resultados (geometría y dilución) frente a variaciones de los siguientes parámetros: inclinación del chorro, densidad del efluente y del medio receptor, estratificación en la columna de agua, velocidad y dirección de la corriente, calado en el medio receptor y altura de la boquilla con respecto al fondo.

En el Anexo 3 de esta ficha, se muestran los resultados numéricos obtenidos del análisis de sensibilidad. En todos los casos se considera que la dirección de la corriente coincide con la del eje x.

La Tabla 4 resume las principales conclusiones del análisis de sensibilidad de CORJET:

VARIABLE	SENSIBILIDAD	COMENTARIOS RESPECTO A LOS RESULTADOS DE CORJET
Ángulo inclinación chorro	Muy alta	A mayor ángulo, mayor cota alcanzada por el chorro y en general la dilución. Alcance máximo del chorro para $\theta = 45^\circ$. Diluciones máximas para ángulos entre 45° y 60° en el punto de máxima altura y de impacto con el fondo. El modelo no se ejecuta para ángulos superiores a 75° .
Densidad efluente y del Medio receptor	Pequeña	A mayor diferencia de densidad entre el efluente y el medio receptor, ligeramente menor es la altura máxima y el alcance del chorro en el punto de impacto, así como menor es la dilución.
Estratificación y Temperatura	Pequeña	Si el medio es homogéneo (típica situación de invierno/otoño en el Mediterráneo a las profundidades de vertido) la influencia de la temperatura es pequeña. La presencia de la pycnoclina en la columna de agua, tanto si existe o no afectación del chorro con la pycnoclina, tiene una influencia muy pequeña en la geometría y dilución del efluente, dentro del rango de valores realistas de densidad en la columna de agua en el Mar Mediterráneo.
Velocidad de la corriente en el medio receptor U_A	Muy alta	A mayor valor de corriente en el medio receptor, mayor es la dilución del efluente. Para corrientes de la misma dirección y sentido que el chorro ($\sigma = 0^\circ$), a mayor intensidad, menor es la altura máxima del chorro y mayor el alcance. Para corrientes perpendiculares al chorro ($\sigma = 90^\circ$), el chorro es desviado en la dirección de la corriente. A mayor intensidad, menor altura máxima y alcance del chorro (Y), pero mayor alcance en dirección de la corriente (X) y mayor dilución. Para corrientes en la misma dirección y sentido opuesto ($\sigma = 180^\circ$), el chorro retrocede arrastrado por la corriente, produciéndose un fenómeno de reintrusión. Superada una cierta velocidad en el medio receptor, la dilución ya no experimenta incremento con la velocidad de la corriente, incluso puede disminuir.
Angulo horizontal entre la corriente y chorro σ	Pequeña	Comparando, para intensidades de corriente iguales, el efecto de la dirección de la corriente para los ángulos horizontales con el chorro de $\sigma = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$, se concluye que, mientras que la trayectoria del chorro es muy diferente, la dilución conseguida, sin embargo, es similar en los tres casos.
Calado en el medio receptor (H_A)	Variable	En caso de no existir interacción del chorro con la superficie, la altura de la columna de agua NO influye en su comportamiento. En caso de existir interacción, CORJET interrumpe su ejecución, dado que queda invalidada la hipótesis de medio receptor ilimitado.

Altura boquilla sobre el fondo h_o	Muy pequeña	A mayor altura de la boquilla, ligeramente mayor es también la altura máxima alcanzada por el chorro, siendo similares el alcance y la dilución. Para alturas de las boquillas sobre el fondo superiores a 1.5m, la influencia es mayor.
---	-------------	--

Tabla 4: Síntesis del análisis de sensibilidad de CORJET frente a variaciones de los parámetros de entrada dentro del rango de valores realistas de diseños de vertido en el Mar Mediterráneo.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO, PRESENTADA POR LOS AUTORES, PARA EFLUENTES DE FLOTABILIDAD NEGATIVA.

El módulo CORJET ha sido validado con una importante cantidad de datos experimentales, sin embargo, la mayoría para el caso de vertidos de efluentes de flotabilidad positiva. El valor de los coeficientes universales: α_i deriva de ajuste con este tipo de estudios experimentales, demostrando un ajuste muy alto en la representación de los cinco regímenes asintóticos de flujos autosemejantes (chorro puro, pluma pura, térmicas advectivas, etc.). El modelo ha sido también validado para estados intermedios en medio en reposo y movimiento, homogéneos y estratificados, pero casi siempre para vertidos de flotabilidad positiva. Respecto a efluentes de flotabilidad negativa, los estudios de validación presentados por los autores, que son resumidos a continuación, son mucho más escasos:

6.1.) Validación de CORJET: Vertidos mediante chorro individual, en un medio receptor en reposo y de densidad uniforme.

En el gráfico de la Figura 4 se comparan los datos experimentales publicados en [6] obtenidos por varios autores: Roberts et al, 1987 [7], 1997 [8], Cipollina et al, 2005 [9] y Zhang et al, 1998 [10] con los resultados numéricos de CORJET. La validación se refiere únicamente a la geometría del chorro, sin incluir diluciones, **para distintas inclinaciones del vertido**.

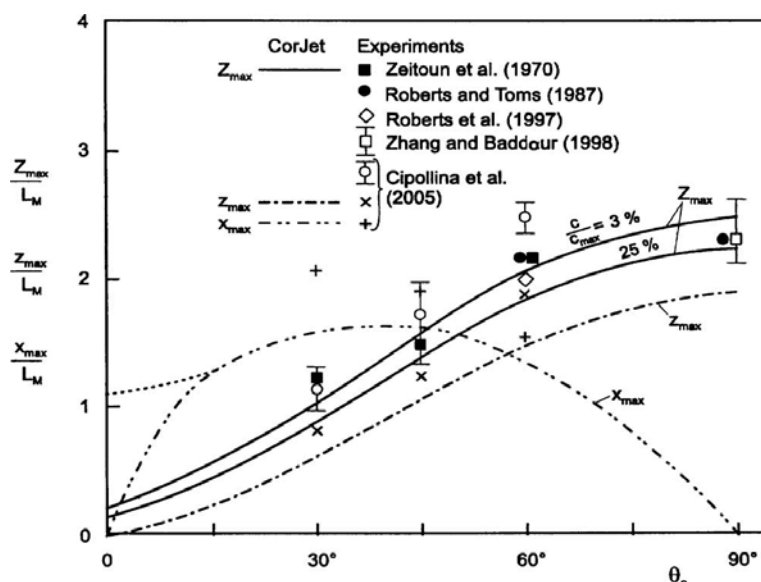


Figura 4: Propiedades geométricas de un chorro en su punto de máxima altura. Z_{max} es la altura del borde del chorro, z_{max} la altura del eje del chorro, x_{max} la longitud del chorro. Se comparan distintos ángulos de inclinación del chorro. Fuente: [6].

En el caso de máxima altura alcanzada por el chorro: Z_{max} , los datos experimentales muestran un relativo buen ajuste con la predicción de CORJET, siendo más pobre el ajuste para una inclinación de $\theta = 60^\circ$. CORJET estima alturas del chorro menores a las obtenidas experimentalmente.

Respecto a la distancia a la que se alcanza la altura máxima: X_{max} , sólo se cuenta con dos puntos de validación, correspondientes a una inclinación de chorro de $\theta = 30^\circ$. El ajuste es muy deficiente.

El gráfico de la Figura 5 muestra los valores de la altura máxima del chorro obtenidos Zhang et al [10] para un **ángulo de inclinación $\theta = 90^\circ$ y valores del número de Froude densimétrico (F_o) entre 5 y 30**. En general, el ajuste con los resultados del CORJET es bueno hasta valores del número de Froude densimétrico superiores a 25. Para números de Froude superiores, CORJET no simula correctamente.

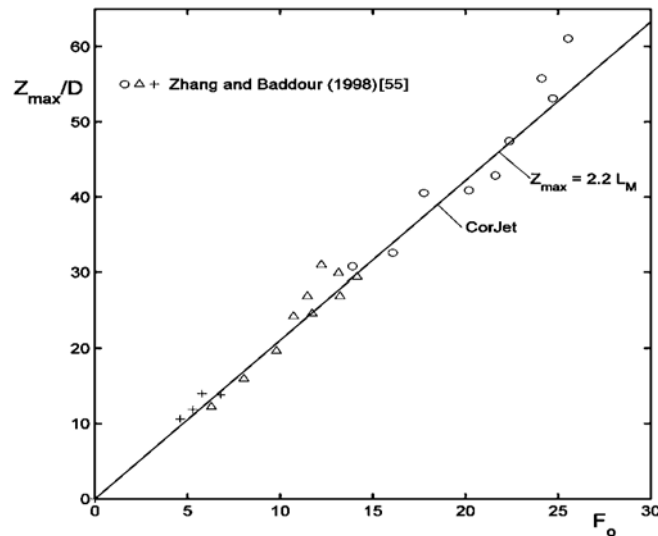
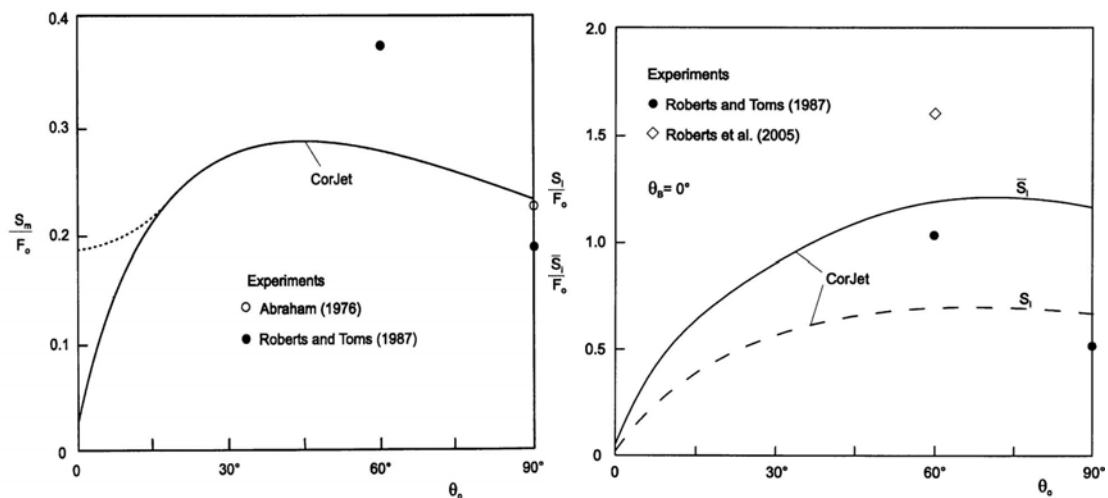


Figura 5: Comparación de las predicciones del modelo con datos experimentales de Zhang et al [9] para un chorro vertical. Análisis de la altura máxima en función del número de Froude. Fuente [1]

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados de la validación de la dilución en el punto de máxima altura (S_m) y en el de impacto del chorro con el fondo (S_i) comparando los valores numéricos de CORJET con los resultados experimentales de Roberts et al. [7], [8] y Abraham et al, 1987 [11], **para distintos ángulos de inclinación del chorro**.



