

CI51D/CI711
CONTAMINACIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS
Por: Jorge Castillo G.

4.- LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Definición Según calidad del agua en su estado natural (ya no se usa)
 Según usos del agua

Definición: “Toda condición del agua que perjudique a alguno de sus usos.”

Usos del agua:

Bebida	recreación y estética	generación de energía
Riego	preservación vida natural	disposición de residuos
navegación	usos industriales	transporte (minerales)

TIPOS DE CONTAMINACIÓN

Según su origen	Cultural	Actividad doméstica Actividad industrial Actividad agropecuaria
	Natural	Eutroficación Estratificación Mineralización Sedimentos

4.1.- ACTIVIDAD DOMÉSTICA

Sistemas de alcantarillado concentran el problema en uno o más puntos, generando un nuevo problema. Ej.: Talca, Paris y Londres.

La población mundial y la demanda de agua aumenta, pero los recursos hídricos permanecen constantes

demanda típica *per capita*: aproximadamente 200 a 300 litros/persona-día

Coeficiente Harmon (1918, Toledo, Ohio): representa el cociente entre el caudal máximo y el caudal medio y depende de la población P, expresada en miles de habitantes.

$$C = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}$$

Características de las aguas servidas:

Literatura: DBO₅ de 50 - 100 mg/l ; 54 gr/hab·día;

Chile: 30 – 40 gr/hab·día

Población microbiana: Bacterias
Virus
Quistes de ameba
Parásitos
10⁷ colifecales/100 ml

Coliformes totales: 100.000 millones/persona · día

Coliformes fecales: 2.000 millones/persona · día

4.2.- ACTIVIDAD INDUSTRIAL Y MINERA

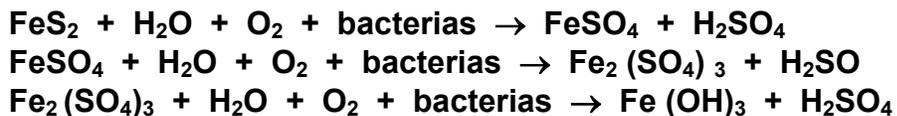
Es muy variada. La calidad de los residuos se relaciona con el tipo de proceso productivo. Residuos son materia prima, productos semielaborados o productos terminados.

Referencia: Nelson Nemerof, Theories and practices of industrial waste treatment. Addison-Wesley Pub. Co. 1963.

Ejemplos:

Relaves mineros: Contienen sedimentos
Problemas de pH (generalmente alto)
Cobre
Molibdeno

Cuando los minerales quedan expuestos al aire y a la humedad se produce acidificación por oxidación de piritas férricas por efecto de las bacterias oxidadoras de sulfuros (*thiobacillus thiooxidans*) y bacterias filamentosas del hierro. Las reacciones son las siguientes:



En cada etapa se produce ácido sulfúrico y el hierro termina en forma de hidróxido que tiene un color rojo intenso y es poco soluble y al precipitar puede sofocar a organismos bentónicos (que viven en el fondo de los cuerpos de agua).

Para evaluar los residuos de origen industrial se utiliza el concepto de población equivalente, la que se puede calcular para cada parámetro si se conoce el valor característico *per capita*:

Ejemplo: Una industria que descarga 50 l/s con una concentración de DBO₅ de 3.000 mg/l tiene para el caudal una población equivalente de aproximadamente

$$50 \text{ (l/s)} \cdot 86.400 \text{ (s/día)} / 250 \text{ (l/pers.·día)} = 19.280 \text{ personas equivalentes}$$

y para la DBO₅ de

$$50 \text{ (l/s)} \cdot 86.400 \text{ (s/día)} \cdot 3.000 \text{ (mg/l)} \cdot 0,001 \text{ (gr/mg)} / 35 \text{ (gr/pers.·día)} = 370.286 \text{ personas equivalentes}$$

Cuando los residuos industriales líquidos descargan a los sistemas de alcantarillado es importante que su calidad sea tal que no dañe las tuberías ni los sistemas de tratamiento.

