

Modelo **brIHne-Jet**

VERTIDO DE SALMUERA MEDIANTE CHORRO INDIVIDUAL
SUMERGIDO E INCLINADO

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
(V.1.0)



CONTENIDO:

1. Tabla síntesis de las características del modelo	1
2. Esquema del vertido simulado	4
3. Aproximación numérica. Formulación	6
4. Perfiles transversales del chorro	9
5. Datos de entrada	11
6. Resultados del modelo	12
7. Calibración	13
8. Validación con datos experimentales de otros autores	16
9. Información adicional	22
10. Referencias	22

1. TABLA SÍNTESIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

<p>APLICACIÓN</p>	<p>Modelado de un vertido de salmuera mediante un chorro individual sumergido e inclinado. Simulación limitada a la región del chorro, desde la boquilla de vertido hasta el punto de impacto con el fondo.</p>
<p>ACCESO</p>	<p>Modelo desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, IH Cantabria (contacto: brihnesupport@ihcantabria.com). Ejecutable online desde el portal Web de “brIHne”: www.brihne.ihcantabria.com Disponibles versiones en castellano y en inglés (próximamente).</p>
<p>FORMULACIÓN BASE</p>	<p>Modelo euleriano, basado en la integración de las ecuaciones de movimiento (Navier Stokes) y de transporte en la sección transversal del chorro, de modo que se obtiene la evolución de las variables en el eje del flujo. La integración reduce el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales a un sistema ordinario, que se resuelve mediante el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden. Las ecuaciones utilizadas son las propuestas por Jirka. (2004) (que también utiliza el módulo CORJET del software CORMIX). Próximamente se introducirán modificaciones en el código para mejorar su grado de ajuste a los datos experimentales.</p>
<p>PRINCIPALES HIPÓTESIS</p>	<p>Fluido incompresible; aproximación de Boussinesq (considerando la variación de densidad despreciable en todos los términos salvo en el de flotabilidad); se desprecia la difusión molecular. Medio receptor ilimitado. No existe interacción del flujo con los contornos. Auto semejanza entre secciones. Perfil de tipo Gauss de la concentración y velocidad en la sección transversal del chorro. Modelo de cierre para los términos turbulentos de difusión basado en la teoría de la viscosidad de Boussinesq. El modelo considera que el chorro impacta con la superficie cuando su borde superior la alcanza. El modelo calcula dicho borde superior considerando como radio, la distancia radial donde la concentración es un 2% de la concentración en el eje ($R = 2b$). Para tal caso de impacto con la superficie, el modelo no se ejecuta dado que se invalida la hipótesis de medio receptor ilimitado.</p>

	Los ejes de velocidad y concentración del flujo coinciden.
CAPACIDADES	<p>Considera las características del efluente (densidad, concentración salina), parámetros de descarga (diámetro, velocidad de descarga, altura de boquilla, ángulo de descarga) y las condiciones en el medio receptor (densidad, salinidad, calado, presencia de corrientes: intensidad y dirección).</p> <p>Describe el comportamiento del chorro a lo largo de toda su trayectoria. El informe de resultados incluye el valor de los principales flujos cinemáticos, escalas de longitud, y la evolución gráfica y analítica del valor de las variables más importantes del chorro.</p>
LIMITACIONES	<p>Modelo estacionario. No permite simular series temporales de las variables. Cada simulación representa un único escenario.</p> <p>Modelo limitado a la región del chorro desde la boquilla hasta el punto de impacto del eje del chorro con el fondo.</p>
CALIBRACIÓN	<p>Por el momento, y hasta su próxima re-calibración, el modelo brIHne-Jet responde a la misma aproximación numérica y, por tanto, presenta resultados análogos a los del módulo CORJET de Cormix.</p> <p>Los coeficientes del modelo de cierre de los términos turbulentos ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$), son los obtenidos por diferentes autores para comportamientos asintóticos de flujo, y que han sido recopilados e integrados en las ecuaciones de gobierno por Jirka. (2004).</p> <p>Ecuación de incorporación de masa de agua al chorro (<i>entrainment</i>) propuesto por Pincince <i>et al.</i> (1973), y modificado por Jirka. (2004) para adaptarla a chorros inclinados con flotabilidad.</p> <p>Secciones transversales auto- semejantes y con perfil de tipo Gauss. Coeficiente de dispersión entre el perfil de concentraciones y velocidades igual a $\lambda = 1.2$, Jirka. (2004).</p> <p>Coeficiente de rozamiento para la fórmula de arrastre como consecuencia de la corriente ambiental: $C_d = 1.3$, Jirka. (2004).</p> <p>El modelo brIHne-Jet será re-calibrado próximamente con datos experimentales obtenidos de ensayos ejecutados en el Instituto de Hidráulica Ambiental con técnicas ópticas de anemometría láser: PIV (<i>Particle Image Velocimetry</i>) y LIF (<i>Laser Induced Fluorescence</i>).</p>

<p>VALIDACIÓN</p>	<p>Para validar el modelo brIHne-Jet se han comparado sus resultados numéricos con datos experimentales de ensayos realizados por distintos autores, para tres inclinaciones en la descarga características de vertidos de salmuera ($\theta_o = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$). Para estos ángulos se han comparado el valor de las variables en puntos característicos de la trayectoria del chorro: el punto de máxima altura y el punto de impacto del chorro con el fondo (donde el chorro alcanza en su rama descendente el nivel de la boquilla).</p> <p>La validación para un vertido de salmuera en un medio receptor en reposo revela que brIHne-Jet en general infravalora ligeramente las dimensiones del chorro e infra-estima significativamente (en torno a un 60%) la dilución del efluente con el fluido del medio receptor en el punto de retorno. Para un medio receptor en movimiento, brIHne-Jet presenta un ajuste razonablemente bueno de la geometría del chorro y de la dilución para corrientes en el medio receptor (U_A) pequeñas en relación con la velocidad del chorro (U_o).</p>
<p>RECOMENDACIÓN</p>	<p>BrIHne-Jet no simula efectos de atracción tipo COANDA en el flujo, así como tampoco fenómenos de intrusión (dado que asume en todos los casos medio receptor ilimitado). Por esta razón, se recomienda evitar su aplicación en el caso de de chorros con ángulos de inclinación extremos, en los rangos: $\theta < 20^\circ$ o $\theta > 75^\circ$.</p> <p>La validación revela que el modelo sobrevalora significativamente la dilución en el punto de impacto para el caso de chorros vertidos en dirección opuesta (<i>counter-flowing</i>) o perpendiculares (<i>transverse</i>) a las corrientes del medio receptor. En el diseño bajo estas condiciones, debe tenerse en cuenta este hecho.</p>

2. ESQUEMA DEL VERTIDO SIMULADO

La Figura 1 muestra un esquema del vertido mediante chorro individual inclinado simulado por el modelo brIHne-Jet. La impulsión transmitida en la descarga y la inclinación respecto al fondo hacen ascender al chorro con una componente vertical de momento que se opone a la fuerza de flotabilidad debida a la gravedad. A cierta distancia, se igualan ambas componentes y el chorro alcanza su máxima altura, donde la velocidad vertical es nula. A partir de este punto, el flujo desciende dominado por la flotabilidad hasta impactar con el fondo.