Figuras 6 y 7: Estudio de la dilución mínima en función del ángulo de inclinación del chorro: (izquierda) Dilución en el punto de máxima altura; (derecha) Dilución en el punto de impacto con el fondo. Fuente: [6]

Como puede observarse, los datos de validación presentados son muy escasos. Según los autores el ajuste es correcto para chorros verticales $\theta = 90^\circ$. Como se observa el ajuste es muy deficiente para una inclinación de $\theta = 60^\circ$, siendo la dilución prevista por CORJET bastante inferior a la obtenida experimentalmente. Respecto a la dilución en el punto de impacto del chorro con el fondo, CORJET infravalora significativamente la dilución respecto a los resultados experimentales de Roberts et al. [7], [8], para las inclinaciones frecuentes de diseño: $\theta = 60^\circ$.

6.2.) Validación de CORJET: Vertidos mediante chorro individual, en un medio receptor en movimiento y de densidad uniforme.

Las figura 8 muestra la validación de la geometría para el caso de un vertido en chorro de N° de Froude densimétrico: $F_o=11$ y ángulo de inclinación $\theta = 60^\circ$, en presencia de una corriente con las misma dirección y sentido que el chorro, y un ratio entre la velocidad de salida del chorro y la de la corriente de $R=5.5$. Los datos experimentales corresponden a Anderson et al, 1979 [12].

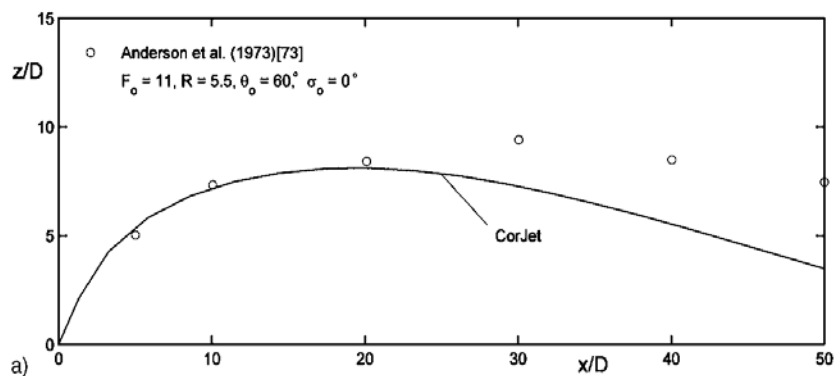


Figura 8: Chorro de flotabilidad negativa de la misma dirección y sentido que la corriente en el medio receptor. Análisis de la trayectoria del vertido. Inclinación de vertido de 60° . Fuente: [1].

Según los autores, se observa un ajuste aceptable de la trayectoria, con un mayor error en puntos alejados de la fuente.

La figura 9 muestra los resultados de validación de la trayectoria de chorro, para distintos números de Froude densimétricos y ratios entre la velocidad de salida del chorro y la velocidad de la corriente en el medio receptor, para un chorro vertical en presencia de una corriente. Se utilizan los datos experimentales de Chu at al, 1975 [13].

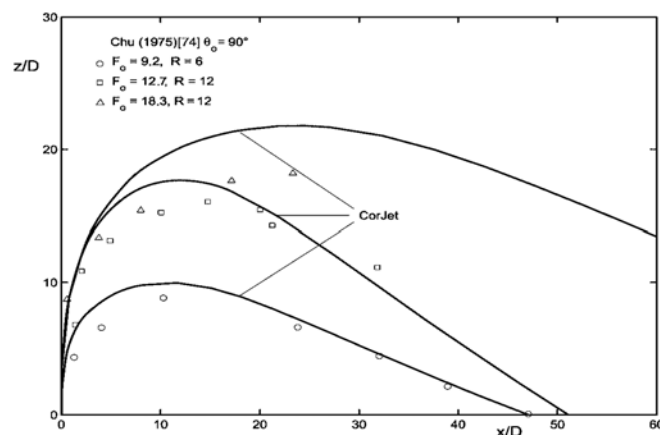


Figura 9: Chorro de flotabilidad negativa perpendicular a la corriente en el medio receptor. Análisis de la trayectoria del vertido. Inclinación de vertido de 90° . Fuente:[1].

Se observa un mejor ajuste ($\theta = 90^\circ$) para números de Froude pequeños ($F_d=9.2$) y ratios pequeños. El ajuste de la trayectoria muy pobre en los casos de $F_d=18.3$ y valores mayores.

La figura 10 presenta la validación de los resultados de dilución en el eje y del ancho del chorro ($b\sqrt{2}$), para distintos puntos de la trayectoria (s/D), comparando CORJET con los resultados experimentales de Anderson et al, 1973 [12]. Las características del efluente son las de la Figura 8.

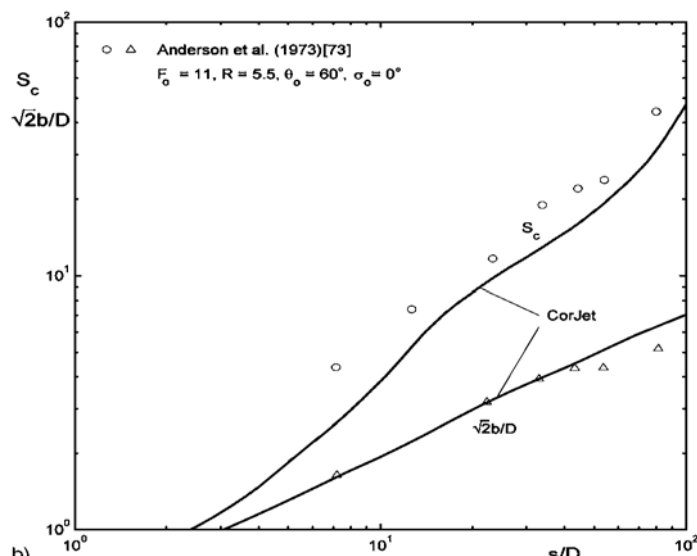


Figura 10: Comparación de la predicción del modelo CorJet y los datos experimentales de Anderson et al [12] para un vertido de $\theta=60^\circ$ en medio receptor con corriente perpendicular al vertido. Dilución en el eje y la anchura del chorro $2b^{1/2}$ en función de la distancia al punto de vertido (s/D). Fuente: (1)

Según los autores, la gráfica 10 muestra un buen ajuste de la dilución en el eje y el ancho del chorro para $\theta = 60^\circ$

Estas validaciones pueden descargarse desde <http://www.mixzon.com/benchmark/#>.

De los anteriores estudios de validación presentados por los autores, se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- Los datos de validación presentados para efluentes de flotabilidad negativa son muy escasos, especialmente para el caso de medio receptor en reposo.
- La mayor parte de la validación se centra en la geometría y trayectoria, sin apenas datos de dilución y ninguno de velocidad del chorro o de distribución de las variables en la sección transversal.
- El ajuste es en general pobre.

Con el fin de remediar en parte este vacío y de valorar la fiabilidad de las simulaciones de CORJET y el error estimado de sus resultados en la simulación de vertidos de chorros hiperdensos, se ha realizado en el marco del proyecto MEDVSA, estudios adicionales de validación, cuyas principales conclusiones se exponen en la sección 7 de esta Ficha.

7. VALIDACION DEL MODELO CON DATOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS EN MODELO FÍSICO.

El estudio de validación que se presenta a continuación, se ha publicado en [5].

Para validar el modelo CORJET se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva en relación con datos experimentales de vertidos de chorros hiperdensos, como los de salmuera. Se han seleccionado aquellos artículos con un mayor número de ensayos y que utilizan técnicas experimentales más avanzadas. Definiendo valores realistas como datos de entrada, se han comparado, para un medio receptor en reposo y en movimiento, los resultados numéricos obtenidos con CORJET con las fórmulas de análisis dimensional calibradas por diversos autores a partir de datos obtenidos experimentalmente.

7.1. MEDIO RECEPTOR EN REPOSO.

Los estudios experimentales seleccionados para la validación son los indicados en la tabla 5. Todos ellos corresponden a un medio receptor en reposo y homogéneo, sin interacción del flujo con los contornos.

AUTOR	ANGULOS	NÚMEROS DE FROUDE	MEDIDAS Y TÉCNICA DE MEDICIÓN
Roberts et al. (1997) [8]	60°	19 - 36	Trayectoria y dilución Técnicas ópticas: LIF y medidas de conductividad
Cipollina et al. (2005) [14]	30°, 45°, 60°	16 - 216	Trayectoria y dilución
Kikkert et al (2007) [15]	30°, 45°, 60°	14 - 99	Trayectoria y dilución Técnicas ópticas: LIF y LA
Shao et al. (2010) [16]	30°, 45°	8 - 32	Trayectoria, dilución y velocidades Técnicas ópticas: LIF y PIV
Papakonstantis et al. (2011), [17], [18]	45°, 60°	7.5 - 58.3	Trayectoria y dilución

Tabla 5: Estudios experimentales seleccionados para la validación del subsistema CORJET.

Para la validación se han considerado los datos de entrada mostrados en la Tabla 6, correspondientes a valores realistas para un vertido de salmuera al Mar Mediterráneo, para los cuales se ha ejecutado el modelo CORJET y comparado con las fórmulas de análisis dimensional calibradas por los autores expuestos en la Tabla 5.

DATOS DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN DE CORJET (medio receptor en reposo y homogéneo)											
C_A	C_o	T	ρ_o	ρ_A	g'_o	D	H_A	h_o	F_{rd}	U_o	Q (caudal)
psu	psu	°C	kg/m ³	Kg/m ³	m/s ²	M	m	m		m/s	m ³ /s
37.5	68	21	1050.2	1026.4	0.2228	0.2	15	0	10	2.11	0.0663
									20	4.22	0.1326
									30	6.33	0.1989
									40	8.44	0.2652

Tabla 6. Datos de entrada para la validación de CORJET

Las Figuras 11 – 14 muestran las gráficas de validación de los resultados numéricos de CORJET, para magnitudes características del chorro.