4.3.- ACTIVIDAD AGROPECUARIA

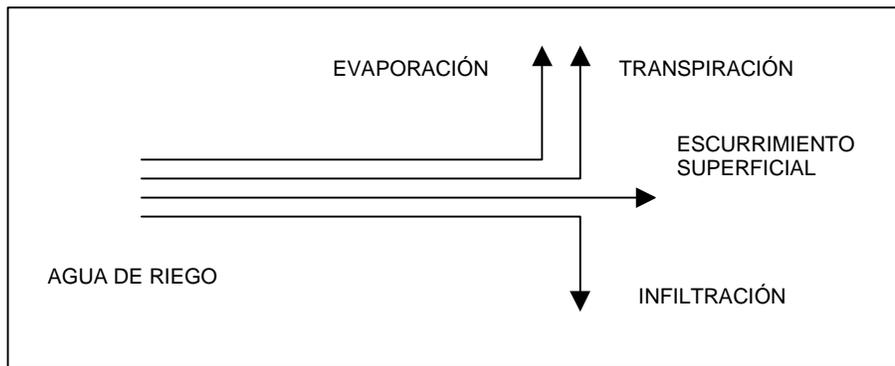
La contaminación del agua por efecto de la actividad agropecuaria se produce principalmente por tres mecanismos: el aumento de la salinidad del agua y del suelo, el efecto de los residuos animales y el empleo de pesticidas.

a) Salinidad del agua y del suelo.- El riego tiende a producir un aumento de la salinidad del agua y del suelo por las pérdidas de agua libre de sales a través de la evaporación y la transpiración de las plantas. La práctica del riego tiende a aumentar la superficie de agua disponible para evaporación, aumentando la concentración del agua que queda adherida a las partículas del suelo, o bien, dejando en éste un residuo salino cristalizado. La reutilización de los excedentes de riego en riego de predios ubicados aguas abajo en la cuenca produce un incremento gradual de la salinidad, a la que se suma el efecto de la evaporación natural del agua.

La acumulación de sal en el suelo obliga a su lixiviación periódica, normalmente mediante riego por inundación, lo cual redundará en una mayor demanda de agua.

En la figura se muestra esquemáticamente la forma como se incrementa la salinidad del agua por efecto del riego.

Esquema del incremento de la salinidad del agua y del suelo producido por el riego.



El incremento de la salinidad en el suelo puede producir problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles, por ejemplo los cítricos, que son muy sensibles al sodio.

También puede producir una disminución del agua disponible para la planta al reducir la presión osmótica en los capilares de las raíces, pudiendo incluso revertir el proceso y disecar la planta.

Otro efecto producido por la salinidad, especialmente en la forma de ión sodio, es la cementación de los suelos finos, reduciendo su capacidad de infiltración (ver parámetro RAS, razón de adsorción de sodio).

b) Residuos animales

Los residuos animales se pueden incorporar al agua mediante dos mecanismos: **a)** desde áreas de cultivo abonadas con estiércol y **b)** desde corrales.

TASAS DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS ANIMALES

Animal	Peso (kg)	Residuos (kg/día)	DBO (kg/día)	Nitrógeno (Kg/día)	Fósforo (kgP ₂ O ₅ /día)
Vaca (carne)	500	4,5	0,45	0,136	0,045
Vaca (leche)	500	4,5	0,55	0,181	0,045
Cerdo	50	4,1	0,115	0,027	0,009
Pollos	2,5	0,27	0,007	0,0014	0,0014

Fuente: Agricultural Practices and Water Pollution control.

Ejemplo chileno:

Un criadero con 35.000 cerdos produce diariamente 900.000 litros de agua/día, con una DBO₅ del orden de 6.000 mg/l, lo que da tasas de 25 l/cerdo · día y 154

gr/cerdo · día. Las altas tasas de DBO₅ y de consumo de agua se deben a que en Chile la operación de los criaderos no está orientada al control de la contaminación. El tratamiento de estos residuos mediante lagunas aeróbicas requeriría de unas 30 hectáreas (basado en una carga máxima de unas 200 kg DBO/há.·día). En general, si se quiere tratar las aguas servidas de cerdos mediante lagunas de estabilización aeróbicas, se requiere del orden de una hectárea por cada mil cerdos.

