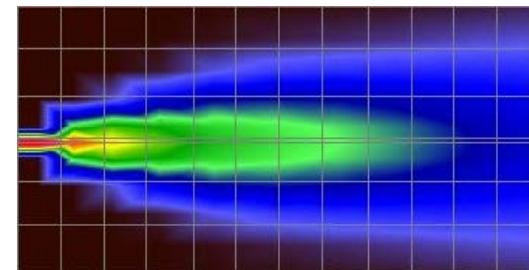
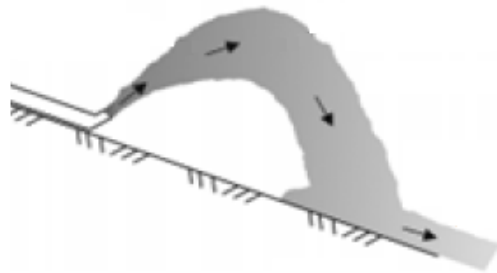


DEFENSA DEL PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL OCÉANICO

# ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA AL MAR MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS

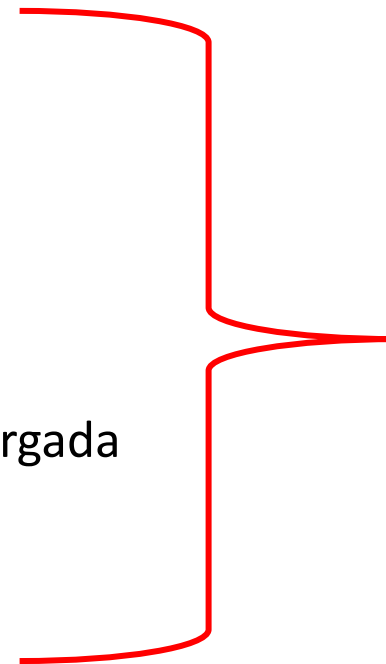


**PABLO ANTONIO FEDERICI HERNÁNDEZ**

mayo 2017

# CONTENIDOS

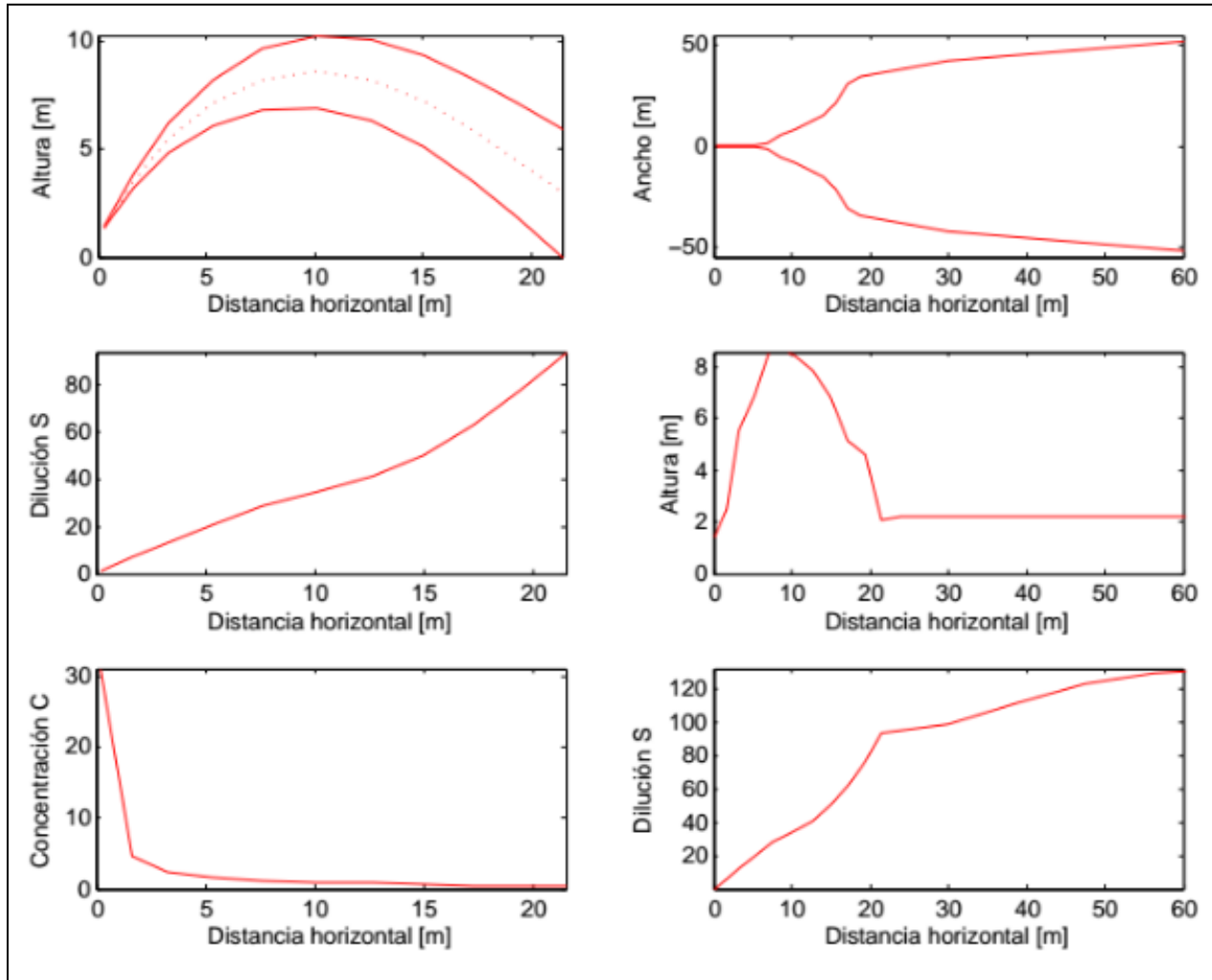
1. Introducción
2. Objetivos
3. Planta desalinizadora
4. Salmuera
5. Emisario submarino
6. Dilución
7. Normativa ambiental
8. Comportamiento de la salmuera descargada
9. Simulación de la salmuera descargada
  - Caracterización teórica del fenómeno
  - Modelación numérica CORMIX
10. Resultados
  - Caracterización teórica del fenómeno
  - Modelación numérica CORMIX
  - Análisis de sensibilidad
11. Ejemplo de aplicación
12. Conclusiones



