



CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS DE DILUCIÓN EN RÍOS

RODRIGO CARO Y FELIPE DIBARRART
Especialidad de Obras Hidráulicas CADE-IDEPE
Av. José Domingo Cañas 2640. Casilla 14174 Correo 21, Santiago, Chile.
Teléfono: (56-2)640-6600; Fax: (56-2)274-5315
e-mail: rcaro@cadeidepe.cl ; f.dibarrart@vtr.net

RESUMEN

Se presentan criterios técnicos asociados a la determinación de Zonas de Dilución (ZD) en ríos. Se incluye una revisión de los principales mecanismos que controlan la mezcla, tanto en la zona Zona de Dilución Inicial (ZDI) como en la Zona de Dilución lejana (ZDL), enfatizándose la importancia de potenciar la mezcla en la ZDI para el diseño de descargas de efluentes. Se mencionan además distintos tipos de descarga, resaltándose el uso de difusores de boquillas múltiples. Una revisión de criterios generales y geométricos de algunos países que tienen normativa respecto a las ZD es también presentado. Adicionalmente se especifica la normativa que deben cumplir las descargas en el caso chileno, siendo la Dirección General de Aguas la autoridad competente. Respecto a las consideraciones hidrológicas, se dan a conocer los criterios de cálculo más aceptados, siendo el $7Q_{10}$ en el extranjero la condición de bajo caudal más aceptada en el análisis de una ZD y el caudal ecológico en el caso chileno. Finalmente, se comentan distintas estrategias en la modelación de una ZD y se presentan algunos modelos computacionales asociados, con sus respectivas ventajas y desventajas, siendo el modelo desarrollado por la U. de Cornell, CORMIX, uno de los más utilizados.

ABSTRACT

Technical criteria related to the determination of Mixing Zones are presented in this document. A review of the main mechanisms controlling the mixing process, in both the near-field and far-field zones, is also included, emphasizing the enhancement of the initial dilution as a key factor in an outfall design. Different types of outfalls are mentioned as well, stressing the importance of multiport submerged diffusers. A review of general and geometric criteria from countries with regulations currently in force is also presented. Chilean regulations are discussed, being the Dirección General de Aguas the competent authority. As to hydrological aspects, the ten-year low-flow condition ($7Q_{10}$) and the ecological flow are mentioned as the most typical flow-rates used in Mixing Zone analysis. Finally, different strategies related to Mixing Zone modeling are commented, mentioning software that can be used to predict dilution rates. Advantages and drawbacks linked to different models are reviewed, being University of Cornell's CORMIX one of the most known and used models in Mixing Zone Analysis.



DETERMINACIÓN DE ZONAS DE DILUCIÓN EN RÍOS

1 Introducción: El concepto de Zona de Dilución

La zona de dilución o mezcla (ZD) se define como un volumen, área o zona específico(a) de un cuerpo de agua en el(la) cual se produce la dilución de uno o más compuestos provenientes de descargas de residuos líquidos, donde pueden excederse los estándares de calidad de agua, siempre y cuando no se alcance un grado de contaminación que sea tóxico o letal. En general, dentro de una ZD pueden distinguirse dos sub-zonas, en las cuales los factores de mayor incidencia en el proceso de mezcla son distintos. Estas sub-zonas son la Zona de Dilución Inicial y la Zona de Dilución Lejana.

2 Proceso hidrodinámico de mezcla

En proyectos de ingeniería de diseño y en estudios predictivos de descarga de efluentes, es importante distinguir claramente entre los aspectos físicos del proceso hidrodinámico de mezcla que determina la distribución y ruta del efluente y las regulaciones de la zona de dilución que intentan prevenir cualquier impacto perjudicial del efluente en la vida acuática y en los usos del agua.

En el proceso de dilución del efluente que es descargado a un río, se distinguen dos zonas: la Zona de Dilución Inicial (ZDI) y Zona de Dilución Lejana (ZDL).

2.1 Zona de Dilución Inicial (ZDI)

En la ZDI los factores de mayor influencia en el proceso de mezcla son las características propias de la descarga y la altura local de escurrimiento del río. El caudal y velocidad de la descarga, representados por su momentum, tendrán una mayor incidencia en el proceso de dilución que la distribución de velocidades y turbulencia propia del escurrimiento, produciéndose de esta manera una dilución rápida a los pocos metros aguas abajo de la descarga. Lo anterior es válido para descargas mediante dispositivos que confieran al efluente velocidades superiores a los 2,5 - 3 m/s. Velocidades menores de descarga implican un menor momentum del efluente, de modo



que la turbulencia y distribución de velocidades en el río sí serán un factor preponderante en la zona inmediata a la descarga.