Una mejor alternativa de manejo del problema consiste en la disposición separada de los sólidos, en seco, y el tratamiento sólo de las aguas estrictamente necesarias para el lavado.

Se estima que un cerdo produce diariamente unos 4 kg de materia sólida, lo que equivale a poco más de 4 litros (densidad de 0,96 kg/l). Por lo tanto, una población de 35.000 cerdos genera diariamente unos 140 metros cúbicos de residuos sólidos (6x6x4 m), con un contenido de humedad del orden de 90%. Si este residuo se seca hasta alcanzar un contenido sólido de un 20%, su volumen se reduce a la mitad, es decir a unos 70 metros cúbicos.

INFECCIONES TRANSMITIDAS POR LOS DESCHOS ANIMALES

Ántrax	histoplasmosis	newcastle	leptospirosis
Coccidiosis	cólera porcina	ornitosis	
Encefalitis	bronquitis infecciosa	gastrenteritis	
Erisipela	mastitis	salmonelosis	

c) Contaminación por pesticidas (insecticidas, fungicidas, herbicidas) y fertilizantes.

Los pesticidas y fertilizantes pueden causar graves problemas de contaminación aguda por toxicidad y, adicionalmente, dependiendo de su naturaleza, pueden acumularse en el ambiente generando problemas de tipo crónico. La tendencia es a utilizar cada vez menores cantidades de pesticidas más degradables e, incluso, utilizar agricultura orgánica, es decir, sin la adición de productos químicos no naturales.

4.4.- CONTAMINACIÓN NATURAL

a) Eutroficación

La eutroficación es un proceso natural que ocurre en todos los lagos, consistente en la acumulación gradual de biomasa y nutrientes, los que tienden a formar sedimentos que van lentamente ocupando el volumen del lago hasta transformarlo en un pantano. Para comprenderlo mejor es conveniente utilizar el concepto de ciclos de los nutrientes.

Macronutrientes: Se llaman macronutrientes a aquellos elementos que son necesarios para la vida en cantidades relativamente altas. CHONSP es una regla nemotécnica que permite recordar los principales macronutrientes: carbono (C), hidrógeno (H), Oxígeno (O), etc.

Micronutrientes: Son aquellos elementos esenciales para la vida pero que se requieren en muy pequeñas cantidades y comprenden otros 30 a 40 elementos. Ejemplo, el molibdeno se necesita para la fijación del nitrógeno por las algas verde-azules.

Se denomina **nutriente limitante** a aquel elemento que se encuentra presente en menor proporción en relación a la demanda.

Ciclos de los nutrientes: Cuando los seres vivos mueren, liberan al ambiente los nutrientes que constituyen sus organismos, donde son reutilizados formando ciclos. Los ciclos de los nutrientes se examinan en forma separada sólo por conveniencia. Sin embargo esto puede inducir a error si no se tiene presente que todos los “ciclos” ocurren en forma simultánea y completamente interrelacionada, como parte de un mismo proceso.

Ciclo del Carbono

Principales procesos:

- Fotosíntesis
- Alimentación
- Muerte y residuos
- Descomposición y síntesis

Si no se liberara el carbón en el proceso de descomposición, en forma de CO_2 , la fotosíntesis se detendría en cuestión de días.

