

MÓDULO: CONTAMINACIÓN DE AGUAS

CONTENIDOS

1. EL AGUA COMO FACTOR AMBIENTAL Y COMO RECURSO	2
1.1. EL AGUA EN NUESTRO PLANETA	2
1.2. EL AGUA COMO FACTOR AMBIENTAL.....	4
1.3. EL AGUA COMO RECURSO	5
1.4. EL AGUA COMO DETERMINANTE AMBIENTAL Y SOCIAL DE SALUD	16
1.5. TENDENCIAS ACTUALES ACERCA DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	20
2. RECURSOS HÍDRICOS EN URUGUAY	22
2.1. ALGUNOS COMENTARIOS GENERALES	22
2.2. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES	25
2.3. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	25
3. MARCO REGULATORIO EN URUGUAY	28
3.1. EVOLUCIÓN DEL MARCO LEGAL	28
3.2. POLÍTICA NACIONAL DE AGUAS.....	30
3.3. PLAN NACIONAL DE AGUAS.....	31
3.4. PLAN NACIONAL DE SANEAMIENTO	32
3.5. PLAN NACIONAL DE DRENAJE URBANO	32
3.6. ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUAS EN URUGUAY	33
4. PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS	35
4.1. TEMPERATURA	35
4.2. PH	35
4.3. ALCALINIDAD	36
4.4. DUREZA	37
4.5. SALINIDAD	37
4.6. CONDUCTIVIDAD	37
4.7. CONTENIDO DE SÓLIDOS.....	38
4.8. COLOR	40
4.9. TURBIEDAD.....	40
4.10. INDICADORES BACTERIOLÓGICOS.....	41
4.11. NITRÓGENO Y FÓSFORO	44
4.12. CLOROFILA “A”	48
4.13. OXÍGENO DISUELTO	49
4.14. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)	49

4.15.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	53
4.16.	DEMANDA NITROGENADA DE OXÍGENO (DNO).....	54
4.17.	ACEITES Y GRASAS.....	54
4.18.	TÓXICOS	55
4.19.	DETERGENTES Y AGENTES TENSOACTIVOS	56
5.	CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	57
5.1.	PRINCIPALES CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	57
5.2.	PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	58
5.3.	VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS	59
6.	CONTAMINACIÓN DE MARES Y OCÉANOS	60
6.1.	ZONAS COSTERAS.....	60
6.2.	MAR ABIERTO	61
6.3.	RETENCIÓN DE PLÁSTICOS EN CUERPOS DE AGUA.....	64
	BIBLIOGRAFÍA BÁSICA, REFERENCIAS	67
	ANEXO: DECRETO 253/79	69

1. El agua como factor ambiental y como recurso

1.1. El agua en nuestro planeta

La **hidrosfera** es la parte de la **biósfera** compuesta por agua. No sólo comprende la superficie terrestre, sino también parte de la atmósfera y de la litósfera.

El agua ocupa aproximadamente el 70 % de la superficie terrestre y, de acuerdo con sus características, se diferencia en aguas superficiales marinas – oceánicas (saladas), aguas superficiales continentales (dulces) y aguas subterráneas.

Entre las aguas continentales, se designan como cuerpos de agua **lóticos** aquellos en los que se puede definir una dirección preferencial de flujo (ríos, arroyos, cañadas); y como cuerpos de agua **lénticos** aquellos en los que esto no es posible (lagos, lagunas, embalses).

La mayor parte del agua que existe en nuestro planeta es o no accesible o no aprovechable para muchos usos (abastecimiento, riego, abrevadero, etc.) (Figura 1.1).