7.1.1. VALIDACION DE TRAYECTORIAS.

Punto de máxima altura del chorro

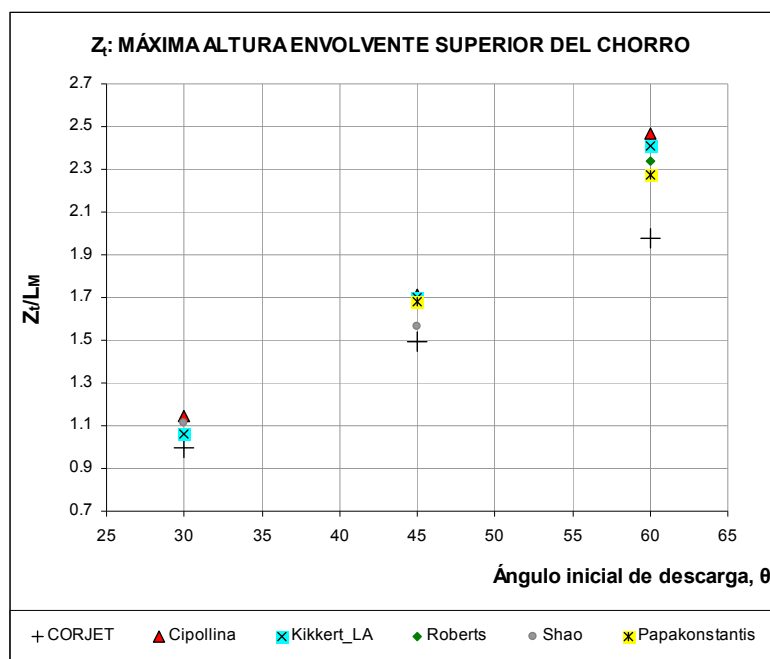


Figura 11. Validación de la máxima altura de la envolvente superior del chorro

Punto de máximo alcance, impacto del eje del chorro con el fondo

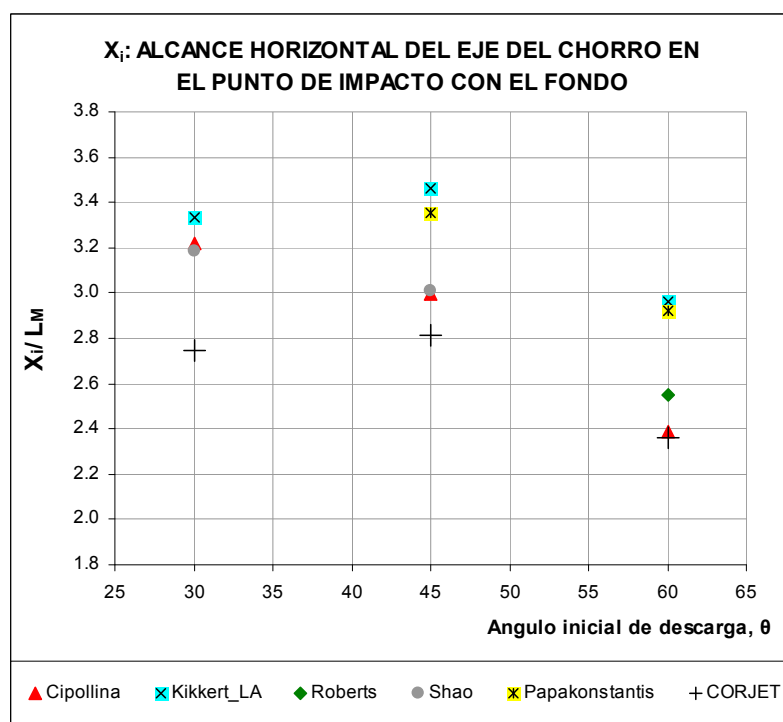


Figura 12. Validación del alcance horizontal del eje del chorro en el punto de impacto con el fondo

Trayectoria del eje y máxima altura de la envolvente superior

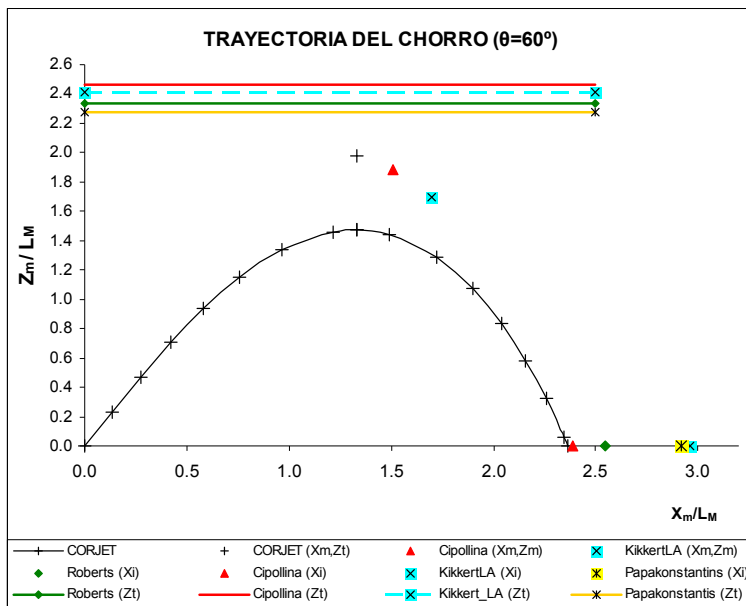


Figura 13.1. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 60°

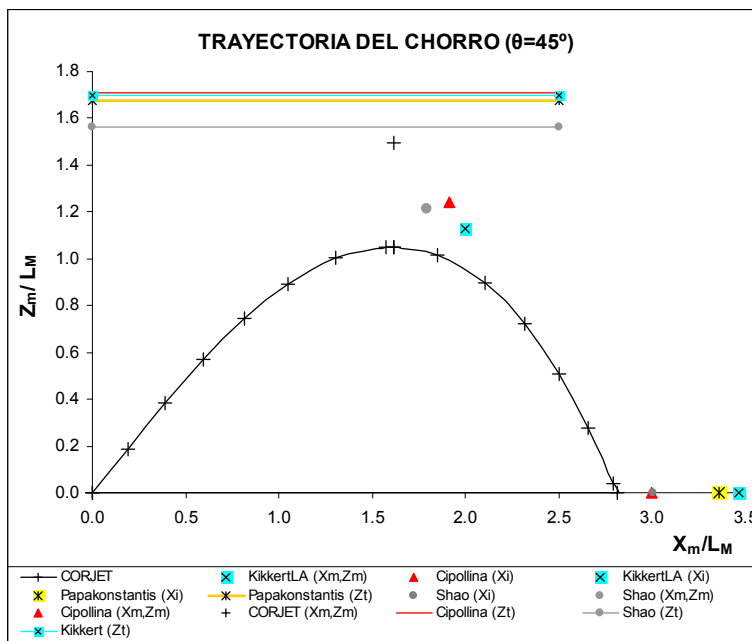


Figura 13.2. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 45°

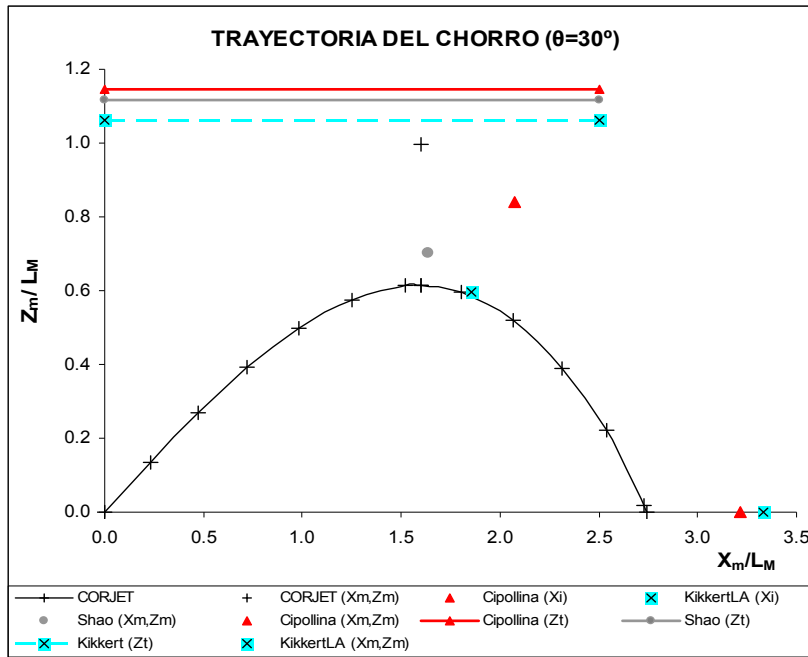


Figura 13.3. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 30°

7.1.2. VALIDACIÓN DE DILUCIONES.

Dilución mínima (eje) en punto de impacto del eje con el fondo

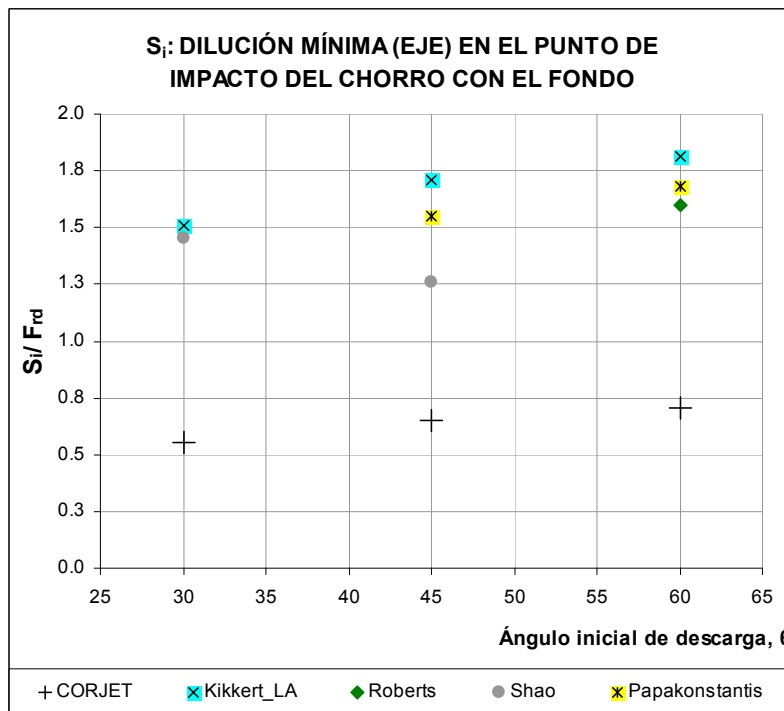


Figura 14. Validación de la dilución de un chorro en el punto de impacto con el fondo

La observación de los gráficos anteriores deriva en las siguientes conclusiones:

- Respecto a la altura máxima de la envolvente superior: si se aplica la fórmula recomendada por los autores para el cálculo del radio ($R = \sqrt{2}B$) y se suma al eje del chorro, se observa que el valor de altura máxima de la envolvente superior queda significativamente infravalorado respecto a los valores obtenidos experimentalmente, de modo que podrían darse errores de considerar que no existe impacto con la superficie cuando realmente sí existe. El error es más notable para ángulos de inclinación del chorro mayores y para mayores valores del número de Froude densimétrico.

- CORJET en general infravalora también, pero menos significativamente, el alcance del eje del chorro en el punto de impacto del chorro con el fondo. En este caso, los resultados experimentales son más dispersos. El error en este caso parece incrementarse a menor ángulo de descarga, contrariamente a la estimación de la máxima altura alcanzada por la envolvente superior del chorro. En cualquier caso, el ajuste de CORJET es mucho mejor para esta magnitud.