El paso de nutrientes de naturaleza inorgánica (como el CO_2) a materia viva (orgánica) se denomina “**fijación**”. El principal proceso de fijación del carbono es la fotosíntesis pero, además, existen otros procesos de fijación como por ejemplo los siguientes:

Bacterias quimioautotróficas
Algunos organismos heterotróficos

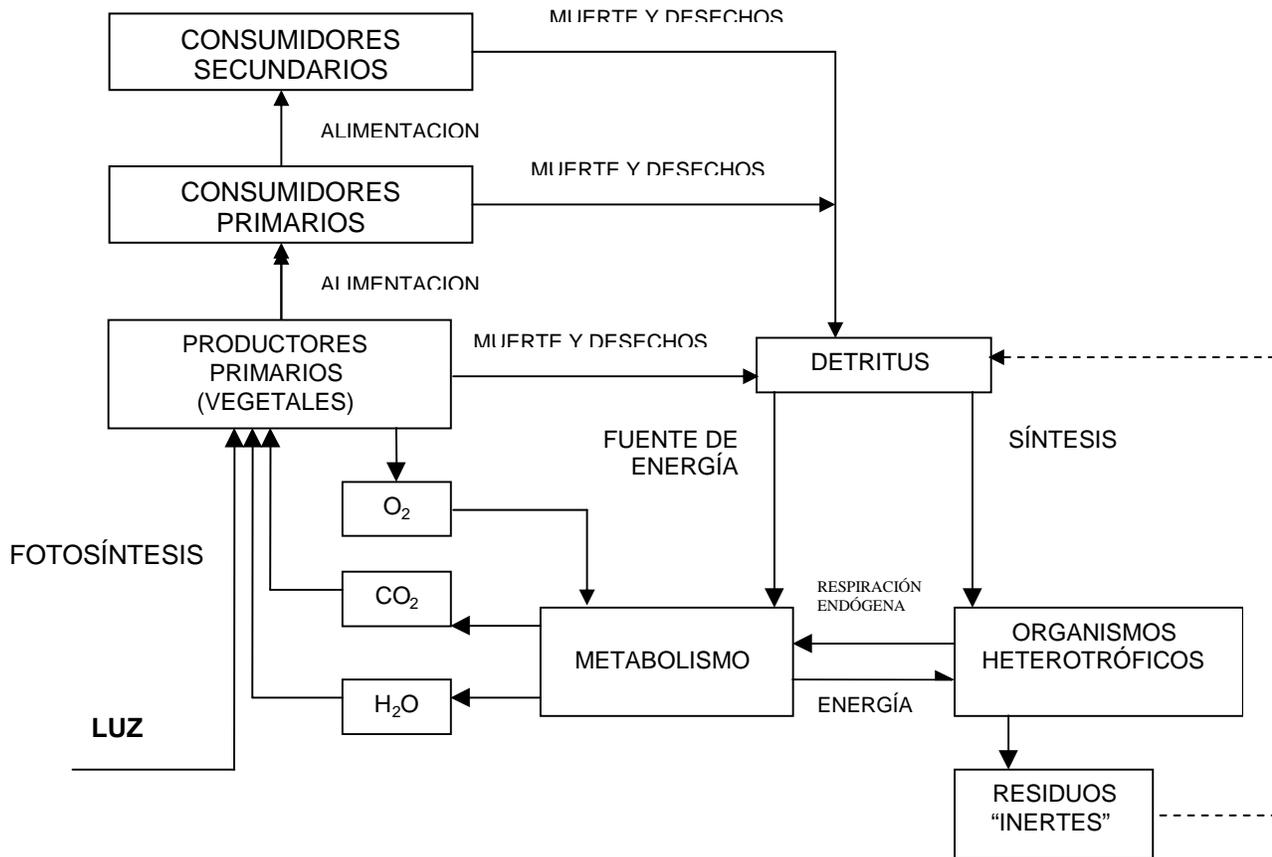
Ej: “Mold” neurospora crassa puede condensar el CO_2 con ornitina para formar citrulina.

Aerobacter aerogenes fija el carbón en forma de purinas mediante pirimidinas.

Muchas bacterias requieren CO_2 para crecer.

Células animales pueden condensar carbón con acetil coenzima **A** para formar malonyl – coenzima **A**.

CICLO DEL CARBONO



Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno gas, aunque comprende aproximadamente el 80% del aire, generalmente no está disponible para la mayoría de las reacciones biológicas en su forma elemental, debido a que ésta es relativamente inerte del punto de vista químico.