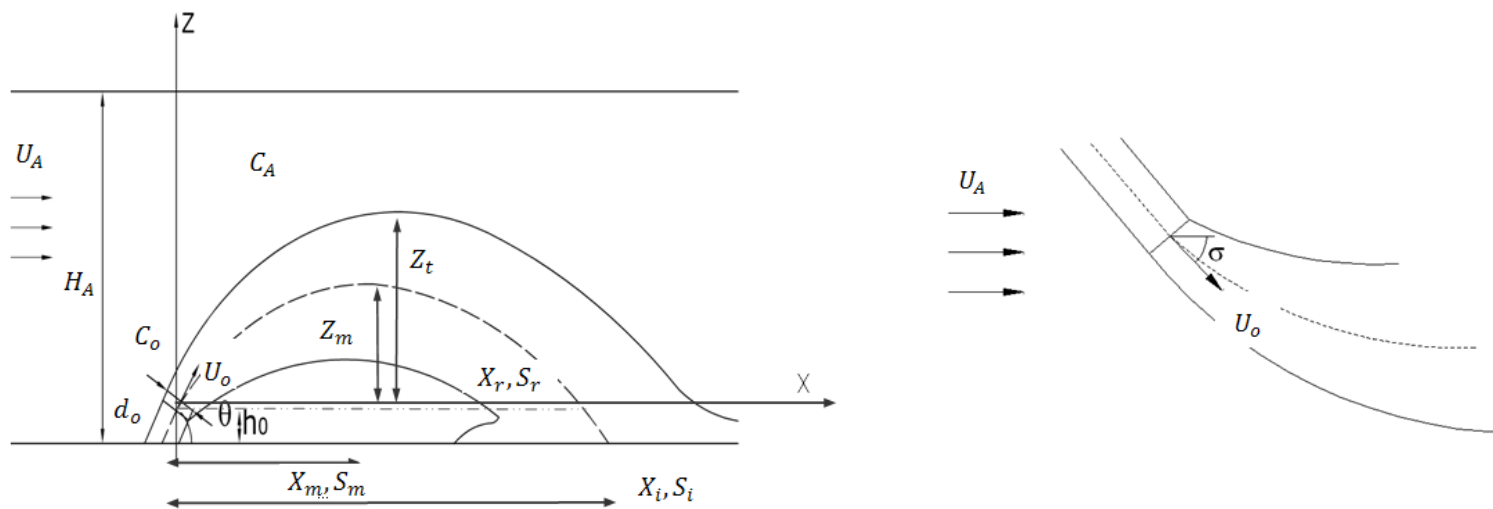


Figura 1. Esquema del vertido de salmuera en chorro simulado por brIHne-Jet. Vista en perfil (panel izquierdo) y Vista en planta (panel derecho).

En la vista del perfil se señalan las variables en los puntos característicos de la trayectoria del chorro.

Siendo:

C_A : salinidad del medio receptor. ρ_A : densidad del medio receptor. H_A : calado en la zona de descarga. U_A : velocidad de la corriente en el medio receptor.

C_0 : concentración salina de la salmuera. ρ_0 : densidad de la salmuera. U_0 : velocidad de descarga. d_0 : diámetro de la boquilla. h_0 : altura de la boquilla respecto al fondo. b : radio del chorro (definido en apartados posteriores) θ_0 : ángulo o inclinación en la descarga respecto al fondo. σ : ángulo (proyección horizontal) del eje del chorro con respecto a la corriente en el medio receptor.

En el esquema de la Figura 1, aparece representado mediante una línea discontinua el eje del chorro, definido como la línea que une los puntos de máxima concentración y velocidad de cada sección transversal del flujo, que en el caso del modelo brIHne-Jet coinciden. Las variables referidas al eje del chorro se expresan con el subíndice “c” (*centerline*). En el modelo, el origen de de la coordenada vertical (Z) se sitúa en el fondo, mientras que el origen para las coordenadas horizontales (X, Y), se localiza en la boquilla de vertido.

Además, en la figura 1 se representan las variables en los puntos característicos de la trayectoria del chorro, que son el punto de máxima altura de la trayectoria del chorro, el punto de retorno (donde el eje del chorro alcanza en su rama descendente el nivel de la boquilla) y el punto de impacto con el fondo, siendo:

X_m, Z_m : coordenadas (horizontal y vertical respectivamente) del punto de máxima altura del eje del chorro.

S_m : dilución en el eje, en el punto de máxima altura del chorro.

Z_t : altura del borde superior del chorro en el punto de máxima altura del eje.

X_r : alcance horizontal (desde la boquilla) en el punto de retorno (donde el eje del chorro alcanza, en su rama descendente, el nivel de la boquilla de vertido).

S_r : dilución en el eje, en el punto de retorno del chorro.

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

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

3. FORMULACIÓN

brIHne-Jet es un modelo euleriano tridimensional que caracteriza el comportamiento estacionario del chorro resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes (en su versión RANS), mediante su integración en la sección transversal del chorro. La integración transforma el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que se resuelve mediante el método numérico de Runge-Kutta de 4º orden, obteniendo el valor de las variables a lo largo del eje del chorro.

Para simular el efecto sobre el chorro de salmuera 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.

Las ecuaciones de gobierno se expresan a través de variables integrales o flujos, que, para un perfil de tipo Gauss en la sección transversal del chorro, responde a las siguientes expresiones:

$$\text{Flujo de volumen: } Q = \pi b^2 (U_c + 2U_A \cos\theta \cos\sigma)$$

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

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

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

Siendo:

$$g'_c: \text{ término de gravedad reducida, } g'_c = g \frac{\rho_c - \rho_A}{\rho_A}$$

λ : ratio de dispersión del radio del chorro.

El subíndice “c” se refiere al valor de las variables en el eje del chorro.

Para un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) con origen (0, 0, 0) en el centro de la boquilla del chorro, las ecuaciones de gobierno, integradas en la sección transversal, que brIHne-Jet resuelve son las siguientes:

► Ecuación de Continuidad:

$$\frac{dQ}{ds} = E$$

► Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento (X):

$$\frac{d(M \cos\theta \cos\sigma)}{ds} = E U_A + F_d \sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma}$$

► Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento (Y):

$$\frac{d(M\cos\theta\sin\sigma)}{ds} = -F_D \frac{\cos^2\theta\sin\sigma\cos\sigma}{\sqrt{1 - \cos^2\theta\cos^2\sigma}}$$

► Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento (Z):

$$\frac{d(M\sin\theta)}{ds} = \pi\lambda^2 b^2 g'_o - F_D \frac{\cos\theta\sin\theta\cos\sigma}{\sqrt{1 - \cos^2\theta\cos^2\sigma}}$$

► Ecuación de conservación del flujo de flotabilidad:

$$\frac{dJ}{ds} = Q \frac{g}{\rho_{ref}} \frac{d\rho_A}{dz} \sin\theta$$

► Ecuación de Conservación de la masa de trazador:

$$\frac{dQ_c}{ds} = 0$$

► Ecuaciones de la trayectoria del eje del chorro:

$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta\cos\sigma; \quad \frac{dy}{ds} = \cos\theta\sin\sigma; \quad \frac{dz}{ds} = \sin\theta$$

El término E corresponde, como veremos, al ratio de incorporación (*entrainment*) de agua desde el medio receptor al efluente chorro. El término F_d expresa la fuerza de arrastre en el chorro, por la presencia de una corriente en el medio receptor (U_A).

3.1. Modelos de cierre de los términos turbulentos

Para poder resolver el sistema de ecuaciones anteriormente planteado, es necesario definir las expresiones de los términos de cierre para la incorporación de agua al chorro (E) y para la fuerza de arrastre (F_d).

El coeficiente de incorporación (E , *entrainment*) responde a la expresión:

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

El primer sumando representa la componente transversal de *entrainment*, que depende fundamentalmente de la velocidad relativa del eje del chorro respecto a la corriente (U_c), del ancho del chorro (b) y de los coeficientes empíricos ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$). El segundo sumando representa la componente azimutal del *entrainment*, cuyo valor está determinado sobre todo por la velocidad en el medio receptor (U_A) y el radio del chorro (b).

Los coeficientes α expresan el comportamiento asintótico del flujo. BrIHne-Jet utiliza los siguientes valores, propuestos por Jirka. (2004):

$\alpha_1 = 0.055$, coeficiente correspondiente a un chorro puro.