- En los gráficos de trayectoria, se observa claramente una infravaloración de las dimensiones del chorro en la predicción de CORJET, siendo más acusada para la estimación de la altura máxima que del alcance máximo.

- CORJET infravalora significativamente la dilución en el punto de impacto del chorro con el fondo, para todos los ángulos de descarga.

Estimando la desviación de los resultados numéricos del modelo CORJET con respecto a los resultados experimentales considerados, se obtienen los valores presentados en la Tabla 8:

↓: infraestimación-estimación del modelo; ↑: sobre-estimación del modelo				
	Variable	Chorro inclinado $\theta = 30^\circ$	Chorro inclinado $\theta = 45^\circ$	Chorro inclinado $\theta = 60^\circ$
		Corjet	Corjet	Corjet
MEDIO RECEPTOR EN REPOSO	Z_i	~10%↓	~10%↓	~15%↓
	S_i	~60%↓	~60%↓	~60%↓
	X_i	~15%↓	~10%↓	~15%↓

Tabla 8. Desviaciones de los resultados numéricos de CORJET con respecto a datos experimentales, para un chorro denso sumergido vertido en un medio receptor en reposo.

Siendo:

Z_i : altura máxima de la envolvente superior del chorro.

S_i : dilución mínima (en el eje) en el punto de impacto del chorro con el fondo.

X_i : alcance (horizontal) del chorro (eje) en el punto de impacto con el fondo.

7.2. MEDIO RECEPTOR EN MOVIMIENTO.

De modo análogo al caso de un medio receptor en reposo, se ha validado el modelo CORJET también para un medio receptor en movimiento (presencia de corrientes). En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica en relación con ensayos experimentales y calibración de fórmulas semi-empíricas de vertidos de chorros densos en un medio receptor en presencia de corrientes, seleccionando aquellos de mayor rigor científico y con mayor número de ensayos. Se han definido datos de entrada correspondientes a condiciones realistas de vertido de salmuera desde una planta desalinizadora (de osmosis inversa) al Mar Mediterráneo. Para estos datos de entrada se ha ejecutado el modelo CORJET, comparando los resultados numéricos obtenidos con las fórmulas de análisis dimensional obtenidas a partir de los datos experimentales publicados.

Para una explicación más detallada y los gráficos de validación correspondientes a la validación de CORJET en un medio receptor dinámico se puede consultar en Palomar et al. (2012) [5]. Las principales conclusiones de la validación se sintetizan en la Tabla 9:

(↓: infraestimación-estimación del modelo; ↑: sobre-estimación del modelo)				
MEDIO RECEPTOR DINÁMICO Chorro inclinado 60°	Variable	Chorro de la misma dirección y sentido que la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 180^\circ$	Chorro de sentido opuesto a la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 0^\circ$	Chorro perpendicular a la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 90^\circ$
		Corjet	Corjet	Corjet
	Z_t	~25%↓	~10%↑ a ~5%↓	~30%↓
	S_i	~15%↓ a ~5%↑	~5%↓ a ~65%↑	~25%↓ a ~25%↑

Tabla 9. Desviaciones de los resultados numéricos de CORJET con respecto a datos experimentales, para un chorro denso sumergido vertido en un medio receptor dinámico.

De la Tabla 9 se puede deducir que CORJET infraestima en aproximadamente un 25% las dimensiones del chorro para chorros perpendiculares y de la misma dirección y sentido que la corriente. Para chorros de sentido opuesto, el ajuste es en principio mejor.

El modelo infravalora la dilución en el punto de impacto para chorros de la misma dirección que la corriente, mientras que puede llegar a sobrevalorar la dilución en más de un 65%, en chorro de sentido opuesto a la corriente (especialmente para valores grandes de $U_r F_{rd}$, siendo U_r la razón entre la velocidad en el medio receptor y la velocidad de salida del chorro y F_{rd} : el número de Froude densimétrico a la salida). Para chorros perpendiculares a la corriente, el modelo infraestima la dilución para valores pequeños de $U_r F_{rd}$, mientras que la sobreestima para valores altos.

8. RECOMENDACIONES DE APLICACIÓN Y MANEJO DEL MODELO.

Analizado el subsistema CORJET en su aplicación a vertidos de salmuera, se establecen las recomendaciones expuestas en las tablas 10 y 11. A estas recomendaciones se les suman las expuestas en la ficha general del sistema CORMIX:

RECOMENDACIONES RESPECTO AL MODELADO
<p>En un diseño que exista duda de impacto o no del chorro con la superficie, se recomienda simular el caso con ambos: CORMIX1 (o CORMIX2) y CORJET, y comparar resultados, a fin de asegurar la coherencia.</p>
<p>Considerando los resultados obtenidos en el análisis de validación del modelo, se recomienda:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dado que calculando el radio del chorro mediante $R = \sqrt{2B}$, al altura máxima de la envolvente superior del chorro queda significativamente infravalorada respecto a los datos experimentales, se recomienda estimar el radio mediante la fórmula: $R = 2B$, que corresponde a la distancia radial con una concentración de contaminante igual al 6% la concentración en el eje. - La dilución en el punto de impacto del chorro con el fondo es así mismo infravalorada de un modo muy significativo respecto a los datos experimentales (con valores de aproximadamente el doble). Por tanto, considerar los valores de dilución obtenidos con el módulo CORJET es una solución conservativa respecto a criterios ambientales. - No existen datos de validación para el caso de un medio receptor dinámico, ni para la hipótesis de vertido mediante ranura equivalente, aplicada en los casos de interacción entre chorros contiguos.
<p>Considerando los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del modelo se recomienda:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los parámetros a los que los resultados de CORJET presenta una mayor sensibilidad (en el rango de valores realistas) son: ángulo de inclinación del chorro, velocidad de la descarga e intensidad de las corrientes en el medio receptor. - Los valores de dilución obtenidos con CORJET son prácticamente insensibles a la dirección del chorro respecto a la corriente ambiental (al contrario de lo obtenido experimentalmente). Ante la alta sensibilidad a la intensidad de la corriente, la insensibilidad a la dirección de la corriente y la falta de validación, se recomienda evitar el modelado con CORJET de un vertido en medio receptor dinámico, especialmente para el caso de una corriente de la misma dirección y opuesta del chorro, ya que CORJET no puede simular fenómenos de recirculación.

Tabla 10: Recomendaciones respecto al modelado de vertidos de salmuera mediante chorro individual con CORJET

RECOMENDACIONES RESPECTO AL USO Y MANEJO DEL PROGRAMA
<p>El modelo CORJET sólo detiene su ejecución cuando el eje del chorro impacta con la superficie, pero no se detiene si la envolvente superior impacta. Se recomienda, por tanto, que el usuario calcule siempre la altura máxima de la envolvente superior del chorro sumando al punto máximo del eje, el radio ($R = 2B$), desechando los resultados del modelo si se produce impacto (ya que invalida la hipótesis de partida).</p> <p>La opción de "Max vertical distance", para limitar la altura máxima, se refiere al eje del chorro.</p>
<p>Se recomienda introducir como valor de "Min vertical distance", el valor de la altura de la boquilla respecto al fondo, dado que por debajo de esta altura el chorro ya no se mezcla con agua "limpia"</p>
<p>Para obtener valores medios de diluciones (correspondientes a distribución uniforme) a partir de los valores de dilución en el eje ("Sc") calculados por CORJET (que considera una distribución de tipo Gauss en la sección transversal), se multiplican estos por "1.7". $S_{media} = S_{eje} * 1.7$</p>
<p>Para calcular las envolventes superior e inferior del chorro a partir de las coordenadas (x, z) del eje y del valor del semiancho que ofrece el programa ("B"), se aplican las fórmulas:</p> <p>Envolvente superior (plano x-z): $Z_{sup} = Z_{eje} + R * \cos \theta$ · $X_{sup} = X_{eje} - R * \sen \theta$</p> <p>Envolvente inferior (plano x-z): $Z_{inf} = Z_{eje} - R * \cos \theta$ · $X_{sup} = X_{eje} + R * \sen \theta$</p>

Tabla 11: Recomendaciones respecto al uso y manejo del modelo CORJET para el modelado de vertidos de salmuera mediante chorro individual.

9. ACCESO AL MODELO Y A LA INFORMACIÓN, PRECIO, INSTALACIÓN, MANEJO, TIEMPO DE COMPUTACIÓN, ENTRADA DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Acceso al modelo y a la información: Documentos y trámite de solicitud de licencia en la página web: www.cormix.com.

- Idioma: La información disponible (manuales, artículos, etc.), así como la interfaz del modelo con el usuario está disponible únicamente en lengua inglesa.

- Precio: El precio de la licencia varía según el modelo se adquiera temporal o definitivamente. El módulo CORJET se incluye en la versión más básica (v6.0 G), de herramientas generales de CORMIX, cuya licencia tiene los precios (Mayo 2010):

ALQUILER DEL MODELO (\$)					COMPRA DEL MODELO
	V6.0G: Herramientas generales, que incluyen al CORJET				V6.0G: Herramientas generales, que incluyen al CORJET
	1 mes	3 meses	6 meses	1 año	
Uso académico	-	-	-	-	-
Uso comercial	1.099	1.599	1.899	2.599	8.999

Tabla 12: Precios de la Licencia de herramientas generales, para el uso de CORJET

El resto de características son idénticas a las descritas en la ficha general de CORMIX. .

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA.

- [1] Jirka, G. H. (2004). "Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: The single round jet." Environmental Fluid Mechanics, volume 4, pp. 1–56.
- [2] Jirka, G. H. (2006). "Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part II: Plane jet dynamics resulting from multipoint diffuser jets". Environmental Fluid Mechanics, volume. 6, pp. 43–100.
- [3] Doneker, R.L; Jirka, G.H. (2001). "CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal". Desalination. volume 139, pp. 263–274.
- [4] P. Palomar; J.L. Lara; I.J. Losada; M. Rodrigo; A. Alvarez (2012). "Near Field brine discharge modeling. Part 1: Analysis of commercial tools". Desalination, vol. 290, pp. 14-27.
- [5] P. Palomar; J.L. Lara; I.J. Losada (2012). "Near field brine discharge modelling Part 2: Validation of commercial tools". Desalination, vol. 290, pp. 28-42.
- [6] Jirka, G.H. (2008) "Improved Discharge Configurations for Brine Effluents from Desalination Plants", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 134, No. 1, pp. 116-129.
- [7] Roberts, P.J.W; Toms, G. (1987). "Inclined dense jets in a flowing current". Journal of Hydraulic Engineering, vol 113, nº 3.
- [8] Roberts, P.J.W; Fellow; Ferrier, A; Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jets". Journal of Hydraulic Engineering, vol 123, No 8.
- [9] Cipollina, A; Bonfiglio, A; Micale, G; Brucato, A. (2004). "Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers". DESALINATION 167 (459-468), ELSEVIER.
- [10] Zhang; H; Baddour, R.E. (1998). "Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude Number". Journal of Hydraulic Engineering (Mayo 1998)
- [11] Abraham, G. (1967). "Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid." Journal of Hydraulic Research, volume 54, pp. 235–248.
- [12] Anderson, J.L., Parker, F.L. and Benedict, B.A. (1973). "Negatively Buoyant Jets in a Cross-Flow". Environmental Protection Technology Series, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington.
- [13] Chu, V.H. (1975). "Turbulent dense plumes in a laminar crossflow", Journal of Hydraulic Research, vol.13, pp.263–279. 75. Nezu, I. and Nakagawa, H.: 1993.
- [14] Cipollina, A; Brucato, A; Grisafi, F; Nicosia, S. (2005). "Bench-Scale Investigation of Inlined Dense Jets". Journal of Hydraulic Engineering, vol 131, n 11, pp. 1017-1022.
- [15] Kikkert, G.A; Davidson, M.J; Nokes, R.I (2007). "Inclined Negatively Buoyant Discharges". Journal of Hydraulic engineering, vol 133, pp.545 – 554
- [16] D. Shao, Lao Wing-Keung Lao. "Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets". Environmental Fluid Mechanics, SpringerLink, 2010, vol. 10, no5, pp. 521-553.
- [17] I.G. Papakonstantis, G.C. Christodoulou, P.N. Papanicolau. "Inclined negatively buoyant jets 1: Geometrical characteristics. Journal of Hydraulics Research, Taylor and Francis Group, 2001, vol 49, No.1, pp. 13-22.