La fijación o transformación en formas utilizables por los seres vivos es realizada por muchos microorganismos, incluyendo bacterias anaeróbicas y muchas algas verde-azules.

Antiguamente se creía que sólo se fijaba el nitrógeno por efecto de la simbiosis planta-Rhizobium en las raíces de las leguminosas y la Azotobacter en el suelo.

El nitrógeno gas aparentemente se absorbe por una molécula de una enzima denominada nitrogenasa que interactúa con una enzima hidrogenasa para dar un complejo enzimático de nitrógeno que es consecuentemente reducido a amonio. En las bacterias anaeróbicas el ácido pívúrico es una de las fuentes de nitrógeno para la reacción. Por otra parte, el ácido pívúrico es uno de los subproductos metabólicos claves de las reacciones de fermentación que ocurren en ambientes pobres en oxígeno disuelto.

Procesos del ciclo del nitrógeno

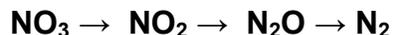
Asimilación o fijación: Es la transformación de nitrógeno inorgánico, en forma de amoniaco (NH_4) o nitratos (NO_3^-) a nitrógeno orgánico. Las bacterias fijadoras del nitrógeno abundan en nódulos en las raíces de las legumbres y producen la fijación:



La **mineralización o amonificación** es la transformación del nitrógeno orgánico contenido principalmente en las proteínas, a amoniaco. El amoniaco, NH_3 (-3), es la forma más reducida de nitrógeno.

La **nitrificación** es la oxidación del amoniaco gradualmente a nitritos (NO_2) y luego a nitratos (NO_3), la forma más oxidada. Es realizada principalmente por las bacterias Nitrosomas, que actúan a $\text{pH} < 6,0$,y por Nitrobacter, que son inhibidas a $\text{pH} < 9,5$. El **nitrato (+5)** es la forma más oxidada de nitrógeno.

La **denitrificación** consiste en el paso de nitratos a nitrógeno gas, proceso que puede ser producido por las bacterias anaeróbicas denitrificadoras, que utilizan el oxígeno del nitrato para oxidar a la materia orgánica:



Este proceso se utiliza en la remoción de nitrógeno de agua por métodos biológicos.

Ciclo del fósforo: Es más simple. Normalmente fósforo proviene de fosfatos contenidos en las rocas y por ser poco soluble tiende a sedimentar en el fondo de los ríos y lagos, solubilizándose lentamente.

La **eutroficación** ocurre naturalmente en todos los lagos, a medida que el área de drenaje aporta nutrientes, produciéndose un incremento de la vida acuática y de

los sedimentos en los que se acumulan fosfatos que luego están disponibles para acelerar el proceso. Los sedimentos van llenando el lago, reduciendo su volumen útil, hasta que emergen plantas en la superficie y el lago se transforma en un pantano, para finalmente formar una planicie seca.

Desde el punto de vista nutricional, los lagos se pueden clasificar en:

Oligotróficos, lagos jóvenes que tienen pocos nutrientes, poca vida acuática, sus aguas son transparentes y existe poco lodo acumulado en el fondo (ejemplo, la laguna negra).

Eutróficos, lagos viejos con poca profundidad, abundantes algas microscópicas y sedimentos orgánicos (lodo). Generalmente tienen buena calidad cerca de la superficie donde hay luz en el día y, por lo tanto, fotosíntesis y contacto con el aire. En la noche puede escasear el oxígeno y producirse anaerobiosis. A mayores profundidades generalmente se mantienen condiciones anaeróbicas y mala calidad (ejemplo, la laguna de Aculeo).

Mesotróficos, lagos intermedios que no son oligotróficos, pero tampoco eutróficos.

Eutroficación cultural o acelerada: La eutroficación natural tarda varios millones de años, pero se puede producir en unas pocas décadas por efecto de las descargas artificiales de nutrientes, por ejemplo contenidos en los detergentes, fertilizantes, aguas servidas, etc. Ejemplos de lagos eutrofificados por descarga de nutrientes: Tahoe y Erie en EE UU.

