OPS/CEPIS/PUB/ 00.52
Original: español

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA
Y CIENCIAS DEL AMBIENTE
(CEPIS)

EMISARIOS SUBMARINOS
ENFOQUE GENERAL,CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO
Y REQUERIMIENTO DE DATOS PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

HENRY J. SALAS
Asesor en Evaluación de Impacto Ambiental y Salud
CEPIS

Fecha original: 1988
Noviembre 2000

DIVISION DE SALUD Y AMBIENTE
ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD
OFICINA SANITARIA PANAMERICANA, OFICINA REGIONAL DE LA
ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

ÍNDICE

Página

1. Resumen..... 1

2. Descripción de modelos..... 1

3. Mediciones de corrientes..... 3

4. Medición de T_{90}..... 5
   4.1 Medición in situ en mancha artificial..... 5
   4.2 Medición in situ en mancha existente..... 5
   4.3 Medición en botellones..... 5

5. Programa de muestreo de calidad de agua..... 6

6. Estudios meteorológicos..... 7

7. Estudios batimétricos y geológicos..... 7

8. Diseño y construcción..... 8

9. Normas de calidad de agua..... 8
   9.1 Normas microbiológicas..... 8
   9.2 Zona de mezcla..... 8

10. Bibliografía..... 11

FIGURAS

Figura 1. Amarre para dos correntógrafos (Hydroscience 1974)..... 4

Figura 2. Costo de Emisarios Submarinos..... 9

TABLAS

Tabla 1. 2

1. RESUMEN

Se presenta una descripción del desempeño del emisario submarino largo incluyendo dilución inicial, dilución horizontal y mortalidad de coliformes y se hacen comparaciones con el tratamiento secundario con descarga cerca del litoral. Se describen requisitos de datos de campo y/o procedimientos para corrientes, T_{90}, calidad de agua, meteorología, batimetría y geológico. También se mencionan consideraciones sobre el diseño y construcción y se presentan costos.

Se discuten los estándares microbiológicos de la calidad de agua así como aspectos sobre la zona de mezcla.

2. DESCRIPCIÓN DE MODELOS

El diseño apropiado de un sistema de emisario submarino puede lograr diluciones suficientes de la descarga de aguas residuales para reducir las concentraciones de contaminantes a niveles generalmente establecidos como normas de calidad de agua. Una dilución mínima de 100:1 es común, permitiendo que la alternativa de un emisario submarino supere la de las plantas de tratamiento convencionales.

Hay varios mecanismos que controlan las características de dilución de un emisario submarino. Estos mecanismos usualmente se consideran en tres fases: dilución inicial que ocurre durante los primeros minutos al salir las aguas residuales del emisario submarino y ascender en la columna de agua recipiente; transporte y dispersión horizontal del campo de aguas residuales; y las reacciones cinéticas que ocurren en el mar. Para la descarga de aguas negras, el mecanismo de mayor importancia para el diseño es el de la desaparición de organismos indicadores tales como coliformes.

Tres fenómenos afectan la dilución inicial: mezcla causada por el impulso de las aguas servidas al salir del emisario submarino; fuerza ascendente causada por la diferencia de densidad entre las aguas residuales y las aguas de mar (diferencias en temperatura y salinidad) que hace que el campo de aguas servidas ascienda en la columna de agua extendiéndose en el proceso y, por lo tanto, mezclándose con agua de mar; y finalmente, el efecto de la corriente que causa una mezcla lateral de agua de mar renovadora en el campo de las aguas residuales.