Dentro de la ZDI se define usualmente una Zona de Dilución Tóxica (ZDT), en la cual se alcanzan concentraciones contaminantes tóxicas o letales justo en el lugar donde se produce la descarga. Para el caso de un difusor de efluentes, esta zona se ubicaría exactamente a la salida de las boquillas. La ZDT debe confinarse a unos pocos metros, de manera que no hayan especies acuáticas que queden expuestas por un tiempo excesivo a estas altas concentraciones efluentes. El criterio establecido por la USEPA respecto de esta zona considera que ésta debe confinarse al mínimo de las tres longitudes siguientes: a) 10% de la longitud total de la zona de dilución aprobada; b) 50 veces la raíz cuadrada de la sección transversal de cualquier descarga; 3) 5 veces la altura de agua local.

2.2 Zona de Dilución Lejana (ZDL)

En la ZDL predominan las condiciones del cuerpo receptor, como son la distribución de velocidades, turbulencia propia del flujo y distribución de densidad o temperatura en la vertical. A diferencia de la ZDI, en esta zona el proyectista no puede modificar significativamente el proceso de mezcla. En la Tabla 1 se presenta una comparación de los aspectos más relevantes relativos a la ZDI y la ZDL.

Tabla 1. Zona de Dilución Inicial v/s Zona de Dilución Lejana

	ZDI	ZDL
Factores de mayor incidencia en la mezcla	momentum de la descarga altura local de escurrimiento	distribuciones de velocidad y temperatura; turbulencia
Orden de magnitud de longitud del proceso aguas abajo de la descarga (m)	decenas de metros	de centenas de metros a kilómetros
Incidencia del proyectista en la dilución	alta (se puede modificar velocidad o ubicación de la descarga)	baja o nula

2.3 Condiciones hidráulicas del cuerpo receptor

Dentro de las variables que permiten predecir el proceso de mezcla de un efluente están las condiciones hidráulicas del río, caracterizadas por el caudal, altura,



velocidad y tipo de régimen de escurrimiento. Todas ellas están interrelacionadas entre sí, siendo el caudal la variable fundamental que condiciona el resto.

Siendo el caudal una variable aleatoria con fuertes variaciones durante el año y entre diferentes años hidrológicos, el cálculo hidrodinámico del proceso de mezcla requiere la consideración de diferentes escenarios según varía el caudal del río.

Las instalaciones para el tratamiento de efluentes son típicamente diseñadas para cumplir los objetivos de calidad de agua para caudales tan bajos como el correspondiente al caudal medio mínimo en un período de 7 días consecutivos que ocurre una vez en 2 años o en 10 años ($7Q_{10}$) y para caudales tan altos como el caudal medio diario de una crecida con período de retorno 10 años. El tiempo entre ocasiones en que los objetivos de calidad de agua son excedidos será mayor que 2 ó 10 años porque la probabilidad conjunta de máxima descarga y mínimo caudal es menor.

Condiciones más estrictas de diseño pueden requerirse para proveer protección adicional a la calidad de agua en cuerpos de agua de gran valor.

Stephan et al, (1985) aboga porque los objetivos de calidad ambiental no sean excedidos más que una vez cada tres años, en promedio. De otra manera, las comunidades de vida acuática estarían continuamente en un estado de recuperación.

La EPA ha desarrollado un método que considera una frecuencia de excedencia de 3 años (Rossman, 1990). La EPA aún permite el uso del $7Q_{10}$ como caudal de diseño aunque éste es normalmente un 10% superior que el caudal de diseño calculado utilizando el método biológico (US EPA, 1994). El Depto. de Conservación de Manitoba también propone continuar usando el $7Q_{10}$, pero promueve el cambio al método de excedencia biológica cada tres años.

3 Criterios para la Regulación y Definición de una Zona de Dilución

Los criterios asociados a la regulación y definición de una zona de dilución pueden agruparse en 2 categorías: criterios generales y criterios geométricos.



3.1 Criterios Generales en la Regulación de una Zona de Dilución

Existe consenso internacional respecto que una ZD no puede provocar, entre otros efectos adversos, los siguientes:

- toxicidad aguda para la vida acuática, dificultad para el paso de los organismos acuáticos alrededor de ella o bioacumulación de agentes tóxicos
- vida acuática indeseable o dominio de especies molestas fuera de la ZD
- riesgo para la salud y el bienestar público o problemas en áreas de desove
- condición de toxicidad crónica fuera de la ZD
- riesgos sobre una toma de agua potable o zona bajo protección oficial
- condiciones ofensivas: material flotante, concentraciones objetables de turbiedad, color y olor, formación de espuma, acumulación de sedimentos.