Efectos de la eutroficación: La eutroficación produce exceso de algas, turbiedad, disminución del OD, aumento de P y N, aumento de temperatura, cambios de pH y oxígeno importantes entre el día y la noche.

Índice de eutroficación: Un lago eutrófico se considera si su contenido de clorofila "a" es mayor de 10 mg/m³. La concentración de clorofila se relaciona con la de fósforo a través de la relación (Vollenweider):

$$C = 0,48 \cdot P^{0,73}$$

en que **P** es la carga normalizada de fósforo, expresado como

$$P = \frac{L(P) / qs}{1 + \sqrt{T}}$$

siendo

P la carga normalizada de fósforo
L (P) la carga superficial anual de fósforo (mg/m^2 año)
T el tiempo de residencia
qs la profundidad media/T ($\text{m}/\text{año}$)

b) Estratificación térmica: Se produce en forma espontánea en los lagos en los meses de verano principalmente, debido a que el agua más caliente es menos densa que la más fría y permanece en la superficie, donde recibe aún más calor, acentuando el proceso. En las zonas muy frías, cuando la temperatura es inferior a 4°C , también se puede producir en invierno.

Por efecto de la estratificación se tiende a formar una capa de buena calidad en la superficie, denominada *epilimnion*, donde hay buena oxigenación y vida acuática en buenas condiciones. La capa inferior recibe los residuos (detritus) de la capa superior y no tiene acceso ni a la luz ni al oxígeno, por lo que puede generar condiciones anaeróbicas. En el otoño, cuando se enfría la superficie se puede producir una inversión del perfil de temperatura, denominada "vuelco otoñal", que produce una mezcla de las capas estratificadas, generando malas condiciones de calidad en todo el volumen de lago. Ocasionalmente se puede producir mortandad de peces por causa de este fenómeno.

Relación densidad-temperatura: El agua tiene su máxima densidad a 4°C y a temperaturas superiores e inferiores disminuye su densidad, tendiendo a flotar en las capas más densas. Cuando el agua está a más de 4°C se producen perfiles estables en el verano, en que las capas menos densas flotan e la superficie del agua, se calientan más y permanecen en la superficie. En las zonas frías, donde el agua está a menos de 4°C , se puede producir estratificación en invierno debido a que el agua más fría flota en el agua más caliente y se tiende a enfriar cada vez más. En este caso el vuelco se produce al calentarse la capa superior del agua, en la primavera.

A veces, especialmente en los embalses destinados a suministrar agua potable, se puede recurrir a una **destratificación** mecánica, para evitar el fenómeno de la estratificación térmica y sus consecuencias en la calidad del agua.

c) Mineralización: Es la disolución de sustancias minerales en el agua desde el suelo y las rocas. EL agua adquiere impurezas solubles contenidas en el suelo.

Ejemplos:

Calizas (CaCO_3) → dureza, alcalinidad

Yeso (CaSO_4) → dureza, sulfatos

NaCl , KCl → salinidad

Piritas y sulfuros de cobre → Cu , Fe , sulfatos, acidez

d) Sedimentos

Ocupan volumen en embalses y producen enbancamiento de cauces naturales y artificiales.

- Reducen rendimiento de cosechas por sofocación del suelo.
- Reducción fotosíntesis (riego por aspersión)
- Obstrucción de boquillas (riego por goteo)
- Interfieren con vida acuática bentónica
- Reducen valor estético y recreacional
- Aumentan costos de tratamiento

5.- ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DEL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Desde el punto de vista administrativo, las alternativas de control de la contaminación del agua varían entre la legislación restrictiva y los instrumentos económicos de gestión.

Desde el punto de vista tecnológico las alternativas son más variadas, siendo las siguientes las más importantes:

- 5.1.-** Alejamiento
- 5.2.-** Dilución
- 5.3.-** Autopurificación
- 5.4.-** Control de fuentes
- 5.5.-** Tratamiento.