El campo de aguas residuales diluido puede ascender a la superficie, o llegar a un nivel sumergido, dependiendo del grado de estratificación de la columna de agua. Brooks (1983) ha desarrollado un modelo que estima la dilución inicial que se puede lograr en función de los parámetros de profundidad, diámetro y velocidad de salida y diferencias en densidad. Posteriormente, Roberts (1977, 1987) desarrolló un modelo que permite estimar la dilución inicial para diferentes estructuras de corrientes, con o sin estratificación. El diseño apropiado del difusor del emisario submarino es crítico para alcanzar el nivel deseado de dilución. La longitud, profundidad y orientación así como el área y separación de los orificios de descarga, son parámetros claves del diseño. Rawn, *et al.* (1961), ha presentado métodos para el diseño de difusores y éstos han sido incorporados en un programa simple de computadora por Salas (1983).

Dispersión horizontal y transporte son función del régimen de corrientes locales y dispersión turbulenta (mezcla lateral causada por corrientes turbulentas). Brooks (1960) ha desarrollado un modelo que caracteriza adecuadamente estos procesos para estimar la dilución horizontal.

Un modelo simple logarítmico de mortalidad bacterial provee una predicción adecuada de la desaparición de coliformes con el fin de diseñar emisarios submarinos. El modelo es el siguiente:

$$S_b = 10^{\frac{T}{T_{90}}}$$

En donde:

S_b = "dilución" de coliformes
T = tiempo de traslado del campo de aguas residuales a las áreas a proteger, por ejemplo, playas, en horas
T_{90} = tiempo necesario para la desaparición del 90% de los coliformes, en horas

Ludwig (1988) ha compilado valores de T_{90} medidos en aguas tropicales y semitropicales tal como se presentan en la Tabla 1.

La dilución total obtenida como resultado de los tres procesos descritos es simplemente el producto de las diluciones individuales. Esto es para bacteria:

$$S_T = S_i \, x \, S_h \, x \, S_b = \frac{C_o}{C_T}$$

En donde:

S_T = Dilución total
S_i = Dilución inicial
S_h = Dilución horizontal
S_b = Desaparición de coliformes
C_o = Concentración inicial de coliformes en las aguas residuales
C_T = Concentración de coliformes después de T horas (en las playas)

Tabla 1

T_{90} Ubicación	**Valores, horas**
Honolulú, Hawai	0.75 o menor
Bahía de Mayaguez, Puerto Rico	0.7
Río de Janeiro, Brasil	1.0
Niza, Francia	1.1
Accra, Ghana	1.3
Montevideo, Uruguay	1.5
Santos, Brasil	0.8 - 1.7

La dilución inicial y la mortalidad bacterial usualmente son mucho más significativas que la dilución horizontal. Por ejemplo, valores típicos son:

S_i	:	50 - 200
S_h	:	2 - 3
S_b	:	500 - 10,000
S_T	:	5×10^4 - 6×10^6

Para sustancias conservativas (no biodegradables), la dilución inicial es el factor más importante.

Los parámetros ambientales más importantes en el diseño de emisarios submarinos generalmente son la estructura de la densidad de las aguas de mar recipientes, el régimen de corrientes y el T_{90} (para aguas cloacales). Por lo tanto, las campañas de recolección de datos deben concentrarse en obtener mediciones buenas de estos fenómenos.

3. MEDICIONES DE CORRIENTES

El diseño de un emisario submarino requiere de una definición adecuada de las corrientes dominantes del área de estudio. En general se recomienda instalar correntógrafos con registros incorporados para medir continuamente la velocidad y dirección de las corrientes a tres metros de la superficie y a 2 metros del fondo, en la ubicación más probable de la descarga del emisario submarino y otras ubicaciones, las que dependerían de la circulación marina del área y de la cercanía a las playas que se pretende proteger. En general, estos correntógrafos se instalarían durante dos o tres meses en las épocas lluviosa y seca. La Figura 1 presenta un posible sistema de anclaje. Estas se deben combinar con estudios de flotadores superficiales. Asimismo, se debe medir el nivel de mareas durante el mismo período.