- [18] I.G. Papakonstantis, G.C. Christodoulou, P.N. Papanicolau. "Inclined negatively buoyant jets 2: Concentration measurements. Journal of Hydraulics Research, Taylor and Francis Group, 2011, vol 49, No.1, pp. 3-12.

Otros artículos e información de interés:

- ,G.H. Jirka. **(1999)** "*Five Asymptotic Regimes of a Round Buoyant Jet in Stratified Crossflow*", 28th IAHR Biennial Congress, Graz (Austria).
- G.H. Jirka and H.L.M Fong. **(1981)** "*Vortex Dynamics and Bifurcation of Buoyant Jets in Crossflow*", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.107, pp. 479-499, 1981.
- Jirka, D.C; Gerhard H., Robert L. Doneker, Steven W. Hinton (1996). "*MANUAL FOR CORMIX: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*". U.S.EPA, Office os Science and Technology, Washington.
- Doneker, R.L.; Jirka, G.H. **(2007)**. "*CORMIX USER MANUAL: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*".

ANEXOS

ANEXO 1.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO CORJET A UN VERTIDO DE SALMUERA AL MAR MEDITERRANEO. PASOS E INTERFAZ DEL PROGRAMA.

CASO DE APLICACIÓN:

Se desea modelar el comportamiento de un vertido de salmuera procedente de una nueva planta desalinizadora proyectada en la costa Mediterránea. Se opta por una configuración de descarga mediante chorro individual sumergido y salmuera procedente de un proceso de osmosis inversa de tasa de conversión del 45%. Los valores de datos de entrada responden a un caso dentro del rango realista de valores de diseño y de valores de las condiciones en el medio receptor.

METODOLOGIA PARA EL MODELADO DEL VERTIDO MEDIANTE CORJET de CORMIX

1. Recopilar los valores de los datos de entrada al modelo, que incluyen.

- Condiciones en el medio receptor, correspondientes a distintos escenarios, estacionales, en el Mar Mediterráneo, y teniendo en cuenta el clima local.

CONDICIONES AMBIENTALE EN EL MEDIO RECEPTOR. (entre paréntesis el nombre con que se definen en CORJET)					
Profundidad de vertido, m. (Depth)		15	Medio receptor (Bounded/Unbounded)		Mar (ilimitado)
Velocidad de corriente en medio receptor, m/s. (Ambient velocity)	Superficie	0.1	Densidad del M.Receptor, kg/m ³ (Ambient salinity)	Superficie	1025
	7m	0.1		7m	1025.5
	En el fondo	0		Fondo	1027

NOTA: En CORJET La densidad puede introducirse directamente o ser calculada por el programa a partir de los datos de temperatura y salinidad indicados por el usuario. Consideramos que el eje "x" coincide con la dirección y sentido de la corriente en el medio receptor.

- Características del efluente y parámetros de descarga de la salmuera: ver "Recomendaciones de diseño del vertido de salmuera".

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL VERTIDO DE SALMUERA (entre paréntesis el nombre con que se definen en CORJET)			
Diámetro de boquilla, m. (Port diameter)	0.2	Velocidad de salida del chorro, m/s. (Effluent velocity)	5
Altura de la boquilla respecto al fondo, m. (Port height)	1	Densidad del efluente, kg/m ³ (Effluent density)	1052
Angulo inclinación del chorro en la descarga, (vertical angle: THETA)	60°	Temperatura del efluente, °C. (Effluent temp) (*)	15/24
Angulo horizontal entre el chorro y la corriente (Horiz angle: SIGMA)	0°	Concentración, exceso de concentración salina respecto M Receptor, psu, (Concentration)	30.5

NOTA1: Se supone desalinización por Osmosis inversa con tasa de conversión, R= 45%.

$$Q_{salmuera} = Q_o = \frac{Q_{produccion}}{1-R}; C_{salmuera} = C_o = \frac{C_A}{1-R}; C = \text{concentración salina}; C_A = \text{salinidad del agua alimentación};$$

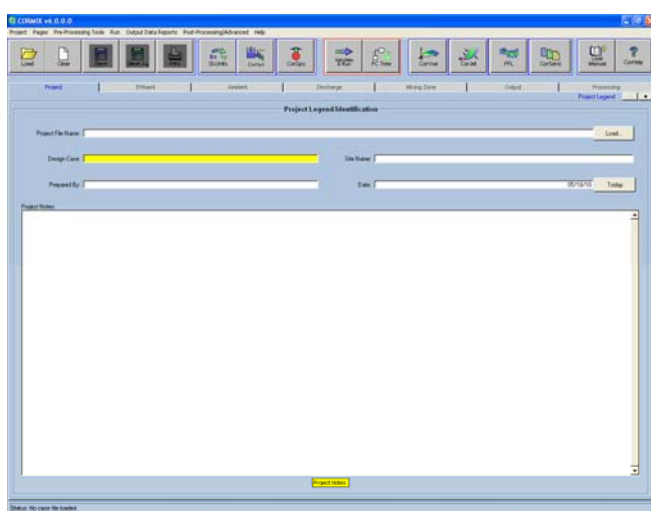
En el Anexo 2 de esta Ficha Descriptiva se ha incluido una tabla de valores realistas y recomendados para los datos de entrada de CORMIX2 (ver Sección 4: "opciones del modelo"), en el modelado de un vertido de salmuera en el Mar Mediterráneo

Estos datos, junto a algunos parámetros adicionales de modelado, serán los datos de entrada al modelo CORJET de CORMIX (indicados en detalle en la sección 4 de esta ficha: *Opciones del modelo*).

2. INTERFAZ DEL MODELO CORJET.

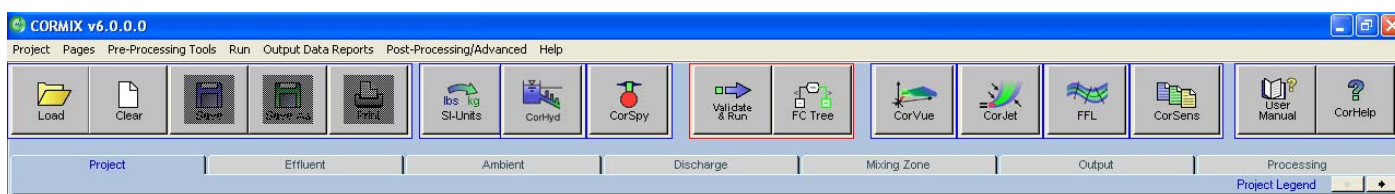
Las imágenes que se muestran en las páginas siguientes corresponden a la versión más actual (v.6) del sistema CORMIX

Se inicia en primer lugar el programa con doble click en el icono de CORMIX. La interfaz del programa presenta el siguiente aspecto:



En la barra superior se encuentra la casilla de CORJET, se pulsa y se accede a una interfaz con tres pestañas con las opciones:

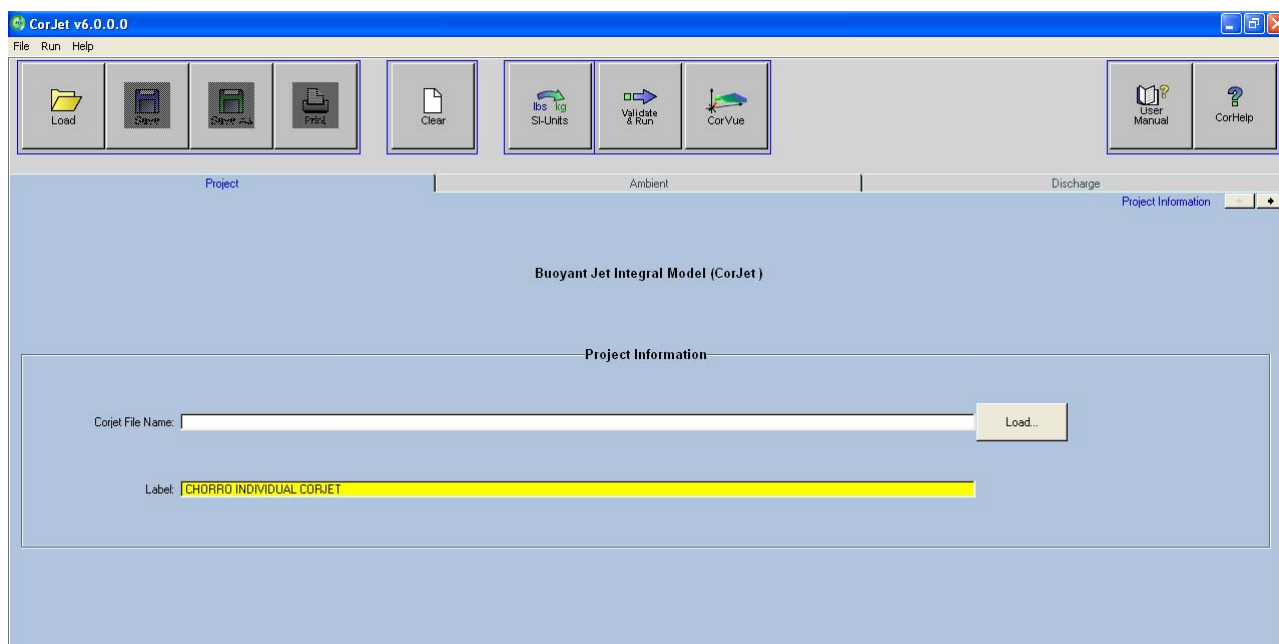
- PROJECT: proyecto.
- AMBIENT: medio receptor.
- DISCHARGE: descarga o vertido.