**FUNDAMENTO  
TEÓRICO**

# INTRODUCCIÓN

Imagen 1: Resultados de una modelación numérica, CORMIX1



Fuente: Elaboración propia

# INTRODUCCIÓN

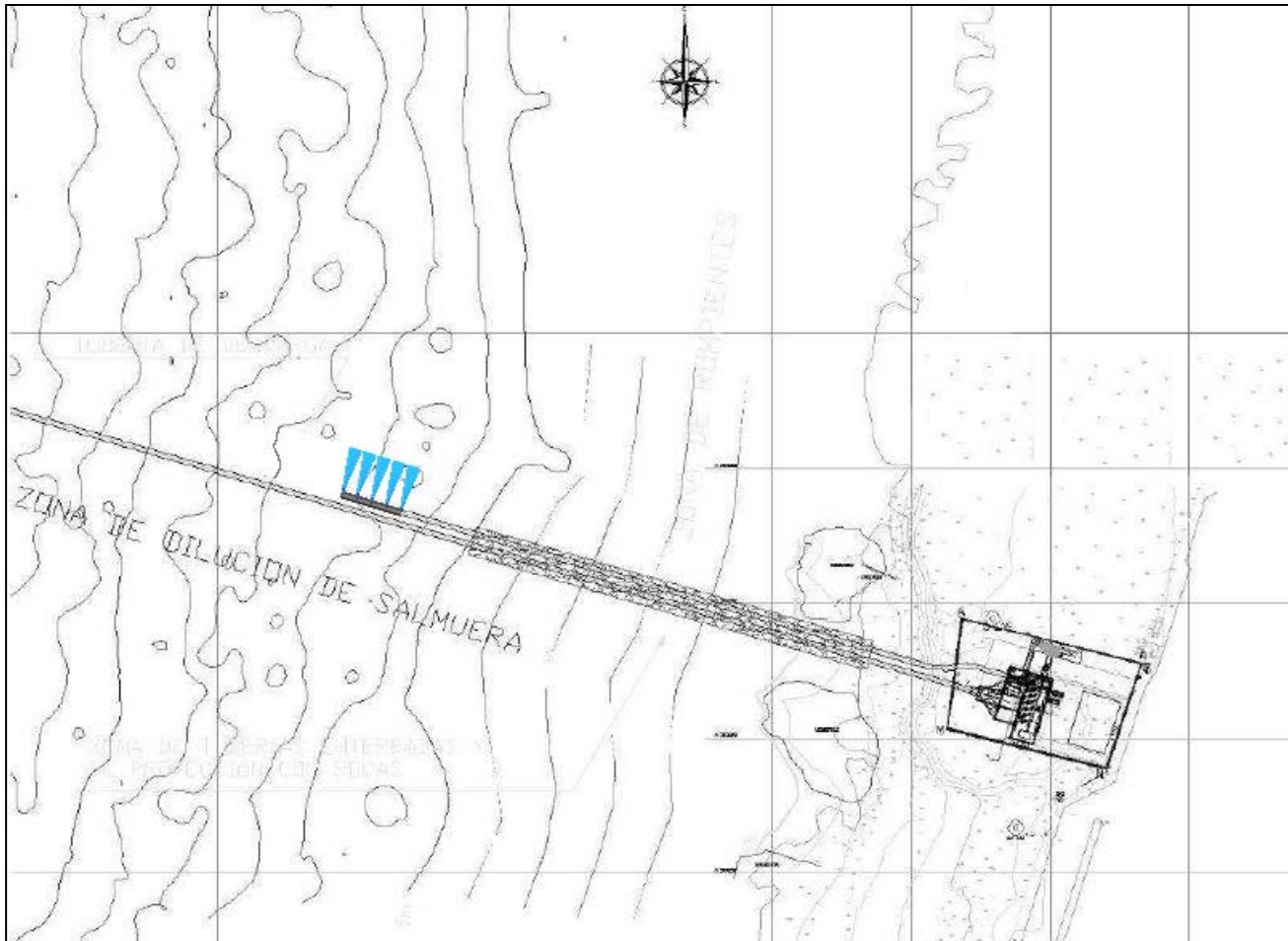
Imagen 2: Alcance de la salmuera descargada



Fuente: Elaboración propia

# INTRODUCCIÓN

Imagen 3: Alcance de la salmuera descargada, caso real



Fuente: ECOAGUA, 2011

# INTRODUCCIÓN

- Zonas de insuficiencia hídrica
- Producción de agua
- Minimizar el potencial impacto ambiental
- Limitaciones del proyecto

# OBJETIVOS

simular tanto en el campo cercano como lejano, el comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos y definir los parámetros y variables importantes que permitan reducir el potencial impacto ambiental que representan las descargas de salmuera en el medio ambiente marino.

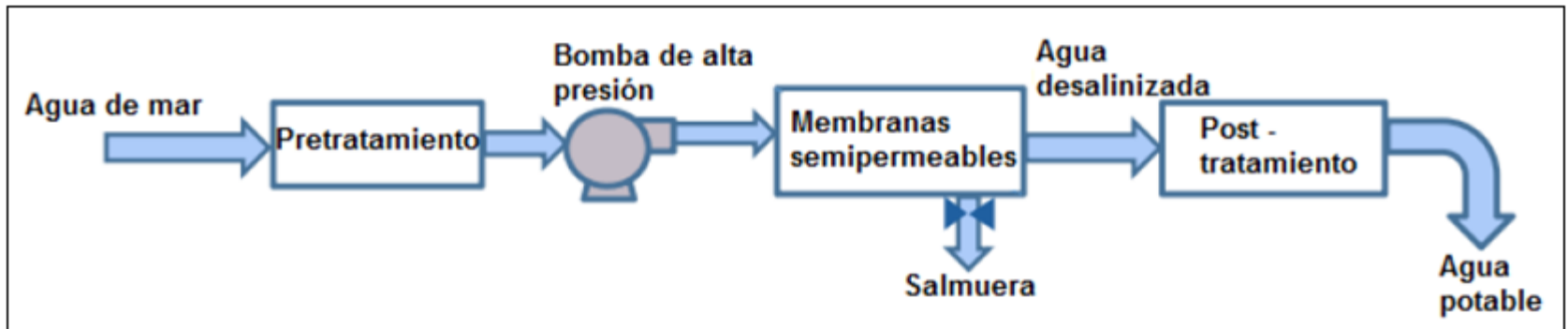
- Caracterización teórica
- Modelación numérica
- Análisis de sensibilidad
- Ejemplo de aplicación

# PLANTA DESALINIZADORA

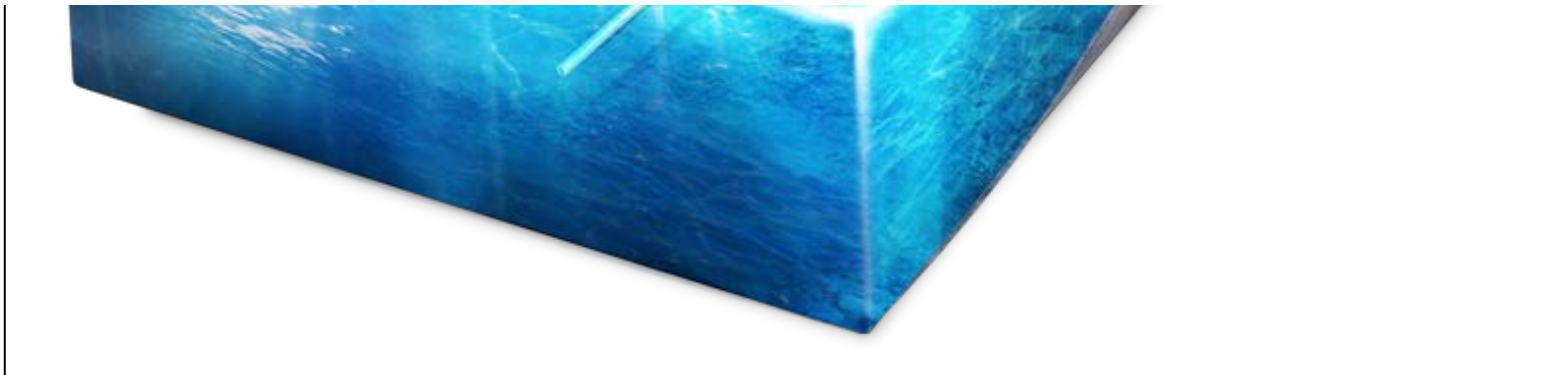
Imagen 4: Ejemplo de una planta desalinizadora ubicada en la costa



Imagen 5: Alcance de la salmuera descargada



Fuente: Elaboración propia



Fuente: LOS CARDONES, 2015



# SALMUERA

Imagen 5: Clasificación de cuerpos de agua según su salinidad

<b>SALINIDAD (g/L)</b>	<b>Tipo de agua</b>
<b>0 - 0.5</b>	<b>agua dulce</b>
<b>0.5 - 30</b>	<b>agua salobre</b>
<b>30 - 50</b>	<b>agua de mar</b>
<b>50 - 150</b>	<b>salmuera</b>
<b>&gt; 150</b>	<b>hipersalina</b>