$\alpha_2 = 0.6$, coeficiente correspondiente a una pluma pura.

$\alpha_3 = 0.055$: coeficiente correspondiente a una estela pura.

$\alpha_4 = 0.5$, coeficiente correspondiente a una pluma advectiva.

La Figura 2, Jirka. (2004) muestra un esquema gráfico de estos dos términos transversal y acimutal de incorporación de agua del medio receptor al chorro.

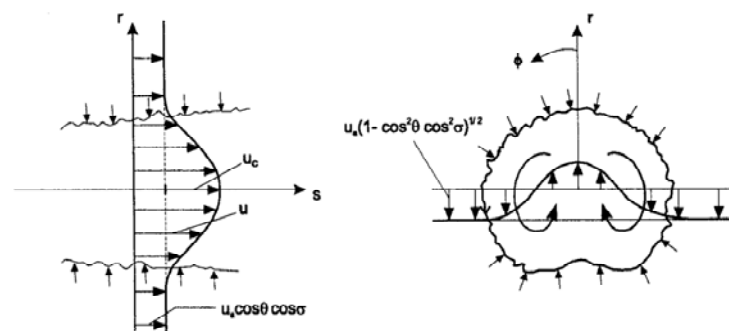


Figura 2: Términos que definen la incorporación de agua del medio receptor al chorro (“*entrainment*”) en el modelo *brlHne-Jet*. Izquierda: término transversal. Derecha: término acimutal.

En relación con la componente transversal, el exceso de velocidad del eje del chorro (U_c) respecto del medio receptor genera inestabilidades en los bordes del chorro en forma de vórtices aximétricos, que junto con las inestabilidades secundarias que se superponen, acaban rompiendo y generando turbulencia en las tres direcciones, Jirka. (2004). Según esta aproximación, la incorporación de agua se produce de forma uniforme a lo largo del perímetro del chorro.

Respecto a la componente acimutal, la corriente del medio receptor, con componente normal: $U_A(1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma)^{0.5}$ interactúa con cada rebanada del chorro y el rozamiento provoca de nuevo inestabilidades que motivan una incorporación de agua adicional. Si el medio receptor está en reposo ($U_A = 0$), la componente acimutal es nula. Para este caso, la fórmula clásica de *entrainment*, en un chorro sin curvatura, responde a la expresión, Priestley *et al.* (1955):

$$E = 2\pi b U_c \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{F_l^2} \right)$$

Para tener en cuenta la curvatura del chorro de flotabilidad negativa, Jirka. (2004) introduce el término $\sin \theta$ en la anterior ecuación de *entrainment*, que es el término que incorpora el módulo CORJET de Cormix, y también, por el momento, *brlHne-Jet*. Sin embargo, la validación con datos experimentales, Palomar *et al.* (2012), refleja que esta aproximación no es capaz de simular con precisión el complejo comportamiento de los chorros con flotabilidad negativa y curvatura, razón por la cual ambos modelos infravaloran la dilución del efluente.

Algunos autores han propuesto otras modificaciones a la fórmula original de *entrainment* para considerar la curvatura. En particular, Papakonstantis *et al.* (2008) sugiere modificar el valor de los coeficientes α_1 y α_2 para conseguir un mejor ajuste con los experimentales en el caso de chorros inclinados de flotabilidad negativa. Sin embargo, el valor de estos coeficientes universales ha sido teórica y experimentalmente contrastado por Fischer *et al.* (1979), Papanicolaou *et al.* (1988) y Wang *et al.* (2002), entre otros. Por tanto, esta modificación de los valores de los coeficientes, aparte de que no implica mejoras significativas en los resultados de la formulación, no puede considerarse rigurosa.

El segundo término de cierre de las ecuaciones integradas en la fuerza de arrastre o rozamiento sobre cada elemento de chorro, generado por la presencia de una corriente en el medio receptor, según la expresión:

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

Siendo: C_D , el coeficiente de arrastre del chorro por efecto de la presencia de una corriente en el medio receptor. *brIHne-Jet* toma como valor de este parámetro el propuesto por Jirka. (2004): $C_D = 1.3$.

Las ecuaciones de conservación de propiedades del flujo, junto con las ecuaciones de trayectoria del eje, la ecuación de estado y las ecuaciones de cierre forman un sistema de nueve ecuaciones con nueve incógnitas ($Q, M, J, Q_c, \sigma, \theta, x, y, z$), que en *brIHne-Jet* se resuelven mediante el método de Runge - Kutta de cuarto orden.

4. PERFILES TRANSVERSALES DEL CHORRO

4.1. Sección transversal asumida por *brIHne-Jet*

Los modelos numéricos de ecuaciones integradas (como los modelos comerciales *UM3*, *Corjet* y *JetLag*) asumen auto semejanza entre las secciones del chorro, lo que implica que, una vez adimensionalizados, los perfiles de las distintas secciones convergen, simplificando significativamente la resolución de las ecuaciones de gobierno.

BrIHne_Jet, análogamente a *CORJET*, asume también auto semejanza entre secciones y una forma del perfil transversal de tipo Gauss, que responde a las expresiones:

$$U = U_c e^{\left(\frac{-r^2}{b_u^2}\right)}.$$

$$C = C_c e^{\left(\frac{-r^2}{\lambda b_c^2}\right)}$$

Siendo:

b_c : distancia radial (en la perpendicular al eje) donde la concentración es un 50% de la concentración en el eje.

b_u : distancia radial (en la perpendicular al eje) donde la velocidad es un 37% de la velocidad en el eje.

U_c : velocidad en el eje del chorro, relativa la velocidad en el medio receptor.

C_c : concentración en el eje del chorro, relativa a la concentración en el medio receptor.

r : posición (distancia) radial desde el eje del chorro.

λ : ratio de dispersión entre la concentración y la velocidad en la sección transversal del chorro (relacionada con el N° de Schmidt). $\lambda = 1.2$, (Jirka, 2004).

La Figura 4 muestra los perfiles de tipo Gauss, asumidos por brIHne-Jet para el perfil de concentración (panel izquierdo) y de velocidad (panel derecho) en las secciones transversales del chorro de salmuera.

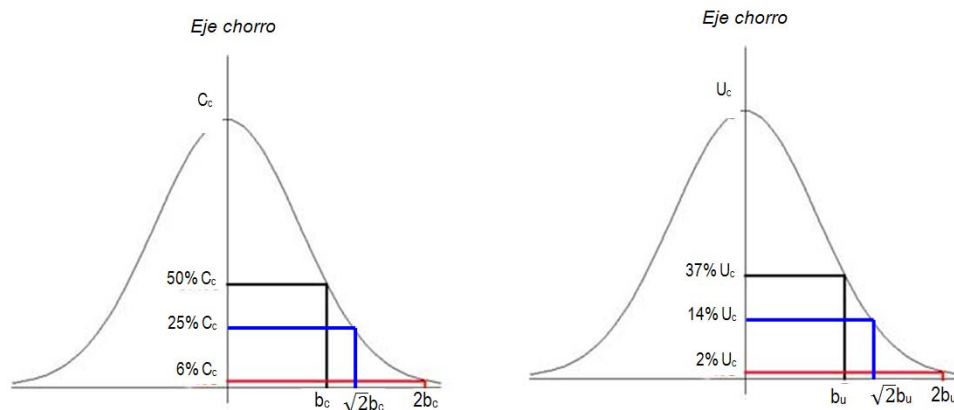


Figura 4. Perfiles transversales de concentración y velocidad del chorro de salmuera. Radios.

Para definir los bordes del chorro, es necesario sumar a cada punto de la trayectoria del eje (X, Y, Z) su correspondiente radio. Un perfil de tipo Gauss no está acotado en sus extremos, por lo que el radio se determina como una distancia radial donde la velocidad y concentración representan un determinado porcentaje respecto a su valor en el eje. De acuerdo con esto, se definen convencionalmente los siguientes radios del chorro para esta sección.