3.2 Criterios Geométricos para la definición de una ZD

Principalmente en U.S.A. y Canadá, se establecen criterios geométricos para la definición de las Zonas de Dilución, sin embargo, éstos se toman como referenciales, ya que un análisis caso a caso será necesario. En la Tabla 2 se presenta un resumen con algunos criterios de países que poseen una regulación pertinente.

Tabla 2 Criterios Geométricos Internacionales en la definición de una ZD

País, Continente, Región	Dimensiones máximas zona dilución	Observación
U.S.A	- 25% - 33% sección transversal escurrimiento (depende del Estado) - longitud inferior a 5 veces el ancho de escurrimiento (Estado de Virginia)	Es el país que define en forma más explícita las dimensiones máximas de la zona de mezcla, dependiendo del Estado
Canadá	- 25% sec. transv. escurrimiento (Manitoba) - 50% sec. transv. escurrimiento (Alberta) - Longitud inferior a 10 anchos de escurrimiento (Alberta)	Fundamentalmente basado en la US EPA, sin embargo especifica muy claramente que las dimensiones máximas son sólo referenciales
Reino Unido	- Longitud inferior a 20-100 anchos de escurrimiento - Concentraciones exigidas para la diluc. inicial	Énfasis en la diluc. inicial como principal mecanismo de mezcla y fija concentraciones máximas para dicho proceso
Hong Kong	No recomienda, dando énfasis al análisis caso a caso	La Water Pollution Control Ordinance sólo da criterios generales cualitativos
Nueva Zelanda	No recomienda	Riesgo que las dimensiones máx. sean utilizadas indiscriminadamente



3.3 Criterios Técnicos para la Definición de Descargas de Efluentes

En el caso chileno la normativa que deben cumplir las descargas está regulada por el DS 90, de manera tal que la ZD no reemplaza el tratamiento de los efluentes. De esta manera, una ZD no puede ser definida o aceptada como una alternativa a un proceso de tratamiento razonable. Según dicho decreto, los valores de las concentraciones máximas permitidas a ser descargadas dependen de la calidad de captación, calidad natural, cuerpo de agua receptor de la descarga y capacidad de dilución del cuerpo receptor. La Dirección General de Aguas (DGA), como organismo competente sobre los recursos hídricos continentales, es la responsable, en el caso que la descarga se realice a cuerpos de aguas superficiales continentales, de la determinación de la calidad de captación, la calidad natural y la capacidad de dilución del cuerpo receptor. Será la DGA entonces, el organismo competente en cuanto a la autorización o rechazo de una ZD para cada caso en particular.

En el caso que la DGA autorice el establecimiento de una ZD, el interesado deberá cumplir con la exigencia de la DGA respecto a las dimensiones de la ZD. Para ello, se aconseja que el interesado enfoque sus esfuerzos en lograr una buena dilución inicial, debido a que la estimación de la dilución en la zona cercana a la descarga tiene un grado de incertidumbre menor que el análisis de la dilución en la zona lejana.

4 Predicción de la Zona de Mezcla en Ríos

La modelación de una zona de dilución es un proceso complejo, en el cual errores de entre un 25 a un 50% en las predicciones no pueden considerarse como inusuales (Fischer et al., 1979). Muchas veces, la mejor forma de enfrentar el problema es utilizar procedimientos combinados (Doneker et al., 2002), es decir, considerando en forma separada las distintas sub-zonas que existen dentro de una ZD. Si bien existen numerosos fenómenos, tales como advección, convección, difusión y dispersión, la estrategia consistente en separar el problema en dos grandes zonas, la ZDI y la ZDL, parece tener una amplia aceptación.



4.1 Zona de Dilución Inicial

En la ZDI prevalecen el momentum de la descarga y la altura local de escurrimiento como los factores de mayor incidencia en la mezcla. Lo anterior es válido si la velocidad y caudal de descarga conforman un momentum suficiente para que las características de turbulencia y velocidad del río tengan un impacto relativo menor.