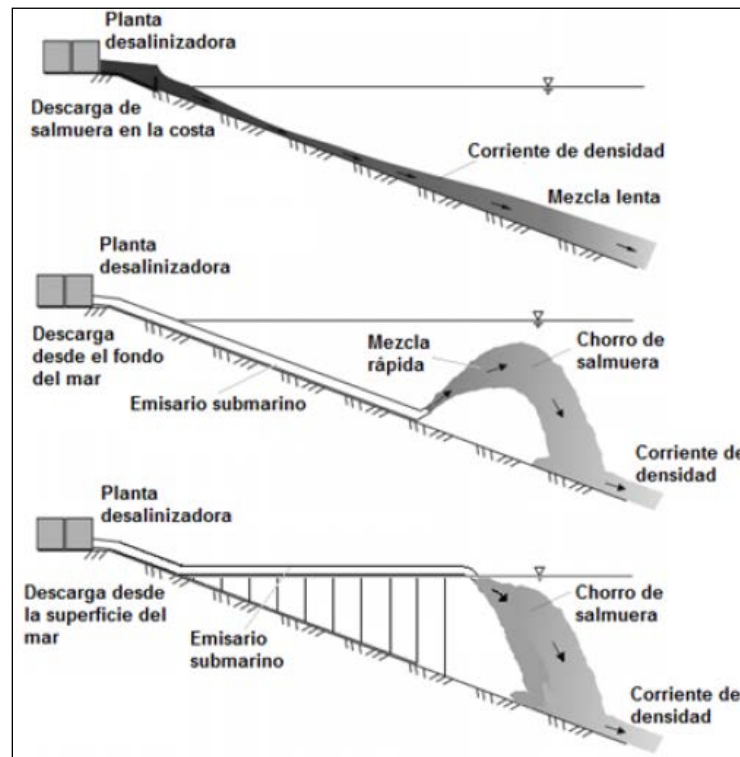
Fuente: Fuentes et al., 2002

- Anoxia en el fondo marino
- Modificación de las condiciones de luz
- Afección a especies marinas
- Afección al fondo del mar

# EMISARIOS SUBMARINOS

- Condiciones ambientales
- Características de la salmuera descargada
- Criterios económicos

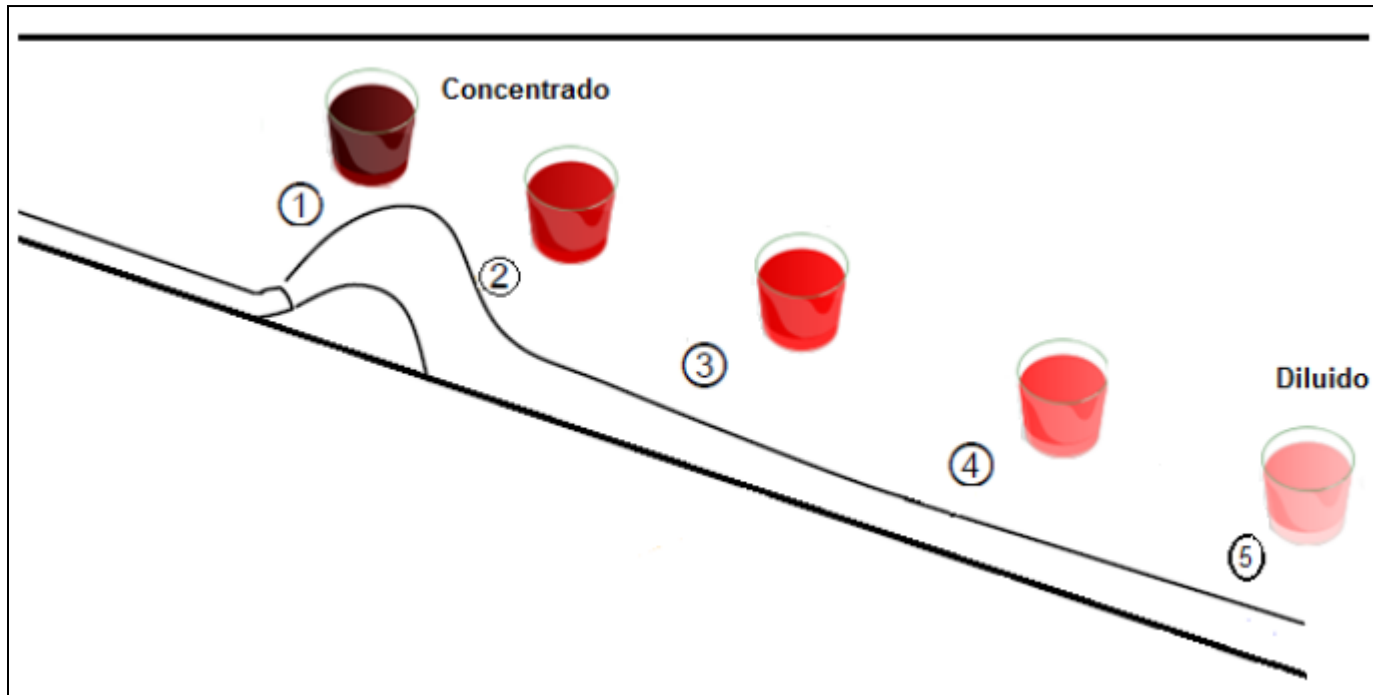
Imagen 7: Diferentes descargas de salmuera en el medio ambiente marino



Fuente: Elaboración propia

# DILUCIÓN

Imagen 8: Ejemplo de dilución y concentración



Fuente: Elaboración propia

Ec. 1

$$S = \frac{C_0 - C_A}{C - C_A} = \frac{P_0 - P_A}{P - P_A}$$

Ec. 2

$$C \equiv \frac{m_{\text{agente}}}{m_{\text{agua}}} \equiv \frac{V_{\text{agente}}}{V_{\text{agua}}}$$

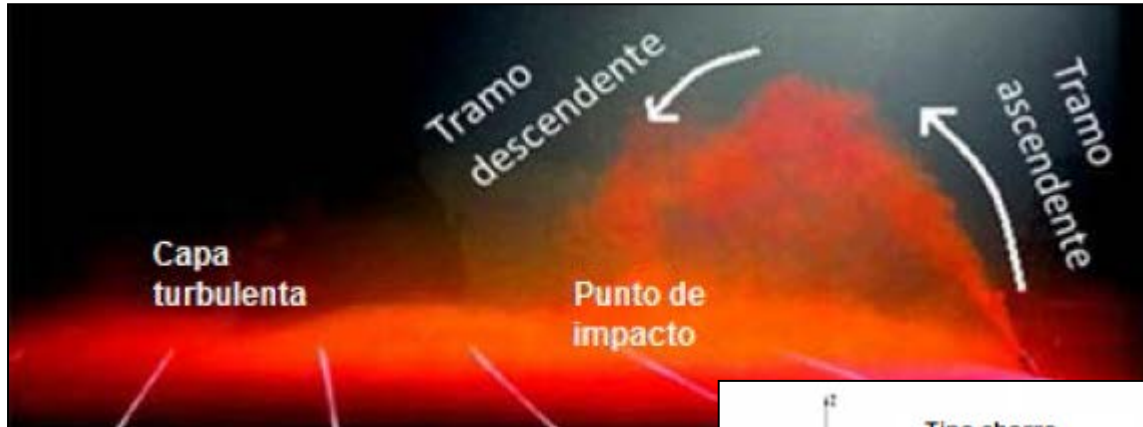
# NORMATIVA AMBIENTAL

- i. Constitución Política de la República
- ii. Ley N°2222/1978
- iii. Ley N°19300/2010
- iv. Ley N°20417/2010
- v. D.S. N°90/2000
- vi. D.S. N°40/2013
- vii. D.F.L. N° 340/1992
  - ZPL
  - Directrices para la evaluación ambiental

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO	
		Dentro ZPL	Fuera ZPL
Aceites y grasas	mg/L	20	350
Aluminio	mg/L	1	10
Arsénico	mg/L	0.2	0.5
Cadmio	mg/L	0.02	0.5
Cianuro	mg/L	0.5	1
Cobre	mg/L	1	3
Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100 ml	1000-70	x
Índice de fenol	mg/L	0.5	1
Cromo hexavalente	mg/L	0.2	0.5
Cromo total	mg/L	2.5	10
DBO5	mg O2/L	60	100
Estaño	mg/L	0.5	1
Fluoruro	mg/L	1.5	6
Fósforo	mg/L	5	10
Hidrocarburos totales	mg/L	10	20
Hidrocarburos volátiles	mg/L	1	2
Hierro disuelto	mg/L	10	15
Manganeso	mg/L	2	4
Mercurio	mg/L	0.005	0.02
Molibdeno	mg/L	0.1	0.5
Niquel	mg/L	2	4
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	50	x
PH	unidad	6,0 - 9,0	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	0.2	1
SAAM	mg/L	10	15
Selenio	mg/L	0.01	0.03
Sólidos sedimentables	m1/1/h	5	50
Sólidos suspendidos totales	mg/L	100	700
Sulfuros	mg/L	1	2
Zinc	mg/L	5	10
Temperatura	°C	30	x

# COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA

Imagen 9: Ejemplo de una descarga de salmuera



regiones en el comportamiento

Fuente: Elaboración propia

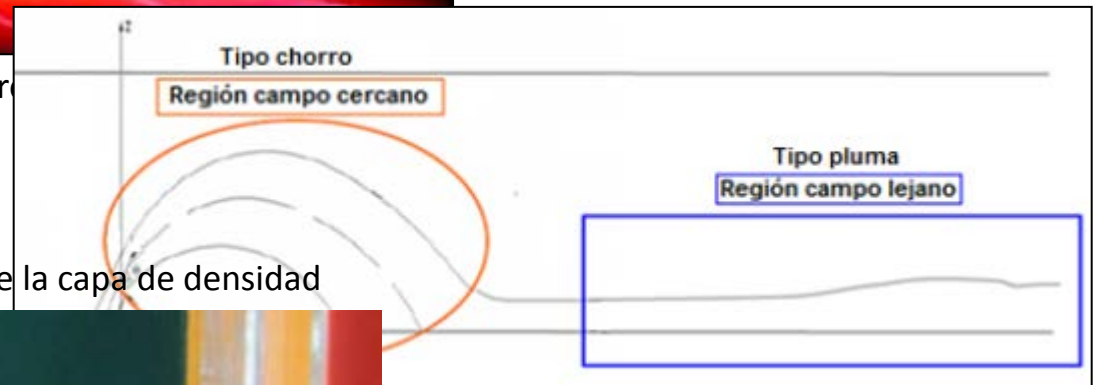


Imagen 11: Comienzo y expansión de la capa de densidad

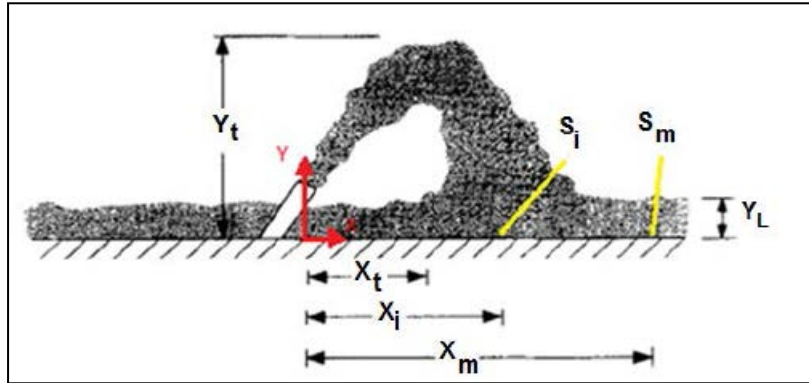


Fuente: Losada y Palomar, 2008

Fuente: Pérez et al., 2015

# CARACTERIZACIÓN TEÓRICA

Imagen 12: Ejemplo de una descarga de salmuera



Fuente: Roberts et al., 1997

Tabla 2: Expresiones para caracterización

VARIABLE	TIPOLOGÍA	ECUACIÓN NORMALIZADA	COEFICIENTE
Altura máxima alcanzada por el chorro	Ec. 6	$Y_t = DFC_1$	$C_1 = 2,2$
Distancia horizontal de la altura máxima	Ec. 7	$X_t = Y_t/tg\alpha$	-
Distancia donde impacta el chorro con el fondo	Ec. 8	$X_i = DFC_2$	$C_2 = 2,4$
Dilución en el punto de impacto	Ec. 9	$S_i = FC_3$	$C_3 = 1,6 \pm 12\%$
Dilución al final del campo cercano	Ec. 10	$S_m = FC_4$	$C_4 = 2,6 \pm 15\%$
Longitud de la capa hipersalina	Ec. 11	$X_m = DFC_5$	$C_5 = 9,0$
Espesor de la capa hipersalina	Ec. 12	$Y_L = DFC_6$	$C_6 = 0,7$

Fuente: Roberts et al., 1997

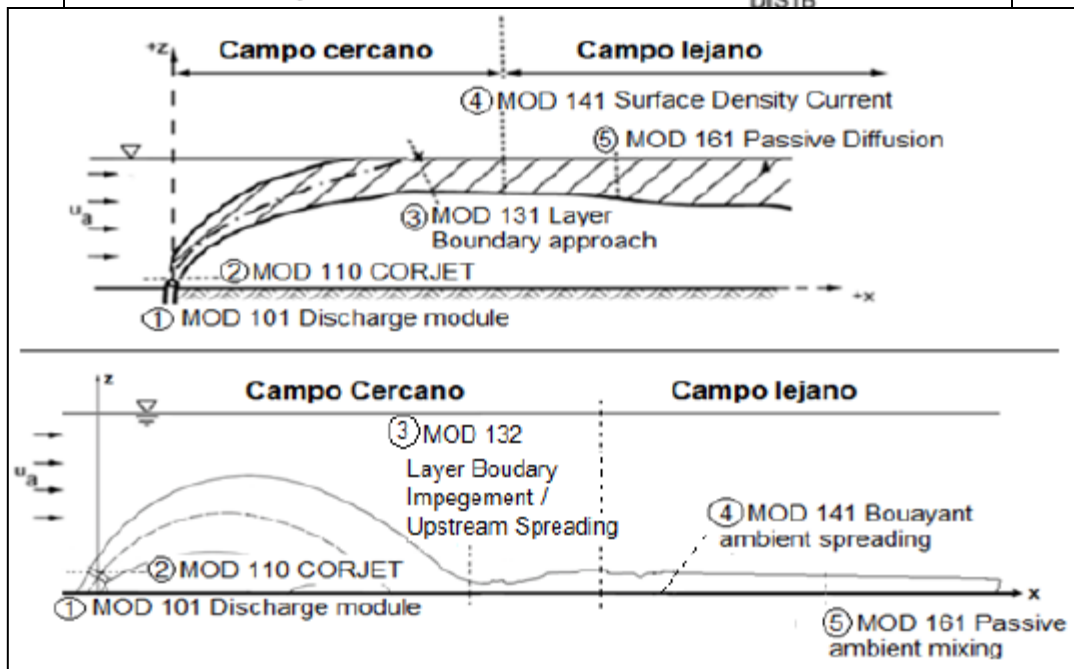
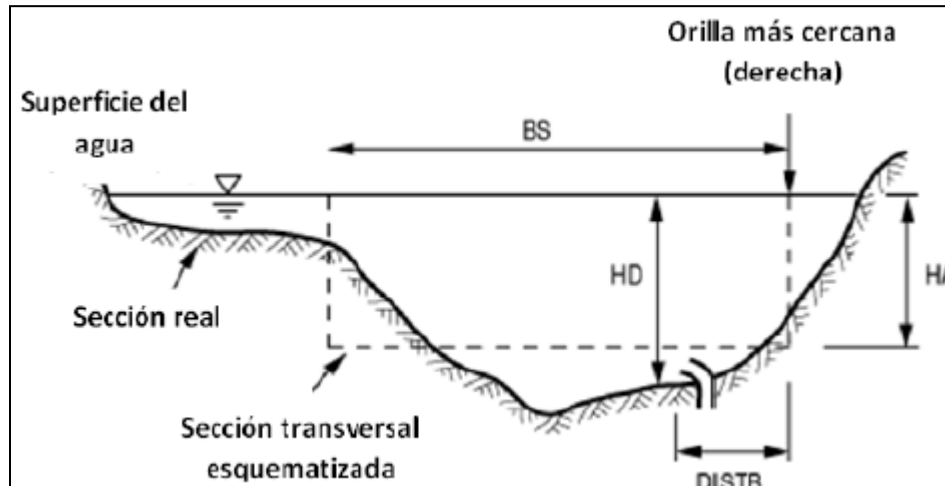
# CORMIX

Tabla 3: Modelos y subsistemas de CORMIX

<i>Campo cercano y lejano</i>	<b>Modelos basados en el análisis dimensional</b> (Escala de longitud)	<b>CORMIX 1</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido sumergido, mediante chorro individual, con emisario submarino apoyado en el fondo y cercano a la superficie (D-CORMIX) Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra.
		<b>CORMIX 2</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido sumergido, mediante tramo difusor de chorros múltiples, con emisario submarino apoyado en el fondo. Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra.
		<b>CORMIX 3</b>	Subsistema de CORMIX. Vertidos directos superficiales Flujo de flotabilidad positiva, en general. Opción de flujos de flotabilidad negativa (D-CORMIX).
		<b>D-CORMIX</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido emergido y sumergido cercano a la superficie del medio receptor—mediante CORMIX1 (flujos invertidos) Vertidos directos superficiales desde la línea de costa—mediante CORMIX3 (flujos invertidos). Flujos de flotabilidad negativa
	<b>Modelos basados en la integración numérica de ecuaciones</b>	<b>CORJET</b>	Módulo de CORMIX. Vertido sumergido mediante chorro individual o chorros múltiples, con emisario cercano al fondo. Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra Modelo euleriano tridimensional.