3. PESTAÑA DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO: "PROJECT"

Incluye los datos sobre el proyecto y la descripción del mismo.

Para utilizar CORJET se selecciona la pestaña de "CORJET" en la barra de herramientas superior. Se puede cargar un proyecto existente y modificar los datos o bien, generar uno nuevo, rellenar la descripción (*label*) y guardar como un nuevo proyecto (*Save as*), con "inp".



4. PESTAÑA DE CONDICIONES EN EL MEDIO RECEPTOR: "AMBIENT"

Incluye las variables (condiciones) en el medio receptor.

- Se selecciona para el tipo de fluido del medio receptor la opción: agua (*water*).
- Se indica si la densidad de la columna (*density*) de agua se va a especificar directamente o si se prefiere introducir los datos de temperatura y salinidad (*temperatura/ salinity*) y que el programa calcule la densidad.
- Se indica el número de niveles (*levels*) en que se quiere dividir (discretizar) la columna de agua.
- Se introduce la profundidad (*depth*) de estos niveles. El origen vertical se considera en el fondo, la coordenada "z" crece hacia la superficie.
- Se introducen los datos de densidad o temperatura/salinidad, según la opción elegida. Dado que el origen se sitúa en el fondo, si hay varios niveles, la densidad irá decreciendo cuanto mayor es el nivel (sino el programa avisa de inestabilidad en los datos de entrada).
- Se introduce para cada nivel, el valor de la velocidad (*velocity*) y su ángulo (*angle of velocity*) con respecto al eje "x".

Se completan las casillas con los datos de entrada (ver la sección 4 de la ficha: "Opciones del modelo" y el Anexo 2, de valores realistas y recomendados). Siguiendo estos pasos para el caso propuesto, la interfaz de "AMBIENT" presentaría el siguiente aspecto:

CorJet v6.0.0.0

File Run Help

Load Save Open Print Clear SI-Units Validate & Run CorVue User Manual CorHelp

Project Ambient Discharge Ambient Conditions

Density and Velocity Field Specification

Fluid: 1 - Water Density Specification: 2 - Specified Directly No. of Ambient Levels: 3

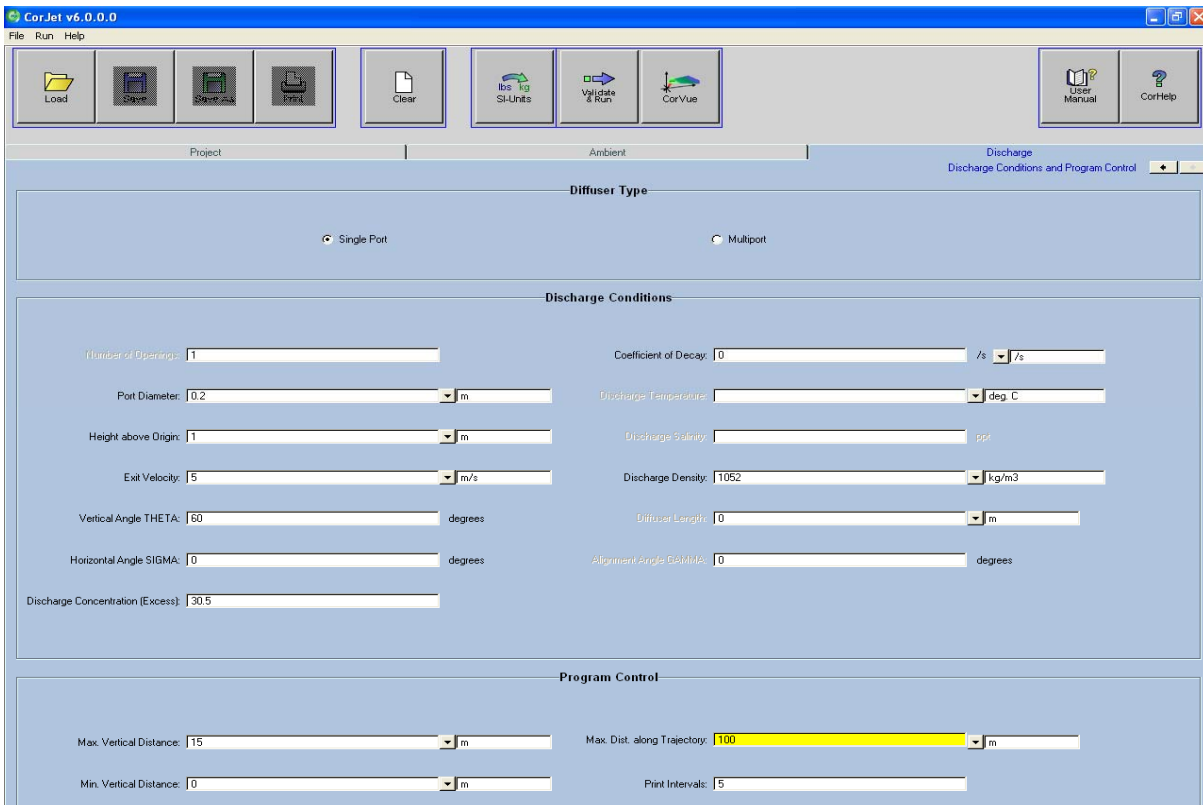
Ambient Data

Level No	Elevation m	Temperature deg. C		Salinity (ppt)	Density kg/m ³	Velocity m/s		Angle of Velocity (deg)
1	0				1027	0.1	0	
2	7				1025.5	0.1	0	
3	15				1025	0	C	

5. PESTAÑA DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE VERTIDO: "DISCHARGE".

Incluye los parámetros de diseño del sistema de vertido. Como se trata de un vertido mediante chorro individual sumergido, lo primero es seleccionar la pestaña de "Single port", y a continuación ir rellenando las casillas con los datos de entrada (ver la sección 3 de la ficha: "Opciones del modelo" y el anexo 2 de valores realistas y recomendados).

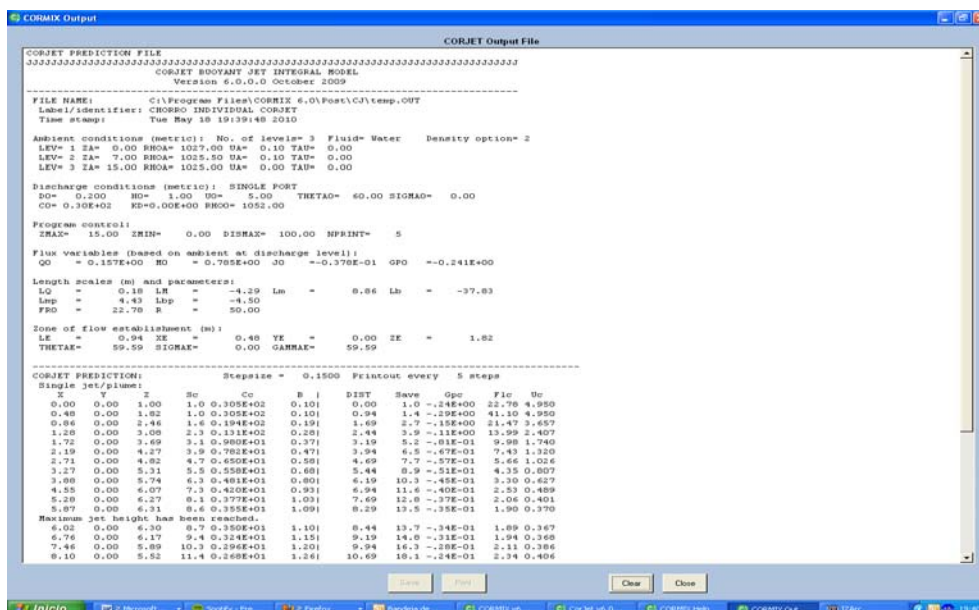
Seguindo estos pasos para el caso propuesto, la interfaz de "DISCHARGE" resulta:



7. FICHEROS DE RESULTADOS: "OUTPUT"

Incluye las opciones para generar los distintos tipos de informes de resultados (ver sección 3 de la ficha; "Opciones del modelo").

Seguindo estos pasos para el caso propuesto, la interfaz de "OUTPUT" resulta:



8. REPRESENTACION GRÁFICA DE DATOS

CORJET no permite una visualización gráfica del comportamiento del vertido cuando lo aplicamos individualmente.

ANEXO 2.

RANGO DE VALORES REALISTAS EN LOS PARAMETROS DE ENTRADA, PARA LA SIMULACION DEL VERTIDO DE SALMUERA AL MAR MEDITERRANEO. DESALINIZACION POR ORMOSIS INVERSA. MÓDULO CORJET.

Es importante señalar que la horquilla de valores admitidos por CORJET es más amplia, pero en muchas ocasiones está fuera del rango de diseño de nuestras plantas.

RANGO DE VALORES REALISTAS Y VALORES RECOMENDADOS PARA LOS DATOS DE ENTRADA EN CORJET, EN VERTIDOS EN CHORRO INDIVIDUAL DE SALMUERA EN EL MAR MEDITERRANEO (CORJET)				
"AMBIENT" (CONDICIONES EN EL MEDIO RECEPTOR). CORJET				
Nº niveles (Levels)	Densidad en cada nivel vertical (Density)	Profundidad del nivel (Elevation)	Velocidad de la corriente en nivel (velocity)	Dirección de la corriente respecto eje x (Angle of velocity)
1-10	1028 – 1024 kg/m ³ (*1)	El que corresponda (*2)	0.01 - 1m/s (*3)	0
"DISCHARGE" (PARAMETROS DE LA DESCARGA).				
Vertido mediante chorro individual "Single Port"				
Diámetro boquilla (port diameter)	Altura de boquilla sobre fondo (Height above origin)	Velocidad salida chorro (Exit velocity)	Angulo de inclinación de salida (Vertical angle)	Angulo horizontal entre el chorro y corriente (Horizontal angle)
> 0.15m (*4)	1 - 1.5m (*5)	3.5 - 5m/s (*6)	45°- 60° (*7)	Interesa: 0° ó 90°. No interesa 180° (*8)
Concentración inicial (Discharge Concentration)	Coefficiente decaimiento (Coeff. Decay)	Temperatura efuyente (Discharge temperature)	Concentración salina del efuyente (Discharge salinity)	Densidad efuyente (Discharge density)
$\Delta C_o \cong 30.5 \text{ psu}$ (*9)	°0 (salmuera conservativa)	15°C - 27°C (*10)	$S = C_o \cong 68 \text{ psu}$: (*10)	1052 - 1047 kg/m ³ (*10)
Vertido mediante tramo difusor de chorros múltiples "Multiport"				
Los parámetros correspondientes a cada chorro individual del tramo difusor más los indicados a continuación:				
Número de boquillas (Number of Openings)		Longitud del tramo difusor (Diffuser lenght)	Angulo de tramo difusor con la corriente en el medio receptor (Aligment angle)	
Lo que corresponda (*11)		La que corresponda (*11)	El que corresponda (*12)	
"PROGRAM CONTROL" (PARÁMETROS DE CONTROL). CORJET				
Cota máxima simulación (Max. Vertical Distance)	Cota mínima de simulación (Min. Vertical Distance)	Longitud máx. de simulación (Max.Dis.along trayect)	Intervalos de representación (Print intervals)	

La que corresponda (*13)	Cota del fondo (*13)	La que corresponda	5-10
--------------------------	----------------------	--------------------	------

NOTAS:

(*1) A las profundidades características de vertido de salmuera en el Mar Mediterráneo, la salinidad oscila entre valores de 37psu y 38psu, y la temperatura en la columna de agua oscila, según el mes, entre 15 y 27°C aproximadamente. De acuerdo con esto, la **densidad del medio receptor** oscilará entre 1028 y 1024Kg/m³. Para una salinidad media en la zona de vertido de 37.5psu y una temperatura media de 21°C, la densidad aproximada del medio receptor sería 1026Kg/m³.