Existe una nueva generación de correntógrafos continuos "Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)". Estos pueden ser fijados en el fondo, a cualquier profundidad, o en la superficie. También pueden fijarse a las embarcaciones. Estos nuevos correntógrafos usan la tecnología de sonar, midiendo el movimiento de partículas en el agua. Uno de los fabricantes, RD Instruments, de California, manifiesta que uno de éstos puede medir la velocidad en la columna de agua hasta en 128 profundidades. Por lo tanto, puede reemplazar un buen número de los correntógrafos antigüos.

En el caso que no se disponga de correntógrafos continuos, como alternativa mínima se recomienda utilizar correntógrafos de medición instantánea, tomando mediciones cada 15 minutos durante períodos extendidos. Observaciones diarias desde embarcaciones serían necesarias durante varias semanas en cada época. Estas se deben combinar con estudios de flotadores superficiales y subsuperficiales lanzados periódicamente en las estaciones de medición de corrientes. La posición de los flotadores sería registrada cada hora, por un período de uno a cinco días dependiendo de las características del área de estudio, por medio de observaciones visuales de una embarcación a través de alineamientos en tierra y/o radar.

Se deben analizar los datos de corrientes con técnicas armónicas o de filtración. Sería útil la presentación visual de promedios y valores probables de 80% ó 90%, dependiendo en la norma de calidad de agua, en gráficos rosetas (histogramas de coordenadas polares). Los datos de los flotadores y de los correntógrafos usualmente se presentan también en gráficos de vectores progresivos (gráficas de secuencia "cola a cabeza").

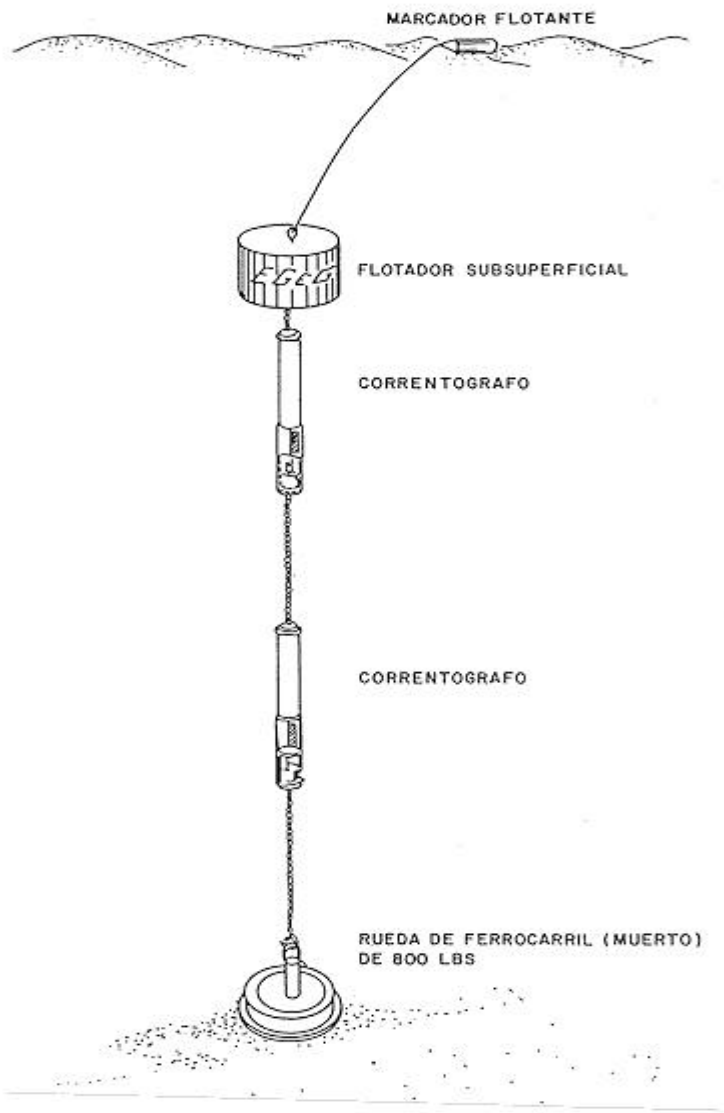

Figura 1. Amarre para dos correntógrafos (Hydroscience 1974)