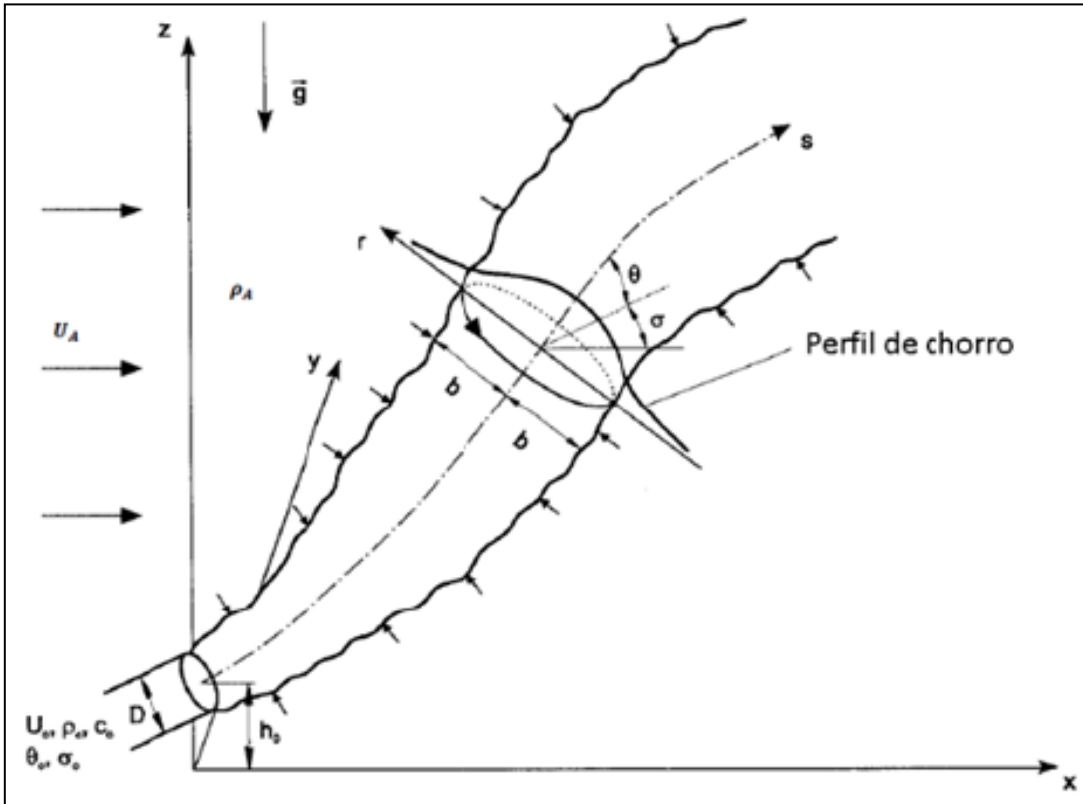
Fuente: Doneker y Jirka, 2007

# CORMIX



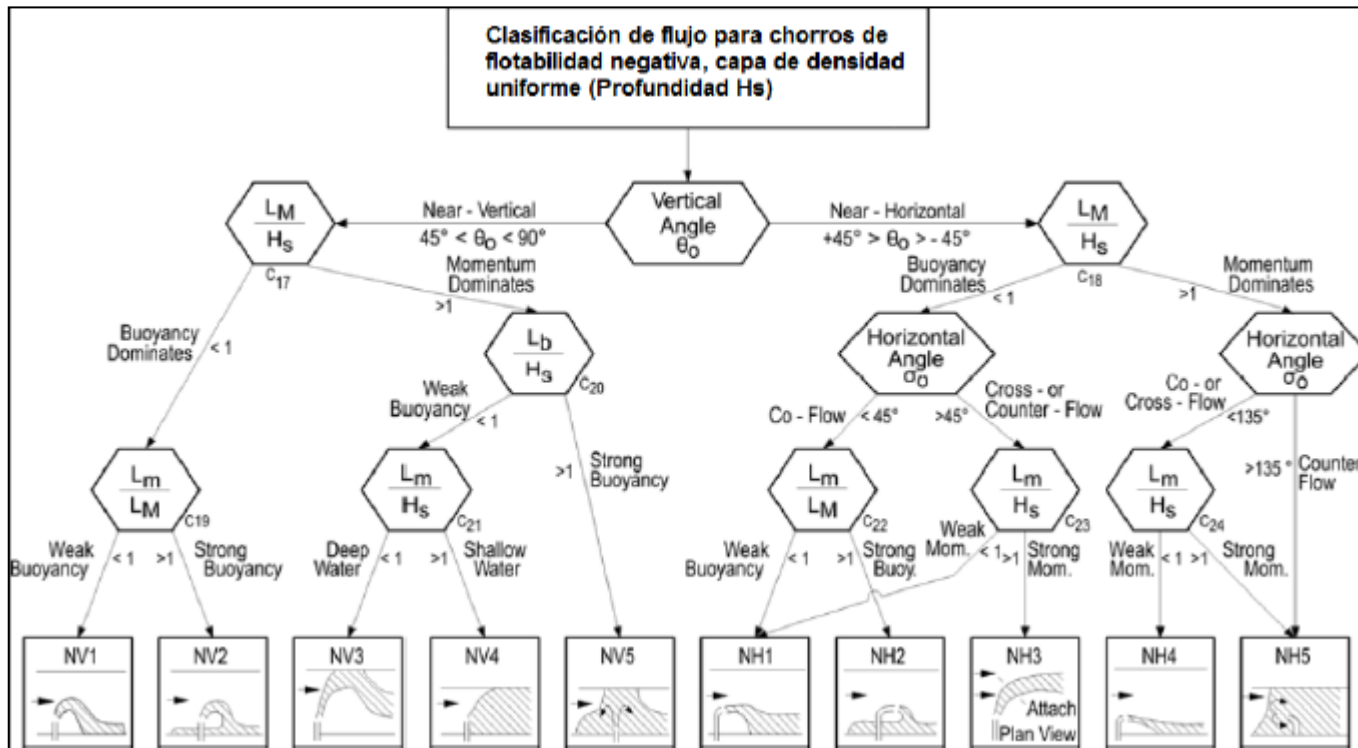
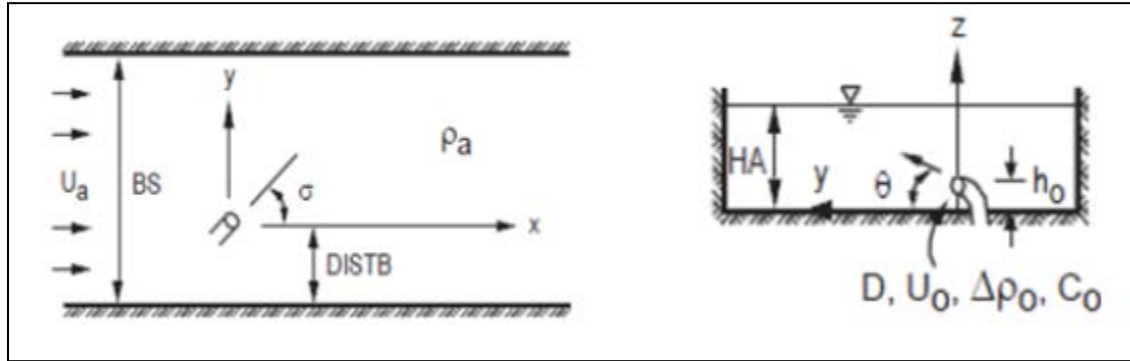