En términos analíticos, definiendo Q_0 , M_0 y J_0 como el caudal de descarga [L^3/T], el momentum de descarga específico inicial [L^4/T^2] y el flujo de flotabilidad inicial [L^4/T^3] respectivamente, se tiene entonces, para una descarga de sección circular:

$$Q_0 = u_0 \Omega \quad (1)$$

$$M_0 = Q_0 u_0 \quad (2)$$

$$J_0 = g Q_0 (\rho_a - \rho_0) / \rho_a \quad (3)$$

donde u_0 es la velocidad de descarga y ρ_a , ρ_0 son las densidades del cuerpo receptor y del efluente respectivamente. A partir de las ecuaciones (1), (2) y (3) puede emplearse una técnica denominada de “escalas de longitud”, la cual permite tener un orden de magnitud de las diferentes distancias en que distintos fenómenos prevalecen sobre otros. De esta manera puede estimarse el tamaño y comportamiento de la ZDI antes de que la mezcla sea finalmente controlada por la turbulencia propia del río (ZDL). De esta forma se definen las siguientes variables, todas de dimensión [L], las cuales se resumen en la Tabla 3 y en donde ε es el gradiente de flotabilidad ($\varepsilon = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_a}{dz}$).

- escala de longitud de la descarga L_Q :
$$L_Q = Q_0 / M_0^{1/2} \quad (4)$$

- escala de longitud transición jet-pluma L_M :
$$L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2} \quad (5)$$

- escala de longitud transición jet –deflección L_m :
$$L_m = M_0^{1/2} / u_a \quad (6)$$

- escala de longitud transición pluma-deflección L_b :
$$L_b = J_0 / u_a^3 \quad (7)$$

- escala de longitud transición jet-estratificación L_m' :
$$L_m' = M_0^{1/4} / \varepsilon^{1/4} \quad (8)$$

- escala de longitud transición pluma-estratificación L_b' :
$$L_b' = J_0^{1/4} / \varepsilon^{3/8} \quad (9)$$



Tabla 3. Escalas de Longitud para descarga puntual circular

Variable	Concepto asociado
L_Q	Incidencia del momentum inicial de la descarga
L_M	Incidencia del momentum inicial de descarga respecto a la diferencia de densidades entre el efluente y el río
L_m	Incidencia del momentum inicial de descarga respecto a la velocidad del río
L_b	Incidencia de la distribución de densidades respecto de la velocidad en el río
L_m'	La capacidad de penetración de la descarga antes de ser desviada por el flujo del río (suponiendo que las direcciones de descarga y flujo difieran)
L_b'	Incidencia de la estratificación en el caso de un bajo momentum de descarga

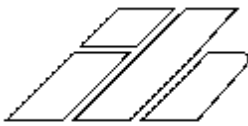
Comparando las variables anteriores entre sí, puede estimarse, por ejemplo, si la estratificación es dinámicamente importante, o si la zona de dilución queda atrapada por las densidades en el río, o si la pluma tiende a subir rápidamente hacia la superficie o interactúa con el lecho. Así, las ZDs pueden categorizarse según los factores de mayor relevancia. Para el caso de difusores de boquillas múltiples, el análisis es análogo, salvo que las variables Q_0 , M_0 y J_0 se expresan por unidad de longitud del difusor.

4.2 Zona de Dilución Lejana

En esta zona predominan las características del río, y no el momentum de la descarga. En la ZDL se contraponen dos fenómenos: el primero es que la zona de dilución tiende a irse hacia la superficie en el caso que la densidad del efluente sea menor que la densidad del agua en el río (caso más típico). Sin embargo, por otra parte, la turbulencia hace que este proceso no sea tan fácil. Será entonces la importancia relativa de ambos fenómenos, diferencia de densidad *v/s* turbulencia, lo que determinará la forma de la ZD. En la modelación de una ZD en la zona lejana, suelen estimarse coeficientes de dispersión que se emplean en la solución de ecuaciones diferenciales parciales, las que se obtienen de simplificaciones dependiendo del caso.

4.3 Programas computacionales

En los años 70 se desarrollaron varios modelos analíticos y numéricos para predecir las configuraciones de la pluma resultante de descargas de alta temperatura y/o chorros sumergidos en ríos. Enfrentados al problema del diseño de las descargas de centrales nucleares en el río Missouri, se desarrolló un modelo (Caro, 1975) que predice el comportamiento en la zona lejana de afluentes de alta temperatura



descargados en ríos de alta turbulencia. En la actualidad, los programas de modelación pueden clasificarse en tres tipos, como se ilustra en la Tabla 4.