4. MEDICIÓN DE T_{90}

La medición de T_{90} se puede efectuar en varias formas, y a continuación se presentan tres de éstas:

4.1 *Medición in situ en mancha artificial*

Se transporta un volumen grande de desechos al área propuesta de descarga y luego se mezcla con éste un trazador conservativo apropiado como Roadmina WT o una sustancia radioactiva. Esta mezcla se descarga en forma instantánea al medio marino y se toman varias muestras en el centro de la mancha y se mide la concentración inicial tanto del trazador como de los organismos indicadores (por ejemplo, coliformes totales y/o fecales). Se podría usar un fluorómetro a bordo que brindaría mediciones rápidas para definir concentraciones pico de tinte; esto es, la ubicación en donde deberían tomarse las muestras para realizar análisis subsiguientes de laboratorio para organismos indicadores. Pearson (1971) sugiere que las muestras se tomen a 0.6-0.9m y a aproximadamente 3m debajo de la superficie, en el punto inicial de descarga y en posiciones subsiguientes en tiempos sugeridos de 10, 20, 30, 45, 90, 120, 180 y 240 minutos. No obstante, se requiere ajustes de campo y el criterio básico es que las muestras sean recolectadas en el lugar de la concentración pico del trazador.

Los datos de coliformes resultantes se modifican para dilución física, multiplicando la concentración de coliformes observada por la razón de la concentración inicial de tinte a la concentración de tinte observada en cualquier momento. Una línea recta de mejor correlación con los datos se dibuja en un gráfico semilogarítmico de datos modificados de coliformes versus el tiempo desde el cual se puede leer el valor de T_{90}.

Se hace notar que esta metodología incurre en altos costos debido a los grandes volúmenes de desechos y trazador requeridos, lo que depende de las condiciones ambientales.

4.2 *Medición in situ en mancha existente*

En esta metodología se descargan flotadores y/o tinte en un área de descarga existente de aguas cloacales y se toman muestras, como se describe anteriormente, en la vecindad de los trazadores. Estas muestras se analizarían para determinar el nivel de organismos indicadores (por ejemplo, coliformes totales y/o fecales) y otro parámetro de la descarga que pueda considerarse como conservativo en el ambiente marino sin sedimentación. La selección de este último parámetro dependerá de las características de la descarga de las aguas negras. Aún cuando no se le considera como un parámetro conservativo, el ortofosfato disuelto ha sido utilizado con este propósito por ENCIBRA (1969) con la justificación que su decaimiento es, relativamente, mucho más lento que el de los organismos coliformes indicadores. Los datos resultantes se analizan tal como se describió anteriormente pero modificados con los datos del parámetro considerado como conservativo.

4.3 *Medición en botellones*

En esta metodología se usan bolsas transparentes o botellones, en los cuales se diluyen aguas cloacales con agua de mar en razones esperadas después de la dilución inicial, por ejemplo, 1:100. Se colocan estos receptores en ubicaciones fijadas en el medio marino justo debajo de la superficie, cerca del litoral para mantener condiciones ambientales de temperatura y luz. Las muestras son tomadas cada 15 minutos para ser analizadas para coliformes totales y/o fecales. Este procedimiento reduce sustancialmente el costo y equipo eliminando el uso de un trazador conservativo y reduciendo

los volúmenes requeridos de aguas servidas. Estos datos se grafican, versus tiempo, en papel semilogarítmico, tal como se describió anteriormente, pero no modificados. El uso simultáneo de receptores opacos (por ejemplo, pintados en negro) para simular condiciones nocturnas puede brindar información sobre las tasas nocturnas de mortalidad.

El uso de bolsas de diálisis puede complicar la situación en que se tiene que determinar las tasas de intercambio con las aguas marinas y los efectos de predadores no están incorporados.