El siguiente cuadro muestra los valores de densidad aproximados para el rango de valores de temperatura y salinidad realistas en el Mar Mediterráneo para las profundidades de vertido.

AGUA DEL MAR MEDITERRÁNEO		
Salinidad (psu)	Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m ³)
37 – 37.5 - 38	15	1027.4 - 1027.8 - 1028.1
37 – 37.5 - 38	18	1026.6 - 1027 - 1027.3
37 – 37.5 - 38	21	1025.7 - 1026 - 1026.5
37 – 37.5 - 38	24	1024.8 - 1025.2 - 1025.6
37 – 37.5 - 38	27	1023.8 - 1024.2 - 1024.6

(*2) El calado en la zona de descarga será el que corresponda. Siempre que sea posible, se recomienda localizar el vertido a una profundidad suficiente para evitar el impacto del chorro con la superficie del mar, dado que este hecho reduce la dilución y es difícil de simular con los modelos comerciales disponibles.

(*3) Las corrientes en el Mar Mediterráneo no suelen superar valores de 1m/s, siendo generalmente mucho menores e incluso prácticamente nulas durante algunos meses del año (calma chicha). La simulación debe incluir los distintos escenarios mensuales o estivales y considerar el valor y dirección de la corriente en el medio receptor en las profundidades en las que se desplaza la salmuera.

(*4) En función del caudal de salmuera a verter se jugará con el número de boquillas y el diámetro de las mismas, de modo que la velocidad de salida de cada chorro de 3.5-5m/s (para garantizar una dilución significativa). Se recomiendan diámetros de boquilla superiores a 15cm para minimizar el riesgo de obstrucción ante el fouling.

(*5) Se recomienda una altura de la boquilla respecto al fondo de 1m, para evitar la realimentación del chorro con salmuera. En el caso de vertidos con limitación de calado, se recomienda diseñar al menos con una altura de 0,5 m.

(*6) Cuanto mayor es la velocidad de salida del chorro, mayor será el número de Froude densimétrico y la dilución de la salmuera en campo cercano. Se recomienda diseñar con valores de 3.5-5m/s y números de Froude densimétrico entre 20-25.

(*7) Acorde a la opinión de la comunidad científica (10)

(*8) Los estudios experimentales llevados a cabo demuestran que si el chorro se vierte en la misma dirección y sentido que la corriente predominante en el medio receptor, o bien, perpendicular a la misma, se favorece la dilución. Si el vertido se realiza en la misma dirección pero sentido contrario a la corriente, se producen fenómenos de intrusión y la dilución se reduce (5)

(*9) La concentración salina del efluente salmuera respecto a la del medio receptor (Mar Mediterráneo) depende de la tasa de conversión: "R" en el proceso de desalinización en planta. Para plantas de osmosis inversa, que son las más frecuentes en nuestras costas mediterráneas, la tasa es del orden del R=40%-

50%. Para calcular la concentración salina del efluente se aplica la fórmula: $C_o = \left(\frac{C_A}{1-R}\right)$; siendo R: tasa de conversión de la planta; y C_A : salinidad del agua de alimentación de la planta (en este caso, agua del Mar Mediterráneo: 37-38psu).

(*10) Considerando el rango de densidades realistas en el Mar Mediterráneo en las profundidades de vertido y tasas de conversión de la planta del 45%, y suponiendo (como prácticamente ocurre en la realidad) que la temperatura de la salmuera es prácticamente la misma que la del agua de alimentación, el siguiente cuadro indica el rango de densidades aproximadas. Para una salinidad media del agua de alimentación de 37.5psu y una temperatura media de 21°C, y R=45%, la densidad aproximada de la salmuera sería de 1049Kg/m³.

AGUA DE ALIMENTACIÓN (OBRA DE TOMA)				SALMUERA		
Salinidad (psu)	Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m ³)		Concentración Salinidad (psu)	Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m ³)
37	15	1027.4	OSMOSIS INVERSA. Tasa de conversión del 45%	67.3	15	1050.6
37.5		1027.8		68		1051.2
38		1028.1		69.1		1052
37	18	1026.6		67.3	18	1049.7
37.5		1027		68		1050.2
38		1027.3		69.1		1051.1
37	21	1025.7		67.3	21	1048.8
37.5		1026		68		1049.3
38		1026.5		69.1		1050.2
37	24	1024.8		67.3	24	1047.8
37.5		1025.2		68		1048.3
38		1025.6		69.1		1049.2
37	27	1023.8	67.3	27	1046.8	
37.5		1024.2	68		1047.3	
38		1024.6	69.1		1048.2	

(*11) Se recomienda diseñar el número de boquillas y longitud del tramo difusor de modo que no se produzca interacción entre chorros contiguos durante su trayectoria antes de impactar con el fondo (dado que esta interacción reduce el grado de dilución del efluente y es más difícil de modelar)

(*12) En general interesa que el ángulo entre los chorros y la corriente del medio receptor sea de 0 a 90° y que los chorros sean perpendiculares al tramo difusor.

(*13) Los límites máximos y mínimos limitarán el rango de simulación del modelo, interrumpiendo la ejecución si el eje alcanza estos límites. Para el caso de Hmin se recomienda introducir el valor de la altura del difusor con respecto al fondo, y para Hmax un valor menor que el calado disponible

ANEXO 3.

RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO *CORJET* DE *CORMIX*.

En este anexo se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del subsistema *CORMIX1* a los valores de los datos de entrada al modelo. Las conclusiones a este análisis se exponen en la sección 5 de esta ficha descriptiva.

Glosario de términos para los datos de entrada (características del efluente, parámetros de descarga y condiciones en el medio receptor):

- ρ_A : densidad en el medio receptor.
- H_A : profundidad media de la columna de agua en la zona de vertido.
- U_A ; velocidad de la corriente en el medio receptor.
- T_A : temperatura del medio receptor.
- S_A : salinidad del medio receptor
- σ (sigma): ángulo horizontal entre el chorro y la corriente ambiental (en el medio receptor)
- ρ_o : densidad del efluente a la salida.
- T_o : temperatura del efluente.
- S_o : concentración salina del efluente
- h_o : altura del difusor respecto al fondo.
- θ (theta): ángulo de inclinación del chorro en la descarga.

- U_o : velocidad de salida del chorro.
- D : diámetro de la boquilla.
- Z : coordenada vertical en el sistema de referencia cartesiano.
- X : coordenada horizontal, que corresponde a la dirección y sentido de la corriente en el medio receptor, en el sistema de referencia cartesiano.
- Y : coordenada horizontal, que corresponde a la dirección y sentido perpendicular a la corriente en el medio receptor, en el sistema de referencia cartesiano.

- Gravedad reducida:
$$g_o' = g \frac{\Delta\rho_o}{\rho_a} = g \frac{\rho_o - \rho_a}{\rho_a}$$

- Número de Froude densimétrico:
$$F = \frac{U_o}{\sqrt{g_o' D}}$$

- Z_{max} : Valor de la coordenada vertical (z) del eje del chorro, correspondiente al punto de máxima altura alcanzada por el eje.
- $S (Z_{max})$: Valor de la dilución en el eje del chorro, para el punto de máxima altura del eje del chorro.
- X_i : Valor de la coordenada horizontal del eje del chorro, en el punto de impacto del eje del chorro con el fondo (alcance horizontal del chorro)
- $Se_j (X_i)$: Valor de la dilución en el eje del chorro, para el punto de impacto del eje del chorro con el fondo.
- XL : Valor de la coordenada horizontal del eje del chorro en el final de la zona de campo cercano
- $Se_j (XL)$: Valor de la dilución en el eje del flujo, para el final de la zona de campo cercano.
- B : semiancho del chorro, distancia radial donde la velocidad es igual al 37% de la velocidad en el eje del chorro.
- BH : semiancho horizontal de la pluma.
- BV : semi espesor de la pluma

Caso del análisis de sensibilidad:

Para el análisis de sensibilidad se considera la salmuera derivada de un proceso de desalinización mediante osmosis inversa con tasa de conversión del 45%. El efluente se vierte al Mar Mediterráneo mediante un vertido sumergido en chorro individual (equivalente a un tramo difusor con chorros que no interaccionan entre sí durante la trayectoria antes del punto de impacto con el fondo).

El sistema de referencia es cartesiano, con origen la boquilla de salida del chorro. La corriente en el medio receptor coincide en dirección y sentido con el eje "x", de modo que si el chorro se vierte en la misma dirección que la corriente ($\sigma = 0^\circ$) seguirá la dirección y sentido del eje "x", mientras que si se vierte perpendicularmente a la corriente ($\sigma = 90^\circ$) seguirá inicialmente la dirección del eje "y", pero luego será desviado por la corriente en dirección "x". Para un chorro vertido en la misma dirección pero sentido opuesto a la corriente ambiental ($\sigma = 180^\circ$), se desplazará inicialmente en sentido opuesto a la corriente ("x" negativo), hasta ser desviada en la dirección de la misma ("x" positivo).

El rango de valores de las variables corresponde a parámetros de diseño característicos de vertido de salmuera y de escenarios ambientales en el Mar Mediterráneo.

A) INFLUENCIA DEL **ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO** EN EL VERTIDO (θ)

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$; $U_A = 0$; $H_A = 20 \text{ m}$. $h_o = 1\text{m}$; $\sigma = 0^\circ$ (co-flowing), $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$; $U_o = 5\text{m/s}$; $D = 0.2 \text{ m}$; $U_{viento} = 0$. , $Manning = 0.02$

A.1) Variamos θ , desde **0 a 90°** (con incrementos de 15°).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
θ (°)		Z_{\max} (m)	$S_{\text{eje}} (Z_{\max})$	X_i (m)	$S_{\text{eje}} (X_i)$
0°	NV2	1	1	7.1	6.8
15°	NV2	2	5	10.3	10.5
30°	NV2	3.7	6.4	12	12.8
45°	NV2	5.6	6.8	12.7	16.7
60°	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
75°	NV2	8.7	6	6	15.9
90°	NV2	9.3	5.6	0	16.7

B) INFLUENCIA DE LA **DENSIDAD** DEL EFLUENTE VERTIDO (ρ_o) Y DE LA DENSIDAD DEL MEDIO RECEPTOR (ρ_A), SIENDO ÉSTA HOMOGÉNEA.