# CORJET

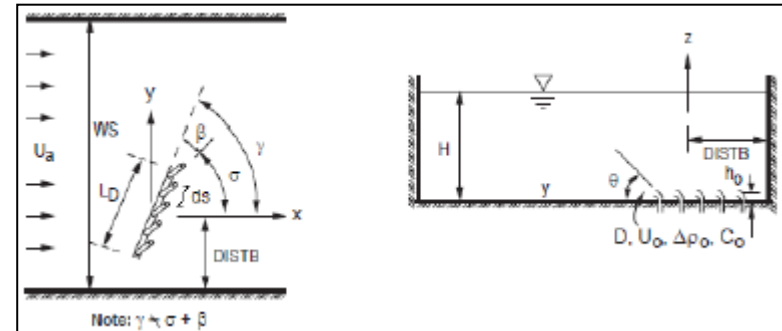
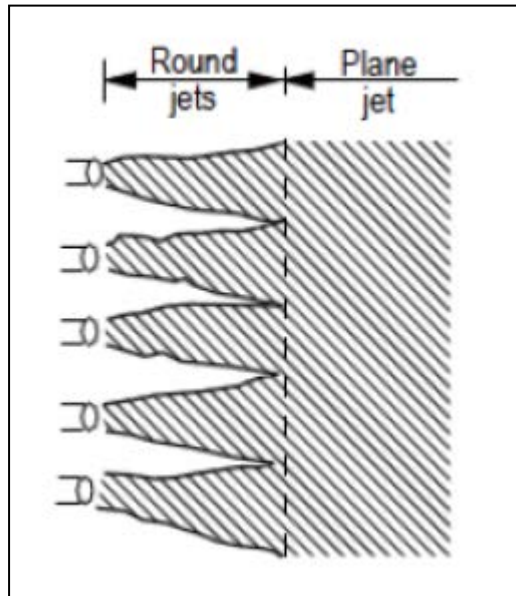


- Fuerza de intrusión actuando en la dirección del eje  $x$
- Fuerza de flotabilidad actuando en la dirección del eje  $z$
- Fuerza de arrastre actuando perpendicular al chorro