Tabla 4 Programas computacionales en el análisis de una ZD

Tipo de Programa	Característica	Ejemplo	Ventajas	Desventajas
Completo	Un set de ecuaciones gobernantes (Navier-Stokes)	PHOENICS	Modela descargas térmicas con transferencia de calor	Requiere de condiciones de borde muy precisas. Largos tiempo de ejecución
Zonal	Considera sub-zonas con procesos de mezcla específicos y el uso de ecuaciones simplificadas	- PLUMES - CORMIX	Facilidad en análisis de sensibilidad. Bajo costo de adquisición	Aproximación rectangular de la sección transversal hace que la predicción en la zona lejana sea confiable en cauces muy regulares
Analítico	Planillas de cálculo con solución a ecs. simplificadas.		Bajo costo análisis de sensibilidad	Simplificaciones hacen que predicciones sean válidas solo en casos particulares

Los programas completos requieren de la confección de mallas de discretización, de manera tal que las dimensiones transversales y longitudinales deben ser comparables. En el caso de un río resultará un número elevado de celdas, por lo que los tiempos de ejecución serán largos y un análisis de sensibilidad será costoso.

Por lo anterior, los programas zonales se han utilizado más frecuentemente, siendo sus predicciones validadas en numerosas situaciones reales. El software desarrollado en conjunto por la USEPA y la U. de Cornell, CORMIX, es actualmente el modelo más solicitado por las autoridades ambientales de Estados Unidos y Canadá para el análisis de las ZDs. Dicho modelo está principalmente enfocado al análisis de la dilución inicial, entregando predicciones sólo referenciales para la zona lejana. La complejidad del problema de modelación se observa en la Figura 1, en que se muestran distintas configuraciones de ZD atrapadas en un medio estratificado.

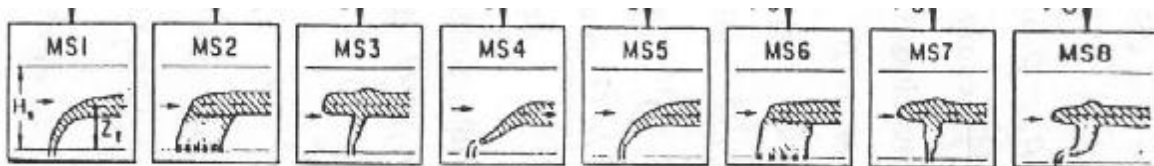


Figura 1. Configuraciones posibles de ZDs atrapadas en un medio estratificado, según cálculo modelo CORMIX (comparación de escalas de longitud).



5 Conclusiones y Recomendaciones

La revisión de la literatura indica que existen países que definen límites geométricos a las zonas de dilución, mientras otros enfatizan el análisis caso a caso. En ambas situaciones, se requiere una rigurosa modelación de la ZD. Dicha modelación debe realizarse considerando diferentes escenarios hidrológicos. En Chile, la DGA propone diseñar para el caudal ecológico, cuando éste está definido.

El proceso hidrodinámico de mezcla es complejo ya que está gobernado por la interrelación entre las condiciones ambientales del cuerpo receptor y las características de la descarga. La conceptualización del fenómeno permite distinguir una zona de dilución inicial y una zona de dilución lejana. Dentro de los programas computacionales más completos destaca CORMIX, modelo enfocado inicialmente al análisis de la dilución inicial, entregando predicciones para la zona lejana que tienen valor referencial.

Dado el avance en el conocimiento del proceso de mezcla en ríos, aparece como recomendable que las instituciones encargadas del tema ambiental y de recursos hídricos de Chile establezcan los criterios que regulen la definición de zonas de dilución, para lo cual este artículo pretende constituir un aporte.

6 Referencias

1. FISCHER, Hugo, IMBERGER, Jörg y BROOKS, Norman. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, 1979. 483 p
2. DONEKER, Robert. CORMIX Mixing Model Workshop Notebook. Dept. of Environmental Science and Engineering. Oregon Graduate Institute, 2002.
3. STEPHAN, C.E., MOUNT, D.I., HANSEN D.J., GENTILE, J.H., CHAPMAN, G.A., BRUNGS, W.A. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses. United States Environmental Protection Agency. Technical Report PB85-227049, 1985.
4. ROSSMAN, L.A. DFLOW User's Manual. United States Environmental Protection Agency. Document EPA 600/8-90/051, 1990.
5. U.S. EPA 1994a. Water Quality Standards Handbook, Second Edition. U.S. Environmental Protection Agency. Document EPA-823-B-94-005a, 1994.
6. CARO, Rodrigo. Mixing of Power – Plant Heated Effluents with the Missouri River. Master's Thesis. Iowa City, Estados Unidos, The University of Iowa, 1977. 115p.