$r = b_c$: distancia radial donde la concentración es un 50% de la correspondiente al eje del chorro .

$r = b_u$: distancia radial donde la velocidad es un 37% de la correspondiente al eje del chorro

$r = \sqrt{2}b_c$: distancia radial donde la concentración es un 25% de la correspondiente al eje del chorro

$r = \sqrt{2}b_u$: distancia radial donde la velocidad es un 14% de la correspondiente al eje del chorro

$r = 2b_c$: distancia radial donde la concentración es un 6% de la correspondiente al eje del chorro

$r = 2b_u$: distancia radial donde la velocidad es un 2% de la correspondiente al eje del chorro

El modelo brIHne-Jet incluye entre sus resultados los valores de los radios: b_c , b_u , y de $2b_c$, $2b_u$ para toda la trayectoria del chorro hasta el punto de retorno, donde el eje alcanza el nivel de la boquilla ($Z = 0$).

Para definir el contorno del chorro se han considerado como radios los valores $2b_c$ y $2b_u$.

Conocidos el valor del radio y la curva a la que se ajusta el perfil, quedan definidas las secciones transversales del flujo.

5. DATOS DE ENTRADA

Como datos de entrada al modelo, el usuario debe introducir las siguientes variables:

H_A : profundidad media en la columna de agua en la zona de descarga.

ρ_A : densidad del medio receptor.

C_A : salinidad media en el medio receptor.

U_A : velocidad de la corriente en el medio receptor.

d_o : diámetro de la boquilla.

h_o : altura de la boquilla de vertido

U_o : velocidad inicial del chorro en la descarga.

ρ_o : densidad del efluente salmuera vertido.

C_o : concentración salina del efluente salmuera.

θ_o : ángulo de inclinación del chorro respecto al fondo en la descarga.

σ : ángulo (proyección horizontal) del eje del chorro con respecto a la corriente en el medio receptor.

De lo que resulta un número de Froude Densimétrico inicial: $F_o = \frac{U_o}{\sqrt{d_o g'}}$.

5.1. Rango admisible de valor de las variables

Considerando el ámbito de aplicación para el modelo brIHne-Jet (vertido al mar de la salmuera procedente de las plantas desalinizadoras), se ha establecido una serie de limitaciones y condiciones a cumplir por los datos de entrada. En el caso de que estas condiciones no se cumplan, el modelo no ejecuta.

La Tabla 1 sintetiza estas condiciones, mientras que la Tabla 2 muestra el rango de valores admisibles para los parámetros del medio receptor, y la Tabla 3 para los parámetros del efluente y del dispositivo de descarga.

Condición	Justificación
$\rho_o > \rho_A$	El efluente ha de tener una densidad mayor que el fluido del medio donde se realiza el vertido, dado que simula una descarga de salmuera.
$C_o > C_A$	El efluente ha de tener una concentración salina mayor que el fluido del medio donde se realiza el vertido, dado que simula una descarga de salmuera.
$\frac{U_o}{U_A} > 1.25$	
$Z_t < 0.95 * H_A$	Si el borde superior del chorro (Z_t) impacta con la superficie libre (H_A), brIHne-Jet no ejecuta, dado que una de la hipótesis asumidas es un medio receptor ilimitado (sin choque del chorro con los contornos).
$\theta_o < 75^\circ$ $\theta_o > 5^\circ$	El modelo no simula vertido de chorros verticales, dado que no es capaz de modelar efectos de intrusión. Tampoco simula chorros horizontales, ya que tampoco es capaz de modelar efectos de adhesión tipo COANDA.

Tabla 1. Condicionantes a los datos de entrada del modelo BrIHne-Jet

Variable	H_A	ρ_A	C_A	U_A
Unidad	m	Kg/m ³	psu	m/s
Rango de valores admisibles	1 - 200	900 - 1200	0 - 100	0 - 2.5

Tabla 2. Rango de valores admisibles para las condiciones en el medio receptor, en los datos de entrada al modelo BrIHne-Jet

Variable	d_o	h_o	U_o	ρ_o	C_o	θ_o	σ
Unidad	m	m	m/s	Kg/m ³	psu	°	°
Rango de valores admisibles	0 - 3	0 - 4	0 - 10	900-1200	0 - 100	5 - 75	0 - 360

Tabla 3. Rango de valores admisibles para las condiciones del efluente y el diseño del dispositivo de descarga, en los datos de entrada al modelo BrIHne-Jet.

6. RESULTADOS DEL MODELO

Introducidos los datos de entrada y ejecutado el modelo, se obtienen los siguientes resultados:

- Valor de los flujos iniciales (de caudal, *momentum* y flotabilidad) y de las escalas de longitud características.
- Variables de la zona de desarrollo de los perfiles auto-semejantes (previamente a alcanzar la zona donde se asume la auto-semejanza entre secciones).
- Valor de las variables en los puntos característicos de la trayectoria del chorro: punto de máxima altura, punto de retorno (donde el eje del chorro alcanza el nivel de la boquilla en su rama descendente) y punto de impacto del chorro con el fondo.
- Evolución de las siguientes variables en la trayectoria del chorro, desde la boquilla hasta el punto de impacto con el fondo:
 - Trayectoria del eje del chorro ($X_{eje}, Y_{eje}, Z_{eje}$).
 - Dilución en el eje (S_{eje}), considerando un perfil transversal de concentraciones de tipo Gauss, y valor de la dilución media (S_{ave}), considerando un perfil de concentraciones uniforme.
 - Concentración salina en el eje del chorro (C_{eje}).
 - Semiancho o radio del chorro (b), definido como la distancia radial (a partir del eje) para la cual la concentración es un 50% y la velocidad un 37% de la correspondiente al eje.
 - Número de Froude densimétrico (F_{eje} o F_{rd}).
 - Velocidad en el eje del efluente (U_{eje}).
 - Inclinación de la trayectoria del chorro respecto al fondo (θ).

Estos resultados se presentan de forma gráfica y analítica en la interfaz de la aplicación, así como en tablas en formato Excel, que el usuario puede descargar desde el portal web.

El modelo ha sido además programado para que, una vez ejecutado (siempre que los datos de entrada cumplan con las condiciones descritas en el apartado 5.1), se genere automáticamente un **informe de resultados** en formato “pdf”. Dicho informe incluye la información de interés en relación con la simulación del comportamiento del vertido, mencionada en los anteriores apartados.

7. CALIBRACIÓN

Por el momento el modelo brIHne-Jet ha sido calibrado con la aproximación numérica a las ecuaciones diferenciales y los valores de los coeficientes experimentales propuestos en Jirka. (2004) y definidos en las secciones previas. Esta aproximación y coeficientes son también los que asume el módulo CORJET del software comercial CORMIX, razón por la cual brIHne-Jet obtiene, por el momento, resultados análogos a los de este módulo.

Sin embargo, la validación de CORJET llevada a cabo en Palomar *et al.* (2012), y de brIHne-Jet, presentada en la sección 8 de este documento, evidencian un ajuste pobre de los resultados numéricos respecto a datos experimentales de diversos autores, especialmente para la variable dilución.

Ensayos experimentales llevados a cabo con técnicas ópticas muy precisas en el Instituto de Hidráulica Ambiental han evidenciado las razones de la desviación entre los resultados de brIHne-Jet (y también de CORJET, UM3 o JetLag) y los datos experimentales.