5.1.- Alejamiento

Consiste simplemente en transportar las aguas contaminantes hacia lugares donde no produzcan daño o produzcan un daño menor. Ejemplos típicos de estas alternativas son la construcción de interceptores y emisarios (caso Zanjón de la Aguada y río Mapocho), la conducción a través de canales o ríos (los mismos casos, en la actualidad), las descargas al mar (Arica, La Serena), la infiltración en pozos (algunas industrias de Santiago), la disposición en la tierra (es más bien tratamiento) y las lagunas de evaporación (igual).

5.2.- Dilución

Normalmente los problemas de contaminación están asociados no tanto a las cantidades de contaminantes como a las concentraciones de ellos que se producen localmente. De hecho, si todos los contaminantes naturales se distribuyeran uniformemente en el planeta no serían capaces de producir ningún daño.

El control mediante dilución se basa en el aprovechamiento eficiente de los caudales de los cuerpos receptores para lograr reducir las concentraciones hasta niveles no contaminantes.

Si **Q_r** es el caudal de un río
q el caudal de la descarga contaminante
C_r es la concentración de la descarga
c es la concentración de la descarga

entonces la concentración resultante aguas abajo de la descarga, después que ésta se ha mezclado completamente con las aguas del río, se puede calcular, si no existen reacciones que ocurran rápidamente, mediante un simple balance de masas en torno al punto de descarga, como sigue :

$$Q_r C_r + q c = C Q = c(Q_r + q)$$

Siendo **C** la concentración resultante y **Q** el caudal resultante, aguas abajo de la descarga.

$$C = \frac{Q_r C_r + q c}{Q_r + q} = \alpha C_r + \beta c$$

La concentración resultante es una combinación lineal de las concentraciones del río y de la descarga. Los coeficientes de proporcionalidad son los porcentajes de los caudales respectivos, con respecto al caudal total. De este modo, mientras más importante sea el caudal de la descarga con respecto al caudal del río, la concentración resultante será más cercana a la descarga. Por esto, desde el punto de vista de la capacidad de dilución del agua, interesa caracterizar los caudales más bajos del cuerpo receptor.

Distribución típica de caudales en los ríos. El caudal de los ríos se distribuye a lo largo de año con mayores valores en las épocas de precipitaciones (componente pluvial) y de deshielos (componente nival). También se pueden producir fluctuaciones a lo largo del día, especialmente de la componente nival. La distribución de caudales se puede caracterizar a través del concepto hidrológico de probabilidad de excedencia, cuya distribución caracteriza el régimen del flujo. Obras de regulación de los caudales pueden variar la distribución probabilísticas del flujo.

Dado que las mayores concentraciones se producen cuando los caudales son menores, las curvas de probabilidad de excedencia de los caudales son complementarias con las de las concentraciones, es decir, su suma es igual a la unidad.

5.3.- Autopurificación

La contaminación es básicamente un estado inestable. En forma natural

- La materia orgánica tiende a descomponerse
- Los sólidos tienden a sedimentar
- Los microorganismos patógenos o intestinales tienden a morir
- Las sustancias disueltas tienden a diluirse indefinidamente

Por lo anterior, existe tendencia natural a la descontaminación.

Los procesos de tratamiento básicamente simulan los procesos que ocurren en forma natural, como:

- Aireación
- Descomposición de la materia orgánica (aeróbica, anaeróbica)
- Sedimentación
- Filtración, volatilización, etc.

5.4.- Control de las Fuentes

Descargas no puntuales: Llegan en forma distribuida a los cuerpos de agua, como afloramientos, pequeños hilos de corrientes, etc. No existe una descarga concentrada donde se pueda instalar una planta de tratamiento.

El control de las fuentes es el único método válido para las descargas no puntuales, que no pueden ser tratadas.

Ejemplos:

- Pesticidas
- Fertilizantes
- Aguas subterráneas contaminadas por riego con aguas servidas
- Recarga de los ríos, recuperaciones de riego
- Contaminación por sedimentos a través de la erosión
- Disminución de cargas contaminantes industriales

5.5.- Tratamiento

Se distinguen 4 niveles:

- preliminar
- primario
- secundario
- terciario