Aunque el uso de receptáculos confinados ha recibido críticas de algunos investigadores, por ejemplo, Ludwig (1976), se ha llevado a cabo con resultados satisfactorios en los estudios de la Bahía de Guanabara en Brasil (Hydroscience, 1977) y el litoral de Mar de Plata en Argentina (INCYTH, 1984).

Se señala que Acra *et al.* (1990) reporta que el vidrio ordinario transmite 90% de la radiación ultravioleta incidente considerando el componente germicida más importante de la luz solar. También, reporta que materiales plásticos transparentes, tales como plexiglás y otros acrílicos, así como materiales translúcidos tales como polietileno, son buenos transmisores de los componentes germicidas de la luz.

Por su simplicidad y bajo costo, en general, se recomienda esta metodología.

Se hace referencia a Britto (1979) que presenta varias técnicas adicionales para la medición del T_{90}.

5. PROGRAMA DE MUESTREO DE CALIDAD DE AGUA

A fin de determinar una línea de base de calidad de agua en la zona de posible emplazamiento de una descarga que sirva como referencia para evaluar el desempeño de cualquier sistema de emisario submarino posterior a su construcción, se recomienda, siempre y cuando existan recursos, efectuar campañas de monitoreo incluyendo la toma de muestras en estaciones ubicadas estratégicamente desde el área de descarga hasta 300 metros aguas afuera de las playas más cercanas con un elevado uso para recreación.

En el caso de mar abierto, los parámetros primarios de medición serían los siguientes:

- Temperatura (perfil vertical)
- Salinidad (perfil vertical)
- Coliformes Totales y/o Fecales
- Oxígeno Disuelto*
- pH*
- Disco Secchi
- Sólidos suspendidos
- Grasa y aceite

La frecuencia de medición dependería de las condiciones locales, pero en general, dos o tres veces durante distintas épocas (por ejemplo, épocas lluviosa y seca) sería adecuada.

Para sistemas sin tratamiento o únicamente con pretratamiento, sería recomendable una

---

* Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo.

evaluación para identificar y cuantificar los organismos de fondo para asesorar el posible impacto de la sedimentación de las partículas de la descarga.

Este programa se debe combinar con mediciones de la cantidad y calidad de aguas servidas. También sería de interés incluir mediciones de la cantidad y calidad de la escorrentía del área de estudio. Esto permitiría una evaluación del posible impacto de esta fuente de contaminación que continuaría posteriormente a la construcción del emisario submarino. Asimismo, se permitirán comparaciones entre las masas contaminantes provenientes de escorrentía y las de agua servidas.

Además de lo anterior, se debe efectuar un programa rutinario de vigilancia de la calidad bacterial del agua en las principales playas, para coliformes totales y fecales u otro indicador en que se base las normas. De conformidad con las normas de calidad del agua para recreación de contacto primario en países tales como Brasil, México, EE.UU. entre otros, se recomienda una frecuencia de medición que sería de cinco veces al mes. En vista de los recientes estudios de Cabelli (1984), sería conveniente incluir la medición de Enterococci (U.S. EPA, 1985) en el programa de vigilancia, si fuera posible.

Cuando existe la posibilidad de eutroficación, como en el caso de la descarga en una bahía con limitado intercambio con el mar, los parámetros secundarios adicionales de medición serían los siguientes:

- Serie de Nitrógeno (N-orgánico, NH_4, NO_2, NO_3)**
- Fósforo total y orto-fosfatos**
- Clorofila 'a' (zona eufótica)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno**

Asimismo, se podrían efectuar estudios biológicos por medio de arrastre, al fondo y en la superficie, para identificar organismos sensibles.

Sin embargo, se destaca que en la situación de descargas en mar abierto, la medición de estos parámetros secundarios no se considera imprescindible.

6. ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

Concurrente con la medición de corrientes se debe registrar la velocidad y la dirección del viento cada hora a fin de correlacionar estos fenómenos.