Parámetros fijos: $U_A = 0$; $H_A = 20\text{ m}$; $h_o = 1\text{ m}$; $\theta = 60^\circ$; $\sigma = 0^\circ$; $U_o = 5\text{ m/s}$; $D = 0.2\text{ m}$; $U_{viento} = 0$; $Manning = 0.02$

B.1) Para $\rho_A = 1026\text{ Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o desde 1047 Kg/m^3 a 1053 Kg/m^3 (con incrementos de 2 Kg/m^3).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
ρ_o (Kg/m ³)		Z_{max} (m)	S_{eje} (Z_{max})	X_i (m)	S_{eje} (X_i)
1047	NV2	7.9	7	11.2	17.8
1049	NV2	7.6	6.8	10.9	18.5
1051	NV2	7.3	6.5	10.2	15.9
1053	NV2	7.1	6.2	10	16.4

B.2) Para $\rho_A = 1027.5\text{ Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o desde 1047 Kg/m^3 a 1053 Kg/m^3 (con incrementos de 2 Kg/m^3).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
ρ_o (Kg/m ³)		Z_{max} (m)	S_{eje} (Z_{max})	X_i (m)	S_{eje} (X_i)
1047	NV2	8.1	7.3	11.4	17.3

1049	NV2	7.8	6.9	11.1	18
1051	NV2	7.5	6.6	10.8	18.6
1053	NV2	7.3	6.4	10.1	16.1

B.3.) Para $\rho_A = 1028 \text{Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o desde 1047Kg/m^3 a 1053Kg/m^3 (con incrementos de 2.5Kg/m^3).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
ρ_o (Kg/m ³)		Z _{max} (m)	S _{eje} (Z _{max})	X _i (m)	S _{eje} (X _i)
1047	NV2	8.2	7.4	12	20.1
1049	NV2	7.9	7	11.2	17.8
1051	NV2	7.6	6.8	10.9	18.5

1053	NV2	7.3	6.5	10.2	15.9
------	-----	-----	-----	------	------

C) INFLUENCIA DE LA **ESTRATIFICACIÓN** EN LA COLUMNA DE AGUA.

Parámetros fijos: $U_A = 0$; $H_A = 20$ m; $S_A = 37.5$ psu; $h_o = 1$ m; $\sigma = 0^\circ$, $\theta = 60^\circ$; $\rho_o = 1052$ Kg/m³; $U_o = 5$ m/s; $D = 0.2$ m, Manning=0.02

C.1.) Representando una situación otoñal/invernal en el Mar Mediterráneo, sin presencia de Termoclina y una temperatura uniforme en la columna de agua del medio receptor, con valores de 15°, 18° y 21°C. Se considera la misma temperatura en el efluente y el medio receptor

VARIABLES MODIFICADAS				RESULTADOS CON CORJET			
				Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
T (°C)	ρ_A (Kg/m ³)	ρ_o (Kg/m ³)	CLASE DE FLUJO	Z _{max} (m)	Seje (Z _{max})	X _i (m)	Seje (X _i)
15	1051.2	1027.8	NV2	7.5	6.6	10.8	18.6
18	1050.2	1027	NV2	7.5	6.8	10.9	18.5
21	1049.3	1026	NV2	7.5	6.6	10.4	15.5

C.2.) Representando una situación primaveral/estival en el Mar Mediterráneo, existiría una termoclina a profundidades entre 15 y 20m. Se considera que la picnoclina se sitúa a una profundidad de 15m desde superficie, existiendo un salto térmico entre la superficie y el fondo. Consideramos que el agua de alimentación se capta a profundidades inferiores (y no contaminada por salmuera), de una zona no afectada por la picnoclina con $T_A = 24^\circ\text{C}$ y, por tanto, $\rho_A = 1048.3$ Kg/m³;

VARIABLES MODIFICADAS			RESULTADOS CON CORJET			
			Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
$\rho_A - \text{sup}$ (Kg/m ³)	$\rho_A - \text{fondo}$ (Kg/m ³)	CLASE DE FLUJO	Z _{max} (m)	Seje (Z _{max})	X _i (m)	Seje (X _i)

1024.2 (T=27°C y S=37.5psu)	1027.8 (T=15°C y S=37.5psu)		8	7.1	11.2	17.6
1024.2 (T=27°C y S=37.5psu)	1028.15 (T=15°C y S=38psu)		8	7.2	11.3	17.5

C.3.) Se representa la misma situación anterior, de presencia de pycnoclina, pero en este caso el salto térmico se sitúa a una distancia de 16.5m desde la superficie (3.5m sobre el fondo), de modo que afecta al chorro en la mayor parte de su trayectoria.

VARIABLES MODIFICADAS			RESULTADOS CON CORJET			
			Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
ρ_A - sup (Kg/m3)	ρ_A - fondo (Kg/m3)	CLASE DE FLUJO	Z _{max} (m)	Seje (Z _{max})	X _i (m)	Seje (X _i)
1024.2 (T=27°C y S=37.5psu)	1027.8 (T=15°C y S=37.5psu)		8	7	11.2	17.6

1024.2 (T=27°C y S=37.5psu)	1028.15 (T=15°C y S=38psu)		8	7.2	11.3	17.5
-----------------------------------	----------------------------------	--	---	-----	------	------

D) INFLUENCIA DE LA **VELOCIDAD DE LA CORRIENTE** EN EL MEDIO RECEPTOR (U_A) Y DEL **ÁNGULO HORIZONTAL** ENTRE EL CHORRO Y LA CORRIENTE (σ).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$; $H_A = 20 \text{ m}$; $h_o = 1 \text{ m}$; $\theta = 60^\circ$; $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$; $U_o = 5 \text{ m/s}$; $D = 0.2 \text{ m}$, $Manning=0.02$.

D.1.) Variamos U_A desde 0 hasta 0.9m/s (incrementos de 0.15m/s), para $\sigma = 0^\circ$ (corriente de la misma dirección y sentido que el chorro).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
U_A (m/s)		Z_{\max} (m)	$S_{\text{eje}} (Z_{\max})$	X_i (m)	$S_{\text{eje}} (X_i)$
0	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
0.15	NV2	6.2	10.9	16.6	37.3
0.30	NV2	5.3	13.8	26.9	66.6
0.45	NV1	4.6	15.3	36.3	80.4
0.60	NV1	4.1	16	45.2	88
0.75	NV1	3.7	16.2	52.8	90.5
0.90	NV1	3.4	16.3	60	91.6

D.2.) Variamos U_A desde 0 hasta 0.9m/s (incrementos de 0.1m), para $\sigma = 90^\circ$ (corriente perpendicular al chorro).

VARIABLE MODIFICADA	RESULTADOS CON CORJET
---------------------	-----------------------

D.3.) Variamos U_A (incrementos de 0.1m), con misma dirección y sentido

U_A (m/s)	CLASE DE FLUJO	Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
		Z_{max} (m)	S_{eje} (Z_{max})	Y_i / X_i (m)	S_{eje} (X_i)
0	NV2	7.4	6.5	10.2 / 0	15.8
0.15	NV2	6.8	10.5	7.8 / 11.7	43.5
0.30	NV2	5.7	14.9	5.4 / 24.4	75.9
0.45	NV1	4.9	16.3	4.2 / 34.7	86.5
0.60	NV1	4.2	16.7	3.5 / 44	91.7
0.75	NV1	3.8	16.8	3 / 50.6	89.9
VARIABLE MODIFICADA			RESULTADOS CON CORJET		
0.90	NV1	3.4	16.6	2.6 / 57	88.6
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
U_A (m/s)	CLASE DE FLUJO	Z_{max} (m)	S_{eje} (Z_{max})	X_i (m)	S_{eje} (X_i)
0	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
0.15	NV2	8.8	3	4.6	16.6
0.30	NV2	8.2	10	-23	86
0.45	NV1	6.8	11.8	-36.8	97
0.60	NV1	5.8	12.4	-46	95
0.75	NV1	5.1	12.7	-54	94
0.90	NV1	4.6	12.7	-62	92

desde 0 hasta 1m/s $\sigma = 180^\circ$ (corriente de la opuesto al chorro).

NOTA: Respecto al sistema de coordenadas, el eje "x" indica la dirección y sentido de la corriente en el medio receptor. De acuerdo con esto, para $\sigma = 0^\circ$, la dirección y sentido del chorro y la corriente coinciden y es "x"; para $\sigma = 90^\circ$, ambos son perpendiculares, y el eje "y" será la dirección y sentido del chorro, mientras que el "x" sigue correspondiente a la corriente; para $\sigma = 180^\circ$, misma dirección pero sentido opuesto, el chorro en el vertido tendrá valores de "x" negativos, que van haciéndose positivos, cuando el chorro invierte su dirección por efecto de la corriente, que tiene la dirección y sentido del eje "x".

E) INFLUENCIA DEL **CALADO** DEL MEDIO RECEPTOR (H_A).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$; $U_A = 0$; $h_o = 1 \text{ m}$; $\sigma = 0^\circ$, $\theta = 60^\circ$; $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$; $U_o = 5 \text{ m/s}$; $D = 0.2 \text{ m}$, $Manning=0.02$

E.1) Variamos el calado en el medio receptor: H_A **entre 35m y 5m** (incrementos de 5m).

VARIABLE MODIFICADA		RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
H_A (m)	CLASE DE FLUJO	Z_{\max} (m)	$S_{\text{eje}}(Z_{\max})$	X_i (m)	$S_{\text{eje}}(X_i)$
35	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
30	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
25	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
20	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
15	NV2	7.4	6.5	10.4	16.7
10	NV5	No aplicable			
5	NV5	No aplicable			

F) INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA BOQUILLA CON RESPECTO AL FONDO (h_o).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$; $H_A = 20 \text{ m}$; $U_A = 0$; $\sigma = 0^\circ$, $\theta = 60^\circ$; $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$; $U_o = 5 \text{ m/s}$; $D = 0.2 \text{ m}$, $Manning=0.02$

F.1.) Variamos la altura de la boquilla con respecto al fondo: h_o entre 0 y 1.5m (incrementos de 0.5m).

VARIABLE MODIFICADA	CLASE DE FLUJO	RESULTADOS CON CORJET			
		Punto de máxima altura del eje del chorro		Punto de impacto del eje del chorro con el fondo	
h_o (m)		Z_{max} (m)	$S_{eje}(Z_{max})$	X_i (m)	$S_{eje}(X_i)$
0	NV2	6.4	6.5	10.2	15.8
0.5	NV2	6.9	6.5	10.2	15.8
1	NV2	7.4	6.5	10.2	15.8
1.5	NV2	7.9	6.5	10.7	18.9