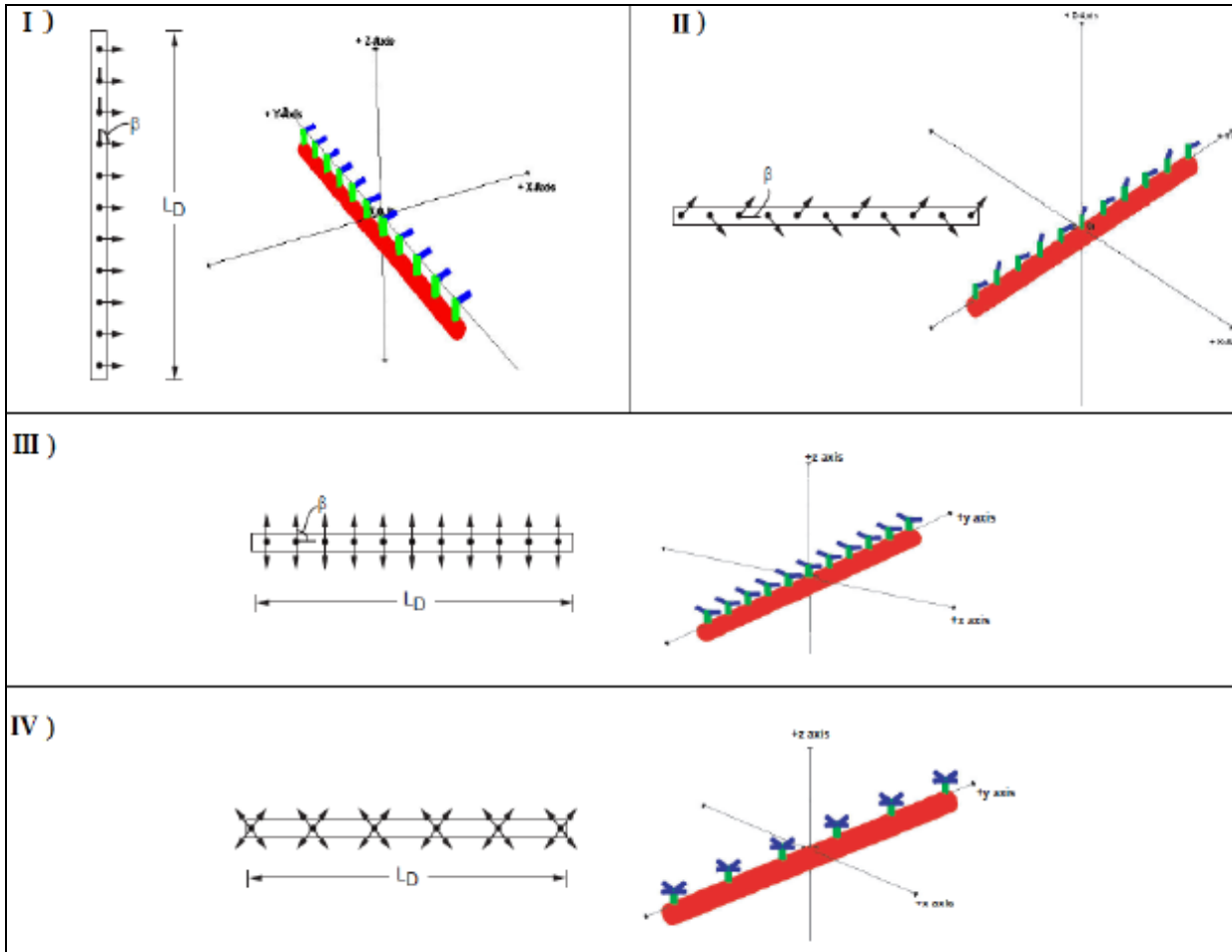
# CORMIX1



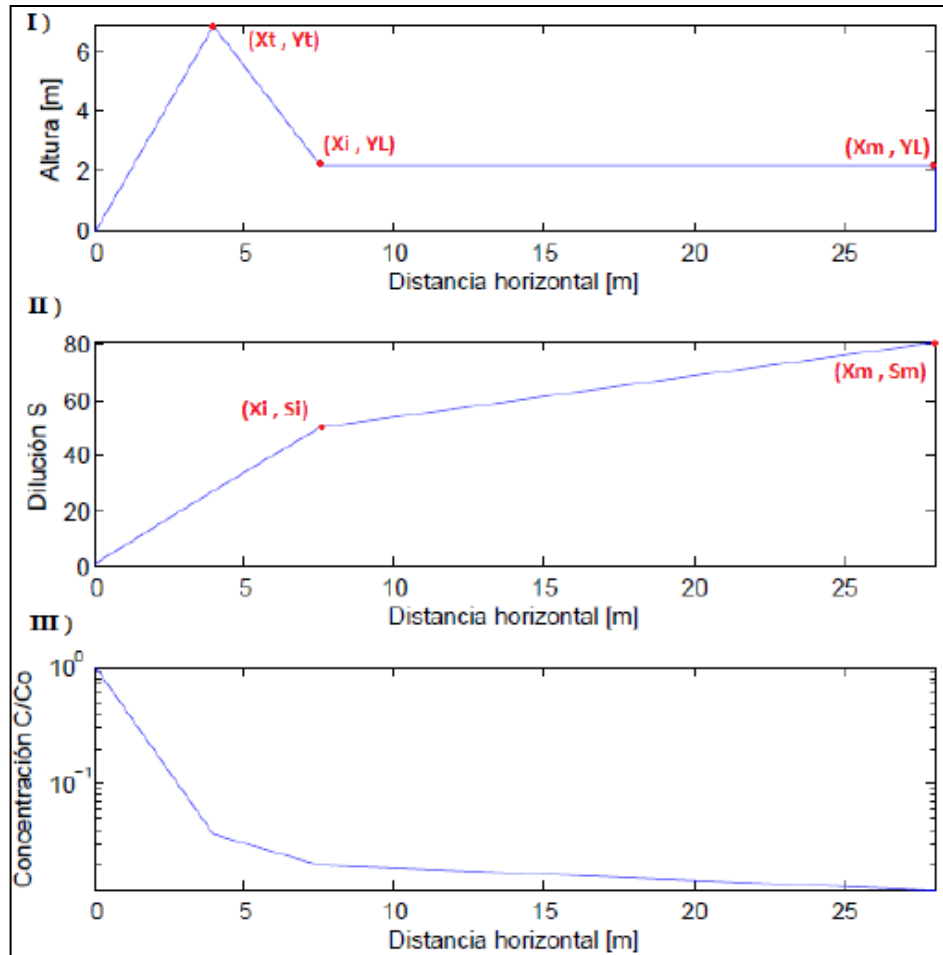
# CORMIX2



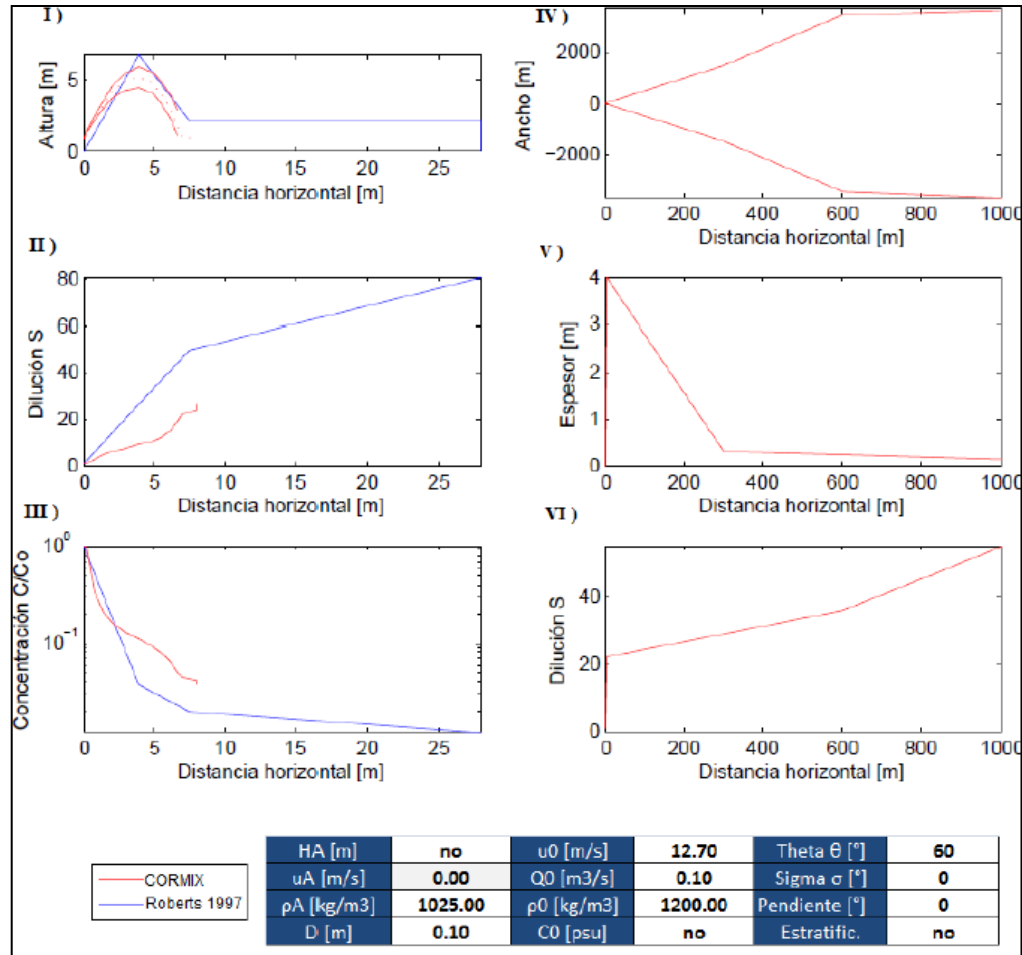
# CORMIX2



# RESULTADOS



# RESULTADOS



# RESULTADOS

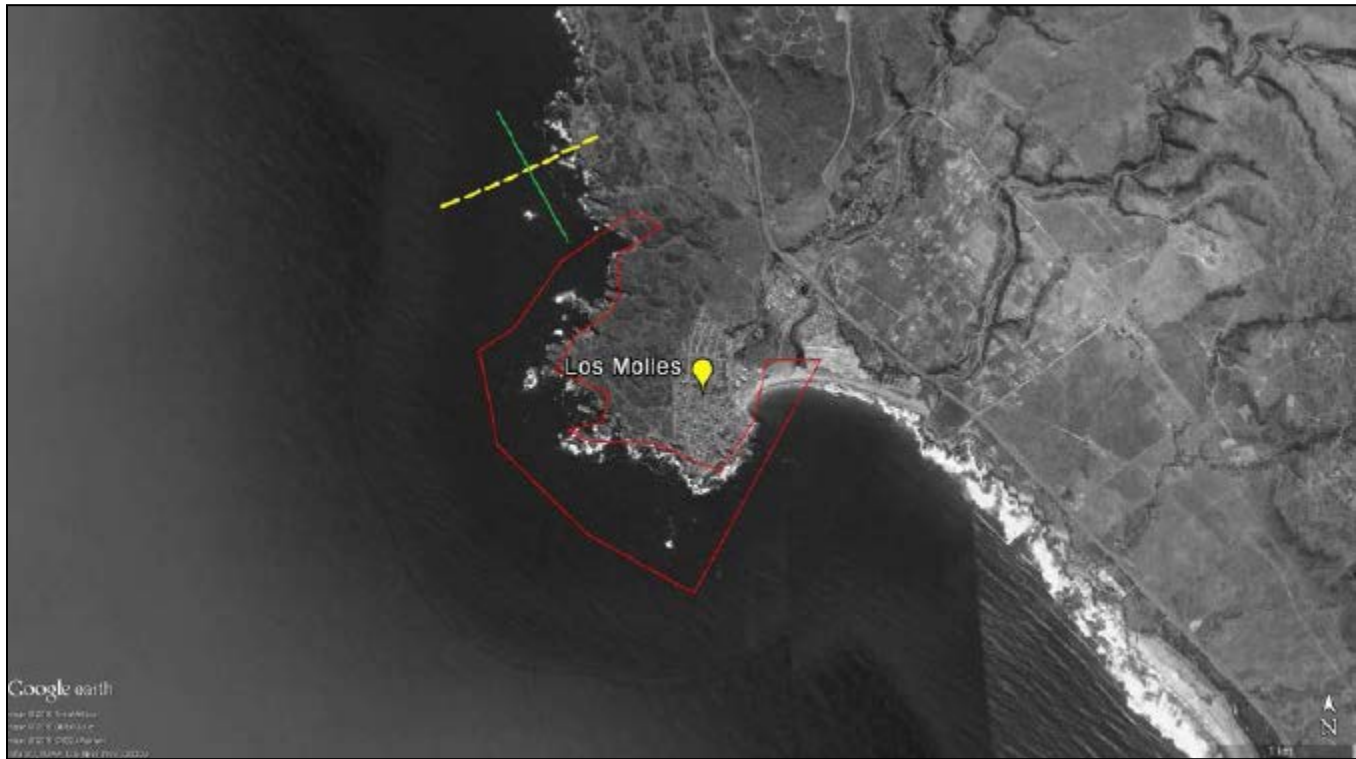
Variable modificada	Valor modificado	Parámetros de cálculo		Resultados CORMIX			% de variabilidad		
		U0 [m/s]	F	Yt [m]	Xi [m]	Sm	Yt	Xi	Sm
UA [m/s]	0.01	6.36	20.58	12.30	18.30	-	12	-21	-
UA [m/s]	0.05	6.36	20.58	11.95	19.24	30.91	9	-17	-15
UA [m/s]	0.10	6.36	20.58	11.48	21.03	32.66	4	-9	-10
UA [m/s]	0.15	6.36	20.58	11.00	23.18	36.16	0	0	0
UA [m/s]	0.20	6.36	20.58	10.50	25.40	42.25	-5	10	17
$\theta$ [°]	20	6.36	20.58	3.57	18.21	18.10	-68	-21	-50
$\theta$ [°]	40	6.36	20.58	7.35	24.07	29.10	-33	4	-20
$\theta$ [°]	50	6.36	20.58	9.50	24.31	33.20	-14	5	-8
$\theta$ [°]	60	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\theta$ [°]	80	6.36	20.58	13.82	17.09	36.70	26	-26	1
D [m]	0.20	25.46	116.00	27.00	72.37	234.00	145	212	547
D [m]	0.30	11.31	42.50	15.83	37.05	77.70	44	60	115
D [m]	0.40	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
D [m]	0.50	4.07	11.78	8.37	16.07	20.02	-24	-31	-45
$\rho_0$ [kg/m3]	1040	6.36	26.57	13.30	32.25	52.50	21	39	45
$\rho_0$ [kg/m3]	1050	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\rho_0$ [kg/m3]	1060	6.36	17.39	9.69	18.75	28.50	-12	-19	-21
$\rho_0$ [kg/m3]	1110	6.36	11.08	7.23	12.04	17.09	-34	-48	-53
$\sigma$ [°]	0	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\sigma$ [°]	90	6.36	20.58	11.88	10.59	33.90	8	-54	-6
$\sigma$ [°]	180	6.36	20.58	11.47	-7.42	22.30	4	-132	-38
$\sigma$ [°]	270	6.36	20.58	11.88	10.59	33.90	8	-54	-6
Estrat.	No	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
Estrat.	Tipo A	6.36	20.58	10.97	21.98	24.66	0	-5	-32
Estrat.	Tipo B	6.36	20.58	11.98	26.70	33.61	9	15	-7
Estrat.	Tipo C	6.36	20.58	11.56	24.43	26.77	5	5	-26
$\alpha$ [°]	0	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\alpha$ [°]	2.86	6.36	20.58	11.00	23.18	38.50	0	0	6
$\alpha$ [°]	5.71	6.36	20.58	11.00	23.18	38.10	0	0	5
$\alpha$ [°]	11.30	6.36	20.58	11.00	23.18	38.30	0	0	6