La primera justificación se encuentra en el hecho de que, si bien las hipótesis de auto semejanza entre secciones y perfil de tipo Gauss son válidas en chorros neutros o con flotabilidad sin curvatura, no son hipótesis aceptables en el caso de chorros con flotabilidad negativa y con inclinación. Los ensayos realizados en el IH Cantabria, así como los presentados por otros autores: Kikkert *et al.* (2007), Shao *et al.* (2010), Papakonstantis *et al.* (2011,b), evidencian que ambas hipótesis se cumplen razonablemente bien en el contorno superior de este tipo de chorros, pero no son sin embargo asumibles en el contorno inferior. El borde inferior experimenta un continuo aumento de su ancho con respecto al borde superior del chorro, debido al *entrainment* adicional generado por la rotura del flujo y la caída de vórtices desde el contorno inferior, como consecuencia de la fuerza gravitacional.

La Figura 5, obtenida de los ensayos realizados en el IH Cantabria, ilustra este comportamiento mostrando los perfiles transversales adimensionalizados de velocidad (paneles izquierdos) y de concentración (paneles derechos) de un chorro de salmuera con inclinación de 30º en la descarga.

Los paneles superiores muestran mediante líneas solidas de color blanco la posición de los distintos perfiles en la trayectoria del chorro, mientras que en los paneles inferiores se representan los perfiles adimensionales en las posiciones X/D seleccionadas (siendo D : diámetro de la boquilla y X : distancia horizontal desde la boquilla). En estos perfiles, el eje de ordenadas representa los valores de concentración (C) y velocidad (U) media, adimensionalizados con sus correspondientes valores en el eje (C_c y U_c , respectivamente). El eje de abscisas muestra la distancia radial desde el eje (r) adimensionalizada con radio de concentración (b_c) y de velocidad (b_u) correspondiente a dicha posición. Los valores $r/b < 0$ corresponden al contorno superior del chorro y los valores $r/b > 0$, al contorno inferior. El valor $r/b = 0$ marca la posición del eje del chorro.

Sobre estos perfiles, medidos experimentalmente y adimensionalizados, se han dibujado las curvas de tipo Gauss asumidas por brIHne-Jet y presentadas en la Figura 4:

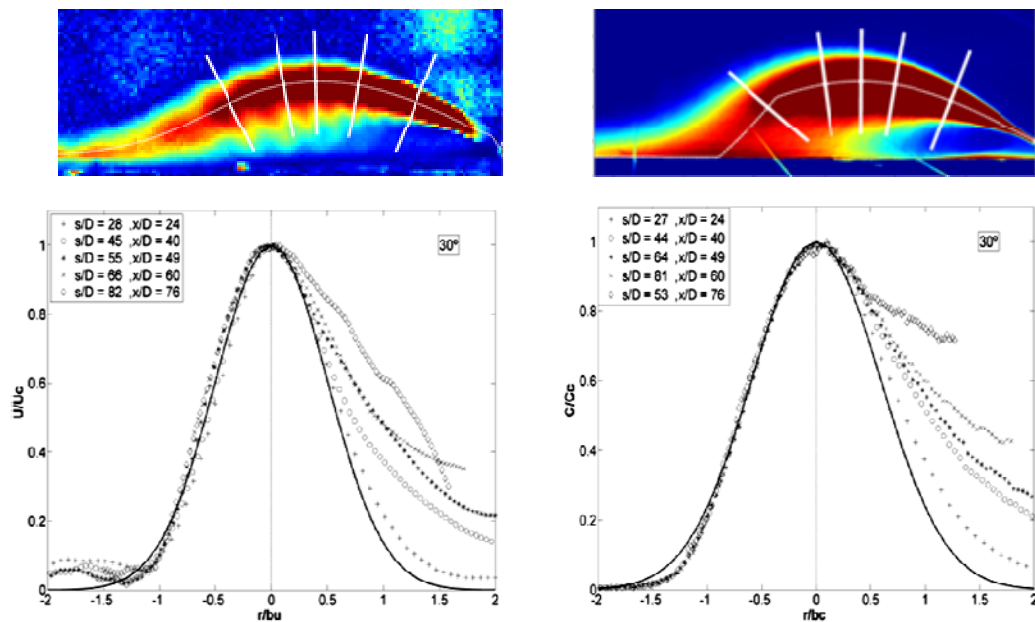


Figura 5. Perfiles transversales adimensionalizados de velocidad (panel izquierdo) y de concentración (panel derecho) de un chorro con inclinación en la descarga de 30°.

Como se observa en la Figura 5, en las secciones cercanas a la boquilla (valores más pequeños de X/D), los perfiles adimensionalizados de velocidad y concentración convergen en curvas de tipo Gauss, con su valor máximo en el eje del chorro. Por tanto, estos perfiles se ajustan bien a las hipótesis de auto-semejanza entre secciones y perfil de tipo Gauss. Sin embargo, en secciones más alejadas de la boquilla (valores más grandes de X/D), dicha convergencia solo se mantiene en el contorno superior del chorro ($r/b < 0$), mientras que el contorno inferior ($r/b > 0$) se deforma, aumentando progresivamente su ancho respecto al contorno superior, con una forma distorsionada, donde las hipótesis de auto-semejanza y perfil de tipo Gauss dejan de ser válidas.

El modelo *brIHne-Jet* (al igual que *CORJET*, *UM3* y *JetLag*) no considera, por el momento, este comportamiento singular de los chorros con flotabilidad negativa y curvatura en su trayectoria. Por esta razón, sus ecuaciones no simulan rigurosamente el ratio de incorporación de agua del fluido receptor al chorro (*entrainment*) y sus resultados infravaloran la dilución en el eje, como se observa en la próxima sección.

Próximamente, el modelo *brIHne-Jet* será re-calibrado gracias a datos experimentales obtenidos con técnicas óptica no-intrusivas de anemometría láser en el Instituto de Hidráulica de Cantabria.

8. VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES DE OTROS AUTORES

Para validar el modelo BrIHne-Jet se han comparado sus resultados con datos experimentales publicados por los siguientes varios autores, correspondientes a vertidos en medio receptor en reposo y en movimiento: Roberts *et al.* (1987), Roberts *et al.* (1997), Cipollina *et al.* (2005), Kikkert *et al.* (2007), Shao *et al.* (2010), Papakonstantis *et al.* (2011, a), Papakonstantis *et al.* (2011, b), cuyas referencias se encuentran al final del presente documento.

Estos estudios experimentales presentan ensayos de chorros hipersalinos con distintos ángulo de descarga (θ_o) y número de Froude densimétrico (F_{rd}), vertidos en un medio receptor en reposo o en movimiento, con distintos valores relativos entre la corriente en el medio y la velocidad del chorro. Realizados los ensayos y analizados los datos, los autores los utilizan la calibrar fórmulas de análisis dimensional correspondientes a este tipo de chorros.

8.1. Validación para un medio receptor en reposo

En las Figuras 6 a 8 se comparan con datos experimentales los resultados de brIHne-Jet para vertidos de chorros hipersalinos con las siguientes inclinaciones en la descarga: $\theta_o = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$. Los resultados se han validado para varias variables en los dos puntos característicos de la trayectoria del chorro: punto de máxima altura y punto de retorno, donde el chorro alcanza, en su rama descendente, el nivel de la boquilla de vertido.

En los gráficos, las variables se han adimensionalizado de acuerdo con el análisis dimensional para este tipo de chorros. Para las variables de trayectoria, se utiliza la escala de longitud: L_M , que se relaciona con el número de Froude densimétrico (F_o) y el diámetro de la boquilla (d_o) mediante la expresión: $L_M = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} d_o F_o$. Los valores de dilución (S) se han adimensionalizado con el número de Froude (F_o).

La Figura 6 muestra la posición horizontal (X_m) y vertical (Z_m) del eje del chorro en el punto de máxima altura de su trayectoria.