7. ESTUDIOS BATIMÉTRICOS Y GEOLÓGICOS

Se debe estudiar la geología del fondo mediante un “botalón” sondas sonoras y buzos a fin de determinar la mejor ruta, evitando al máximo formaciones de rocas irregulares y formación de corales si fuese posible. Se debe recolectar la información detallada de la batimetría a lo largo de la ruta propuesta para el emisario.

** Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo.

8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En el diseño conceptual de un emisario submarino se establecen sus dimensiones: longitud, diámetro, ubicación y profundidad de descarga. Asimismo, en esta fase se completa el diseño hidráulico del difusor.

En el diseño final estructural se especifican los materiales de tubería y las técnicas de construcción y requerimientos para sostener la tubería en el fondo. Los procedimientos de diseño han sido resumidos por el del Banco Mundial (1983) y Grace (1978).

La información detallada sobre la magnitud de las olas sería necesaria en esta fase del proyecto.

Los costos de emisarios submarinos desarrollado por Wallis (1979) y actualizados por Ludwig (1988) y el suscrito, se presentan en la Figura 2. También, se incorpora a esta figura los costos de los emisarios submarinos de pequeño diámetro de polietileno de alta densidad aplicables a comunidades pequeñas desarrollados por Reiff (1990).

9. NORMAS DE CALIDAD DE AGUA

9.1 *Normas microbiológicas*

Se hace referencia a Salas (1994) que presenta la historia y aplicación de normas microbiológicas de calidad de agua en el medio marino. Este trabajo indica que la base científica utilizada para establecer, a nivel mundial, las normas microbiológicas existentes de calidad de agua para contacto primario de recreación en el medio marino es limitada y que sería mejor que cada país latinoamericano desarrolle sus normas en el contexto de sus propias condiciones socioeconómicas, en vez de simplemente adoptar las normas de otros países.

Asimismo, se hace notar que, basado en evidencia epidemiológica, Cabelli (1984) ha concluido que el enterococci es el mejor organismo indicador y ha desarrollado una relación cuantitativa entre él y el riesgo de enfermedades gastrointestinales asociado con la natación en aguas contaminadas. Saliba y Helmer (1990) reportan sobre estudios mundiales entre 1982 y 1989 e informan que, tanto las correlaciones entre síntomas de enfermedad epidemiológicos prospectivos, similares a los conducidos por Cabelli, llevados a cabo a nivel mundial y las concentraciones de indicadores así como los indicadores determinados como los mejores, varían considerablemente entre los estudios. Por lo tanto, se debe tener precaución en aplicar directamente relaciones desarrolladas en otras áreas por factores como la salud general y la inmunidad de la población total.

9.2 *Zona de mezcla*

En el diseño de emisarios submarinos para la disposición final de aguas cloacales, también se deberá considerar la definición de un grupo separado de estándares dentro de una región limitada alrededor de la sección del difusor del emisario submarino. El propósito de esta zona de mezcla es asignar una región limitada para la mezcla completa del efluente con el agua de mar. Como tal, la zona de mezcla no es una región que cumpla con las normas y tiene un uso limitado del agua.