# RESULTADOS

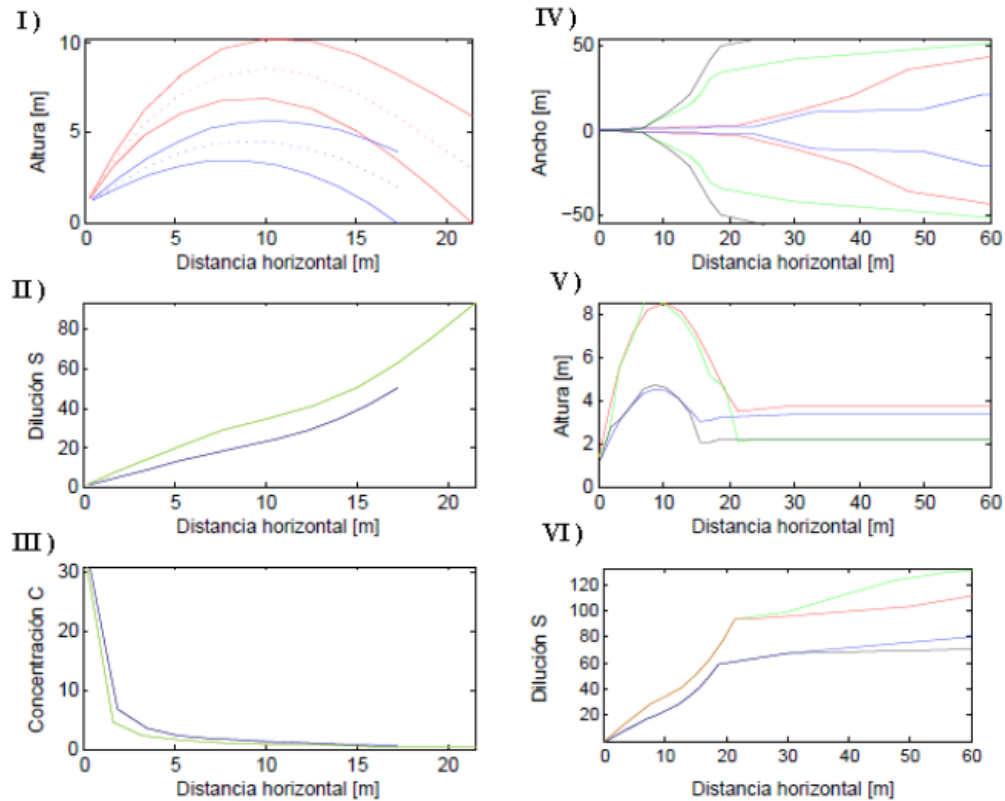
Variable modificada	Valor modificado	Parámetros de cálculo		Resultados CORMIX			% de variabilidad		
		U0	F	Yt [m]	Xi [m]	Sm	Yt	Xi	Sm
UA [m/s]	0.01	9.05	47.8	10.59	15.93	-	20	-35	-
UA [m/s]	0.10	9.05	47.8	9.47	20.96	73.5	7	-14	-21
UA [m/s]	0.15	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
UA [m/s]	0.20	9.05	47.8	8.17	27.83	108.9	-7	14	17
UA [m/s]	0.30	9.05	47.8	7.28	34.71	130.4	-17	43	40
$\theta$ [°]	20	9.05	47.8	3.08	17.69	40.5	-65	-27	-56
$\theta$ [°]	40	9.05	47.8	6.07	23.39	69.8	-31	-4	-25
$\theta$ [°]	60	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
$\theta$ [°]	80	9.05	47.8	11.78	18.7	103.7	34	-23	12
D [m]	0.09	25.15	117.4	16.58	57.29	361.7	88	135	289
D [m]	0.10	20.37	131.7	14.52	47.93	273.0	65	97	194
D [m]	0.15	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
D [m]	0.20	5.09	23.3	6.27	15.18	43.7	-29	-38	-53
D [m]	0.25	3.29	13.3	4.91	10.55	24.7	-44	-57	-73
$\sigma$ [°]	0	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
$\sigma$ [°]	90	9.05	47.8	10.16	13.06	98.6	15	-46	6
$\sigma$ [°]	180	-	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma$ [°]	270	9.05	47.8	10.16	13.06	98.6	15	-46	6
N [un]	1	9.05	47.8	11.00	23.18	36.1	25	-5	-61
N [un]	3	9.05	47.8	10.14	26.00	74.6	15	7	-20
N [un]	4	9.05	47.8	9.39	25.12	84.8	7	3	-9
N [un]	5	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
N [un]	6	9.05	47.8	8.37	23.77	100.2	-5	-2	8
N [un]	7	9.05	47.8	8.04	23.18	107.6	-9	-5	16
Config. Boq.	A	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
Config. Boq.	B	9.05	47.8	10.77	16.24	84.8	22	-33	-9
Config. Boq.	C	9.05	47.8	10.18	26.15	75.3	16	7	-19
Config. Boq.	D	9.05	47.8	10.18	26.15	75.3	16	7	-19
Config. Boq.	E	9.05	47.8	12.49	15.89	65.1	42	-35	-30



# EJEMPLO DE APLICACIÓN



# EJEMPLO DE APLICACIÓN



—	fondo plano: 25 [m]
—	fondo plano: 8 [m]
—	con pendiente: 25 [m]
—	con pendiente: 8 [m]

HA [m]	8 ; 25	u0 [m/s]	9.09 ; 11.22	Theta θ [°]	35 ; 60
uA [m/s]	0.10	Q0 [m3/s]	0.50	Gamma γ [°]	90
ρA [kg/m3]	1022	ρ0 [kg/m3]	1048.50	Sigma σ [°]	0
D [m]	0.09 ; 0.10	C0 [psu]	30.50	α [°]	0 ; 2.35
LD [m]	100	N [un]	7	ds [m]	16.67

# EJEMPLO DE APLICACIÓN



# CONCLUSIONES

- Comparación de resultados
- Descripción teórica
- Modelación numérica CORMIX
- Análisis de sensibilidad
- Descargas más eficientes
- Comportamiento de la salmuera descargada
- Parámetros y variables importantes
- Normativa ambiental

Gracias por su atención