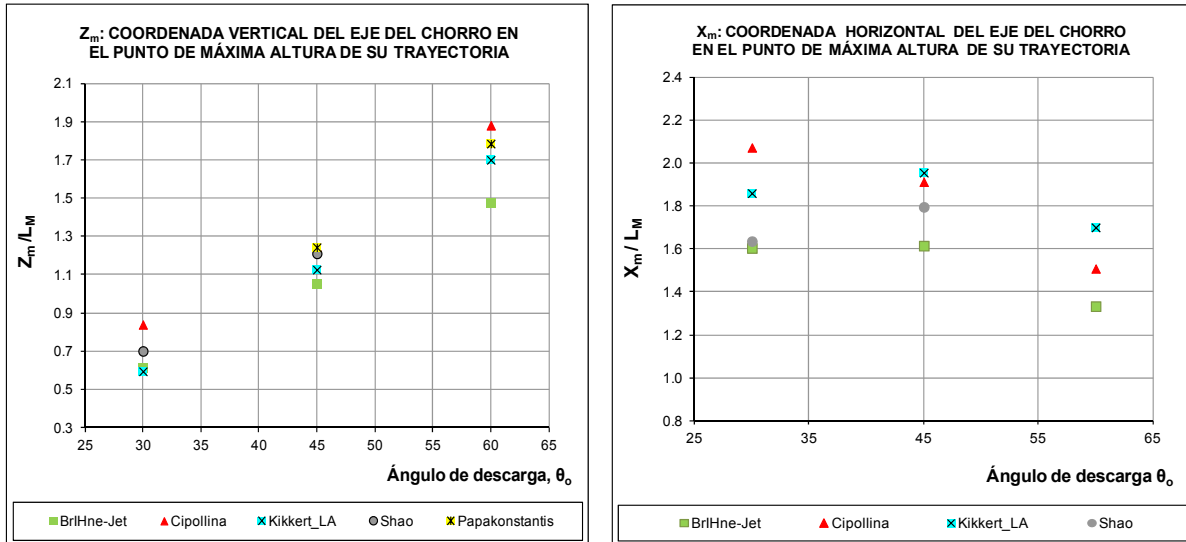


Figura 6. Validación de brIHne-Jet para la posición del eje en el punto de máxima altura (X_m, Z_m)

En la Figura 7 se comparan los valores adimensionalizados de la máxima altura del borde superior del chorro (Z_t) en dicho punto de máxima altura del eje del chorro, considerando un radio $R = 2b$. Este radio equivale en un perfil de tipo Gauss como el que brIHne-Jet asume, a la distancia radial para la cual la concentración es un 6% del valor en el eje.

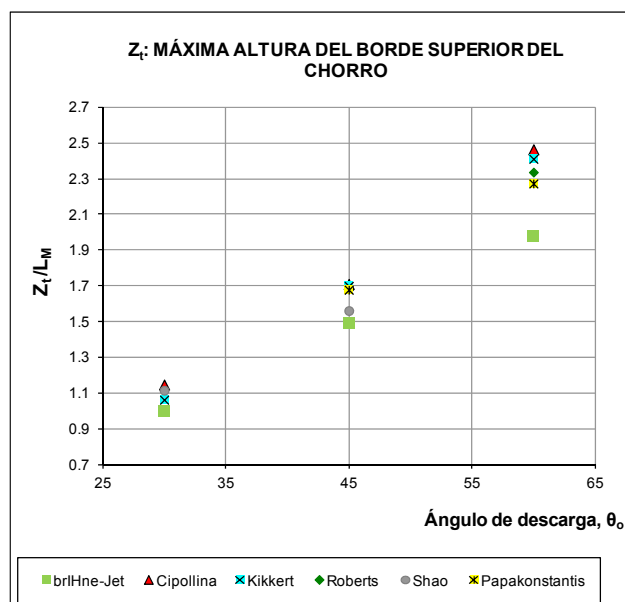


Figura 7. Validación de brIHne-Jet para la máxima altura del borde superior del chorro en el punto de máxima altura (Z_t).

De acuerdo con las Figuras 6 y 7, el modelo brIHne-Jet presenta un ajuste razonablemente bueno de la posición del eje en el punto de máxima altura (X_m, Z_m), así como de la altura del borde superior del chorro en dicho punto (Z_t), infra-estimando ligeramente el valor de estas variables.

La Figura 8 compara con datos experimentales el valor del alcance horizontal del eje o distancia desde la boquilla hasta el punto de retorno (X_r), mientras que en la Figura 9 se validan los valores de la dilución en el eje en este punto (S_r).

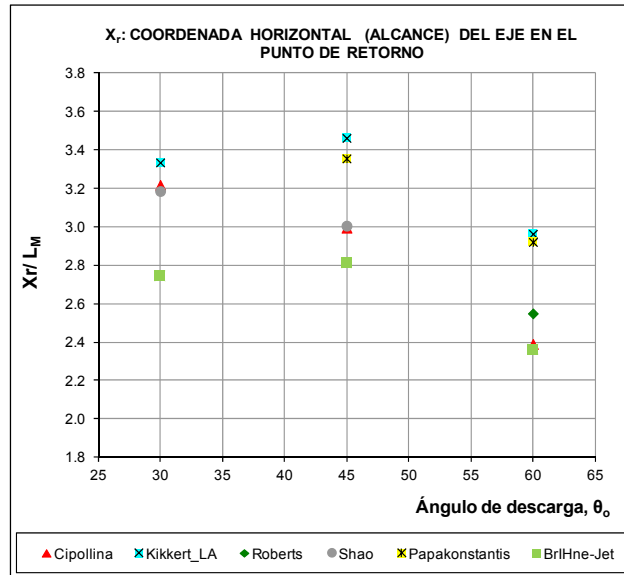


Figura 8. Validación de brIHne-Jet para el alcance horizontal del chorro en el punto de retorno (X_r).

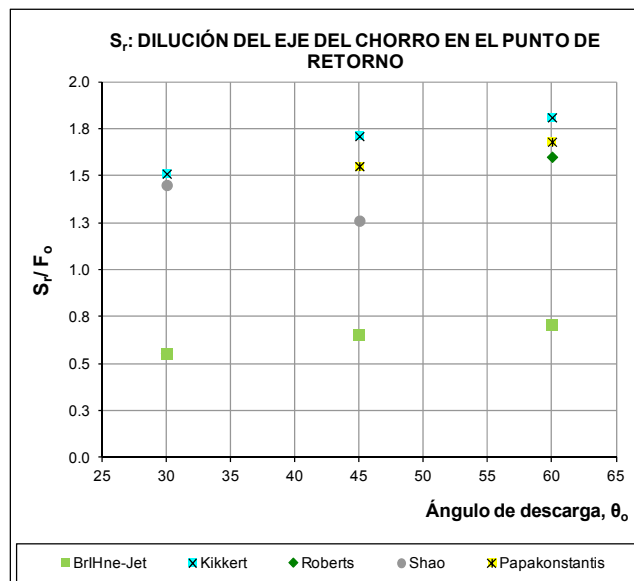


Figura 9. Validación de BrIHne-Jet para la dilución en el eje en el punto de retorno (S_r).

Análogamente a la validación de la trayectoria del chorro en el punto de máxima altura, los resultados de brIHne-Jet presentan un ajuste razonable para los valores de alcance horizontal del chorro en el punto de retorno (X_r), infravalorando ligeramente su valor respecto a los datos experimentales (desviaciones de aproximadamente un 15% respecto a la media de los valores experimentales). Los valores de dilución en el punto de retorno (S_r) presentan sin embargo con peor ajuste, con diferencias (infra-estimaciones) en torno a un 60% respecto a los datos experimentales para todos los ángulos. Esta desviación es similar a la que presentan los modelos comerciales CORJET, UM3 o JetLag según la validación realizada en Palomar *et al.* (2012).

Este hecho refleja que el modelo *brIHne-Jet*, al igual que los otros modelos comerciales, no es capaz de reproducir el complejo proceso de mezcla y dilución del chorro de salmuera con el medio receptor, siendo una aproximación básica del fenómeno.