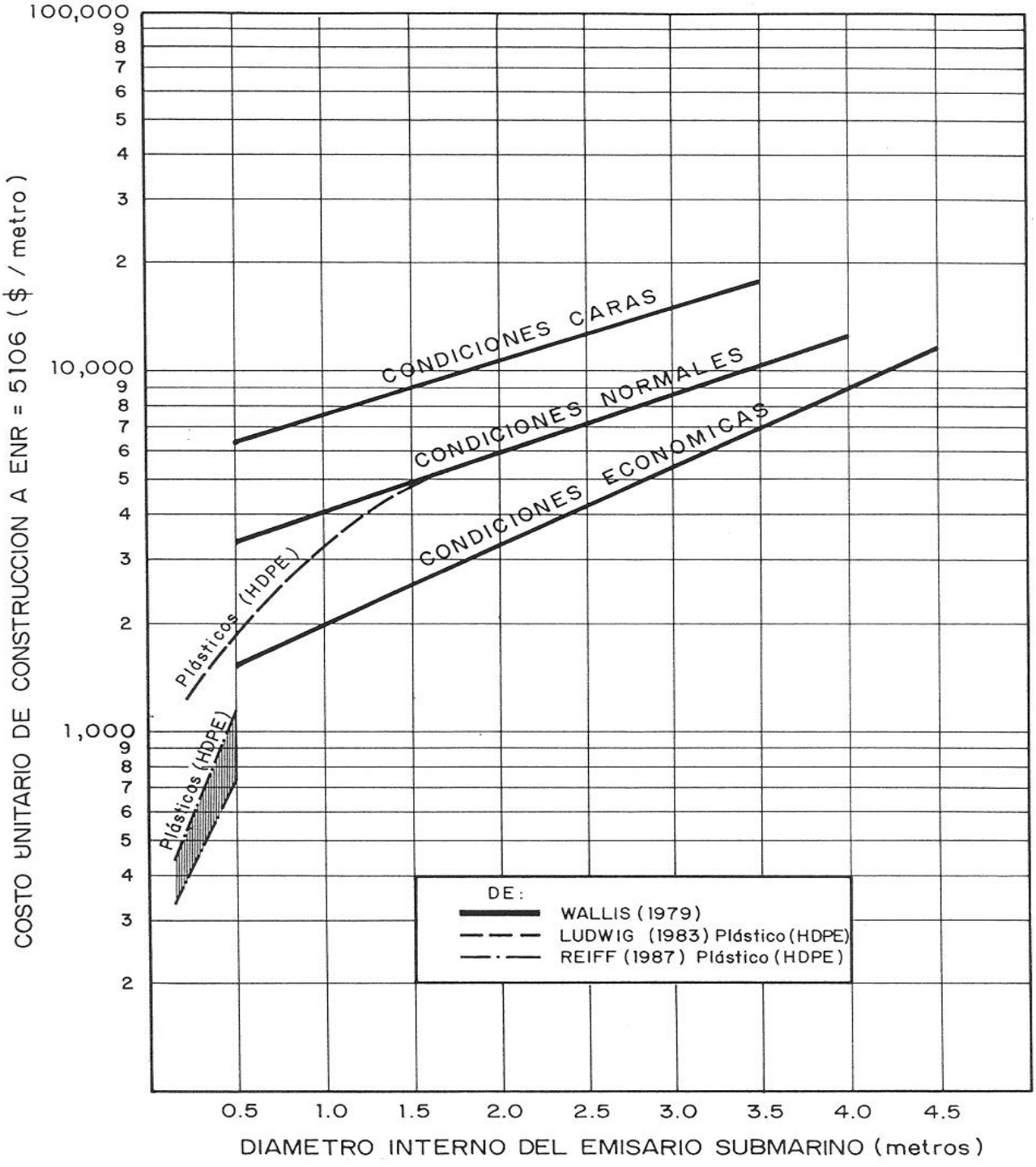

Figura 2. Costo de Emisarios Submarinos

Normalmente rodea un volumen que se extiende a 50-600 metros en todos los lados de la zona inicial de dilución. Los estándares de la zona de mezcla están generalmente limitados a variables de calidad del agua para protección de toxicidad aguda (usualmente determinada a través de bioensayos) y para minimizar los impactos visuales. Los estándares de organismos coliformes normalmente no se imponen en la zona de mezcla a menos que el difusor esté localizado muy cerca a áreas de extracción de mariscos o a aguas de uso recreacional. Tales estándares no se aplican usualmente a DBO, a oxígeno disuelto ni a nutrientes.

10. BIBLIOGRAFÍA

– ACRA, A. *et al*. 1990. Water desinfection by solar radiation; assessment and aplication. IDRC, Ottawa. P. 83.