8.2. Validación en caso de medio receptor en movimiento

En esta sección, se presenta la validación del modelo *brIHne-Jet* para un vertido de salmuera en un medio receptor dinámico. Para eso, se han comparado los resultados numéricos del modelo con los datos experimentales publicados por Roberts *et al.* (1987) y por Gungor *et al.* (2009), que son los hasta el momento disponibles en la literatura científica para medio en movimiento. Los ensayos realizados por estos autores se centran en chorros con ángulos de descarga: $\theta_o = 60^\circ, 90^\circ$.

La velocidad de la corriente en el medio receptor (U_A) se presenta en relación con la velocidad del chorro en la descarga (U_o), mediante una expresión de velocidad relativa ($U_r = \frac{U_A}{U_o}$). La dirección de la corriente se mide a través del ángulo relativo (σ) que forma con el chorro en la descarga.

Como variables para la validación, se utilizan la máxima altura del borde superior del chorro (Z_t) y la dilución en el eje en el punto de impacto del chorro con el fondo (S_i). La primera variable se ha adimensionalizado con el diámetro de la boquilla (d_o) y el número de Froude densimétrico (F_o), mientras que la dilución, con el número de Froude.

La Figura 10 muestra la validación de los resultados de *brIHne-Jet* para un chorro con una inclinación en la descarga de 60° en un medio receptor con una corriente de la misma dirección y sentido que en chorro en la descarga (*coflowing*).

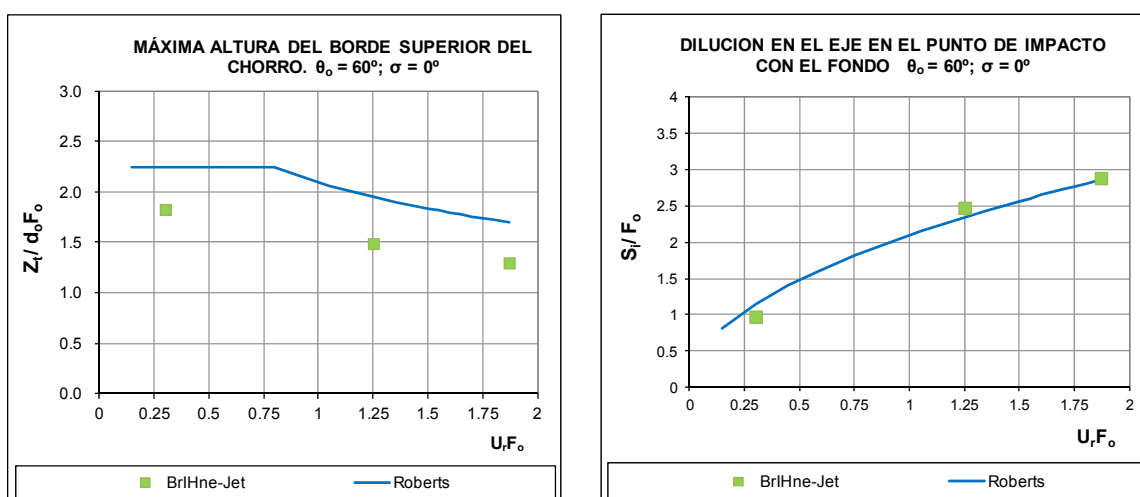


Figura 10. Validación de *BrIHne-Jet* para un chorro de 60° vertido en un medio con corriente en la dirección y sentido del chorro ($\sigma = 0^\circ$).

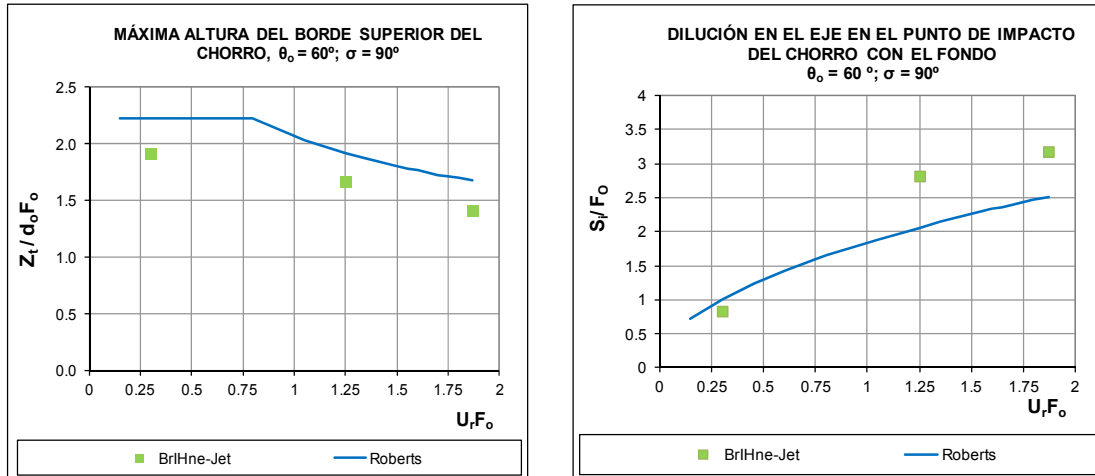


Figura 10. Validación de BrIHne-Jet para un chorro de 60° vertido en un medio receptor con una corriente perpendicular al chorro en la descarga ($\sigma = 90^\circ$).

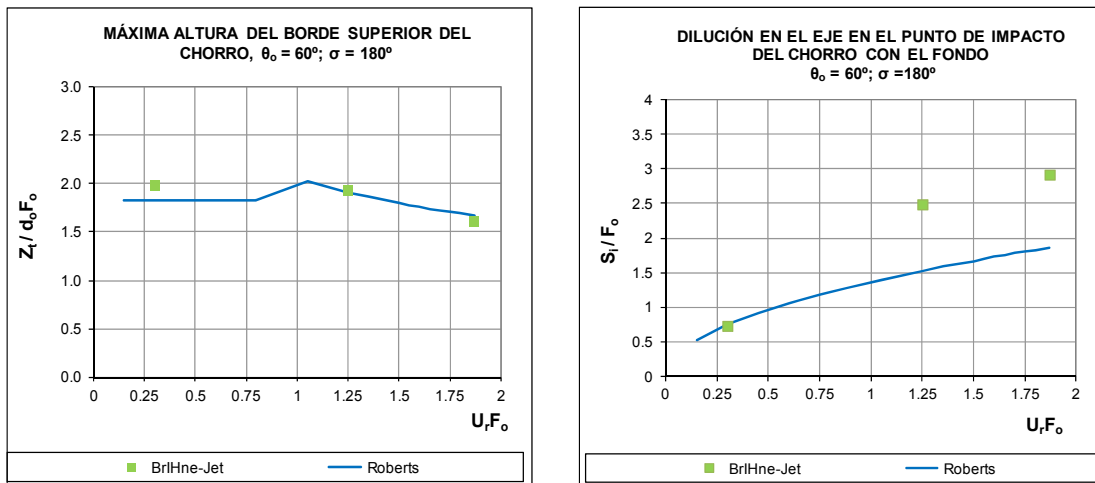


Figura 11. Validación de BrIHne-Jet para un chorro de 60° vertido en un medio receptor con una corriente de la misma dirección pero sentido opuesto al chorro en la descarga ($\sigma = 180^\circ$).

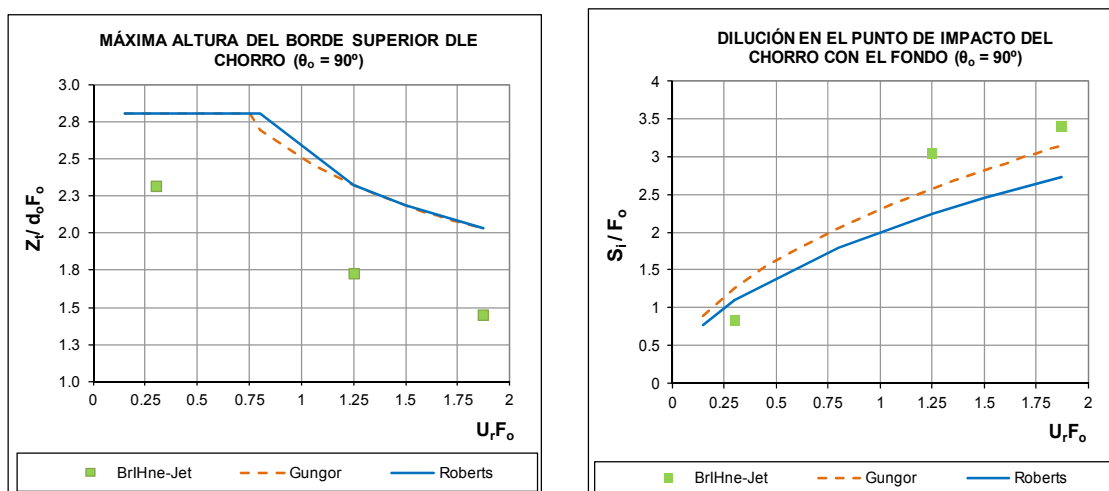


Figura 12. Validación de BrIHne-Jet para un chorro de 90° vertido en un medio con corriente.

Las Figuras 9 a 12 muestran que los resultados de brIHne-Jet siguen en general las tendencias obtenidas de los datos experimentales, disminuyendo la altura máxima alcanzada por el chorro y aumentando la dilución a mayor velocidad relativa (U_r) de la corriente respecto al chorro.

Como se observa en los gráficos, brIHne-Jet infra-estima en todos los casos la máxima altura del borde superior del chorro (Z_t) obtenida experimentalmente, siendo esta infraestimación más significativa en el caso de un chorro vertical ($\theta_o = 90^\circ$). Respecto a la dilución en el eje en el punto de impacto del chorro con el fondo (S_i), se observa que el modelo ajusta correctamente en el caso de velocidades relativas pequeñas (es decir, velocidades de chorro mucho más grandes que la velocidad de la corriente en el medio receptor). Sin embargo, para velocidades en el medio receptor iguales o superiores a las del chorro en la descarga, brIHne-Jet sobreestima el valor de la dilución respecto a lo obtenido experimentalmente. Para el caso de una corriente de la misma dirección y sentido que el chorro en la descarga, $\sigma = 0^\circ$ (Figura 10), el ajuste de la dilución es bueno para todos los valores de velocidad relativa validados.

La Tabla 3 sintetiza las desviaciones obtenidas entre los resultados de brIHne-Jet y los datos experimentales, para chorros de salmuera con inclinación en la descarga, vertidos en medio receptor estático y dinámico.

ERROR ESTIMADO DE LOS MODELOS COMERCIALES AL SIMULAR VERTIDOS EN CHORRO DE SALMUERA (↓: infravaloración; ↑: sobrevaloración)				
MEDIO RECEPTOR EN REPOSO	Variable	$\theta = 30^\circ$, inclinación del chorro	$\theta = 45^\circ$, inclinación del chorro	$\theta = 60^\circ$, inclinación del chorro
	Z_t :	~10%↓	~10%↓	~15%↓
	S_r :	~60%↓	~60%↓	~60%↓
	X_r :	~15%↓	~10%↓	~15%↓
MEDIO RECEPTOR EN MOVIMIENTO Chorro inclinado 60°	Variable	Corriente paralela al chorro y mismo sentido $\theta = 60^\circ, \sigma = 0^\circ$	Corriente paralela y de sentido opuesto al chorro $\theta = 60^\circ, \sigma = 180^\circ$	Corriente perpendicular al chorro $\theta = 60^\circ, \sigma = 90^\circ$
	Z_t :	~25%↓	10%↑ a 5%↓	~30%↓
	S_r :	15%↓ a 1%↑	2%↓ a 60%↑	25%↓ a 25%↑

Tabla 3. Síntesis de las desviaciones entre los resultados de brIHne-Jet y los datos experimentales publicados por varios autores.

9. INFORMACIÓN ADICIONAL

Junto al presente documento de especificaciones técnicas, el modelo brIHne-Jet incluye un fichero de valores realistas y recomendados para los datos de entrada al modelo, considerando valores óptimos de diseño de la configuración de la descarga y enfocado a vertidos de salmuera en el Mar Mediterráneo. Para obtener datos de clima marino en el Mediterráneo (temperatura, salinidad, corrientes) enfocados a vertidos de plantas desaladoras, se recomienda acceder y descargar el “Atlas de clima marino para vertidos de salmuera” desarrollado en el marco del proyecto MEDVSA (www.medvsa.es ; pestaña de clima marino).

El modelo brIHne-Jet ha sido programado por el Instituto de Hidráulica Ambiental, basado en la aproximación numérica y coeficientes experimentales propuestos por Jirka. (2004), análogamente al modelo CORJET de Cormix. Bajo esta aproximación, ambos modelos infravaloran ligeramente la trayectoria e infravaloran significativamente la dilución a lo largo del chorro, en relación con lo obtenido experimentalmente por diversos autores.

Próximamente, brIHne-Jet será re-calibrado con datos experimentales de precisión obtenidos en el laboratorio de IH Cantabria mediante técnicas ópticas no intrusivas de anemometría láser, a fin de obtener un mejor ajuste con los datos experimentales.

Para más información sobre el modelo: brihnesupport@ihcantabria.com.

10. REFERENCIAS

Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., Nicosia, S. (2005). “Bench-Scale Investigation of Inclined Dense Jets”. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, no 11, pp. 1017 - 1022.

Fischer, H. B., List, E. J., Imberger, J., Brooks, N. H. (1979). “Mixing in island and coastal waters”. Academic Press, N.Y.

Jirka, G. H. (2004). “Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: The single round jet”. *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 4, pp. 1 – 56.

Kikkert, G. A., Davidson, M. J., Nokes, R. I. (2007). “Inclined Negatively Buoyant Discharges”. *Journal of Hydraulic engineering*, vol. 133, pp. 545 – 554.

Palomar, P, Lara, J.L., Losada, I.J. (2012). “Near field brine discharge modeling. Part 2: Validation of commercial tools”. *Desalination*, vol. 290, pp. 28 - 42.

Papakonstantis, I. G., Papanicolau, P. N., Christodoulou, G. C. (2008). “On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets”. *Journal of Fluids Mechanics*, vol. 614, pp. 447 - 470.

Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., Papanicolau, P.N. (2011, a). “Inclined negatively buoyant jets 2: Concentration measurements”. *Journal of Hydraulics Research*, Taylor and Francis Group, vol. 49, No .1, pp. 3 - 12.

Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., Papanicolau, P.N. (2011, b). "Inclined negatively buoyant jets 1: Geometrical characteristics". *Journal of Hydraulics Research*, vol. 49, No. 1, pp. 13 - 22.

Papanicolaou, P. N., List, E. J. (1988). "Investigations of round vertical turbulent buoyant jets". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 195, pp. 341 - 391.

Pincince, A. B., List, E. J. (1973). "Disposal of brine into an estuary". *Journal of the Water Pollution Control Federation*, vol. 45, pp. 2335 - 2444.

Priestley, C. H. B., Ball (1955). "Continuous convection from an isolated source of heat". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 81, pp. 144 - 157.

Roberts, P. J. W., Toms, G. (1987). "Inclined dense jets in a flowing current". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 113, nº 3, pp. 323 - 341.

Roberts, P. J. W; Ferrier, A; Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jets". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 123, No 8, pp. 693 - 699.

Shao, D., Law, A. W. K. (2010). "Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets". *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 10, nº 5, pp. 521 - 553.

Wang, H., Law, A. W. K. (2002). "Second-order integral model for a round turbulent buoyant jet". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 459, pp. 397 - 428.