– BRITTO, E.R. y GONCALVES, F.P.B. (1979). Contribuicao ao estudo para determinacao do decaemento bacteriono. 10° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Manaus, 21 a 26 Janeiro 1979.

– BROOKS, N.H. (1960). Diffusion of sewage effluents in an ocean current. Proc. of First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment. University of California. 1959. Pergamon Press, New York.

– BROOKS, N.H. (1983). Dispersion in hydrologic and coastal environments. Environmental Protection Agency. Springfield, Virginia, NTIS, 141 p. PB-226980.

– CABELLI, V.J. (1984). Health effects criteria for marine recreational waters, EPA-600/1-80-031, U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, 98, Aug. 1984.

– ENCIBRA, S.A.E. (1969). Engineering-Science Inc. Marine sewage disposal for Rio de Janeiro, City of Rio de Janeiro, Brazil.

– GRACE, R.A. (1978). Marine outfall systems: Planning, design and construction. Prentice-Hall. New Jersey.

– HIDROSCIENCE, Inc. (1974) Water quality evaluation for ocean disposal system: Nassau County, Supplement A. New York.

– HYDROSCIENCE, Inc. (1977). Guanabara Bay water quality study, Brazil. Pan American Health Organization/FEEMA.

– INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TÉCNICA HÍDRICAS (INCYTH) (1984). Estudio de la factibilidad de la disposición en el mar de los efluentes cloacales de la ciudad de Mar del Plata. Argentina. 3 volúmenes.

– LUDWIG, R.G. (1976). The planning and design of ocean disposal systems. Prepared for the Pan American Health Organization Symposium on Wastewater Treatment and Disposal Technology. Buenos Aires.

– LUDWIG, R. (1988). Evaluación del Impacto Ambiental: Ubicación y diseño de Emisarios Submarinos. Informe No. 43 de MARC. Documento de EIA.

– PEARSON, E.A. (1971). Guidelines for conduction of bacterial dissapearance rate (T-90) studies for marine outfall design. Unpublished paper, April 1971.

– RAWN, A.M.; BOWERMAN. F.R.; HON, M. & BROOKS, N.H. (1961). Diffusers for disposal of sewage in sea water. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 126: 344-388, Part III.

– REIFF, F.M. (1990). Emisarios submarinos de pequeño diámetro de polietileno de alta densidad (HDPE), CEPIS/HPE/OPS.

– ROBERTS, P.J.W. (1977). Dispersion of buoyant waste discharged from outfall diffusers of finite length. California Institute of Technology. Pasadena, California, March 1977, 193 p. Report N° KH-R-35.

– ROBERTS, P.J.W (1987). The use of current data in ocean outfall design. Proceedings of IAWPRC Marine Disposal Seminar, Rio de Janeiro, Brazil, August 1986, v. 18, No. 11, 1986. ISBN 008 035 5811, Pergamon Press.

– SALAS, H.J. (1983). Programa básico de cómputo para el diseño de un emisario submarino. CEPIS, Lima, Peru.

– SALAS, H.J. (1994). Historia y aplicación de normas microbiológicas de calidad de agua en el medio marino. Versión actualizada. CEPIS/HPE/OPS.

– SALIBA, L. J. & Helmer, R. (1990). Health risks associated with pollution of coastal bathing waters. World Health Statistics, Vol. 43, No. 3, p. 177-187, World Health Organization.

– U.S. Environmental Protection Agency (1985). Test methods for escherichia coli and enterococci in water by the membrane filter procedure. U.S. Department of Commerce. NTIS. 30 p. EPA-600/4-85/076.

– WALLIS, J.G. (1979). Ocean outfall construction cost. Journal WPCF, 51:5:951-957. Mayo 1979.

– WORLD BANK (1983). Marine waste disposal for developing countries. A Manual for Planning and Practice. Parts II and III. Structural Design and Construction, Draft. Enero 1983.