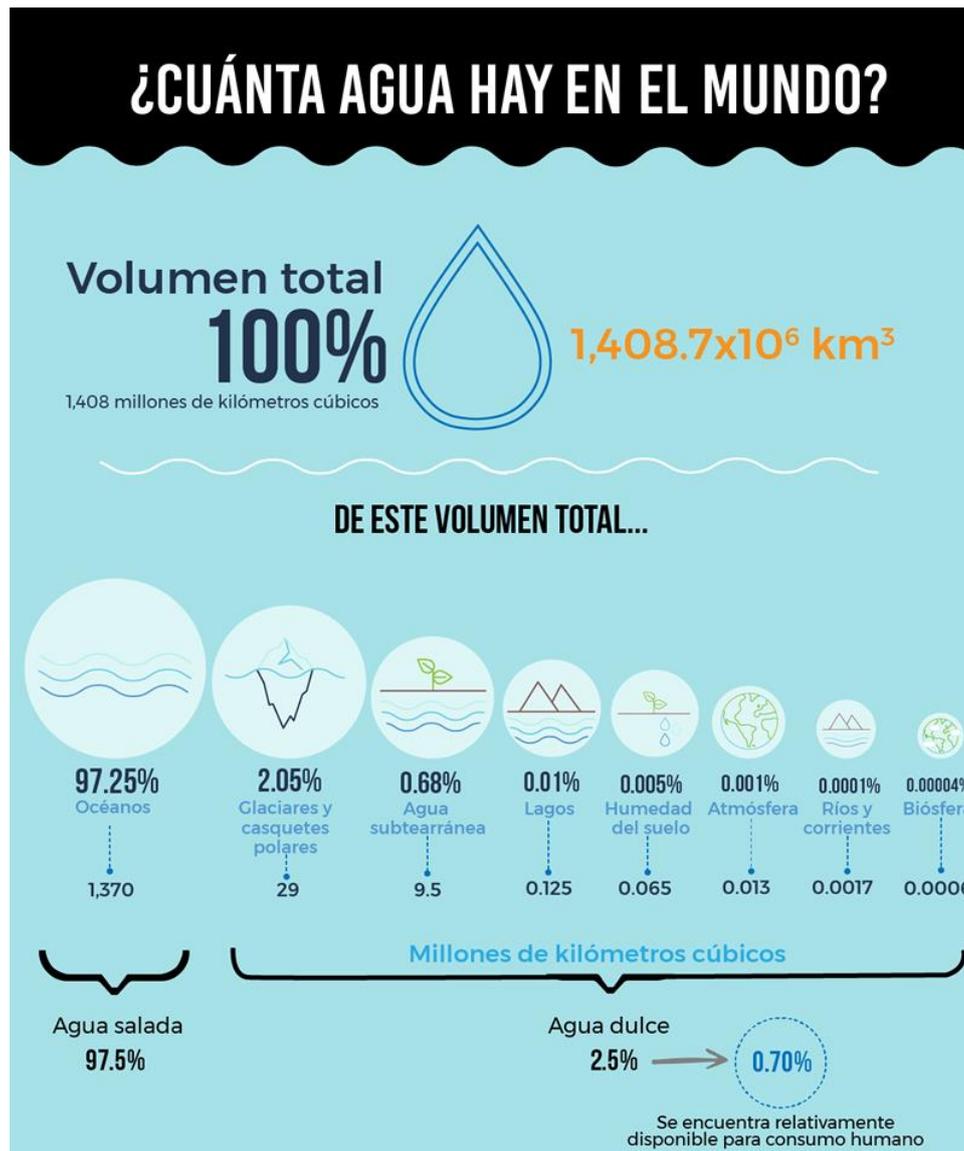


Figura 1-1 Reservas de agua en el planeta (tomada de EdX Tecnológico de Monterrey)

El agua salada de los océanos es de difícil aprovechamiento para consumo humano debido, principalmente, a los elevados costos de tratamiento que, aunque se van reduciendo sostenidamente, aún no permiten considerar que la desalinización sea una alternativa competitiva a la potabilización de agua dulce superficial (se mantienen en el orden de 10 veces más que los costos operativos de la potabilización por métodos convencionales). Cuando se toma agua bruta de cuerpos de salinidad muy variable, se incorporan mayores dificultades en la operación de este complejo tratamiento.

Las grandes reservas de agua subterránea se encuentran a profundidades a las que es muy difícil y oneroso acceder. Si a esto se suma su lenta renovación, en la práctica las aguas subterráneas deberían considerarse como un recurso no renovable ya que, en caso de sobreexplotación, su lenta recuperación conduciría a la reducción de la disponibilidad del recurso en el corto y mediano plazo.

En la Tabla 1-1 se cuantifican volúmenes y porcentajes de agua en diferentes situaciones en nuestro planeta. También se presentan tiempos medios de renovación, a meros efectos comparativos.

Tabla 1-1. Distribución del agua en el planeta Tierra (datos UNESCO)

Situación del agua	Volumen en km ³		Tiempo medio de renovación	Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada		Del agua dulce	Del agua total
Océanos y mares	-	1.338:000.000	2.500 años	-	96,5
Casquetes y glaciares polares	24:064.000	-	9.700 años	68,7	1,74
Agua subterránea salada	-	12:870.000	1.400 años	-	0,94
Agua subterránea dulce	10:530.000	-		30,1	0,76
Glaciares continentales, permafrost	300.000	-	10.000 años	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91.000	-	17 años	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85.400		-	0,006
Humedad del suelo	16.500	-	1 año	0,05	0,001
Humedad atmosférica	12.900	-	8 días	0,04	0,001
Embalses	11.470	-		0,03	0,0008
Ríos	2.120	-	16 días	0,006	0,0002
Agua en los seres vivos	1.120	-	Algunas horas	0,003	0,0001
Total	≈ 35:000.000	≈ 1.351:000.000		100	100
Total de agua en la Tierra	1.386.000.000				

1.2. El agua como factor ambiental

El agua pura (H₂O) es un *líquido incoloro, inodoro, insípido y transparente*. Sin embargo, es prácticamente imposible encontrarla en ese estado de pureza en la Naturaleza. Esto se asocia con que es un *disolvente universal*: es el líquido que disuelve más sustancias orgánicas e inorgánicas, por lo que muchas de las sustancias, materiales y organismos que son transportados por ella, de hecho se integran a su composición. Aunque es un disolvente universal, el agua es químicamente *muy poco reactiva. Tampoco se sintetiza ni se disocia fácilmente*.

Su ciclo se da en forma naturalmente equilibrada y *las tres fases –líquida, gaseosa y sólida- se presentan en forma natural y abundante en la biósfera*. Aun si pueden coexistir los tres estados físicos, su *alto calor específico* y su *elevado punto de ebullición* hacen que se presente mayoritariamente en estado líquido. Esas dos características contribuyen a que actúe como *elemento moderador del clima* en zonas costeras.

Algunas otras propiedades del agua que están sin dudas relacionadas con su importancia como factor ambiental, se mencionan en lo que sigue. El hecho de que su *densidad máxima* ocurra *en la fase líquida (a 4 °C)* permite que el hielo flote en los cuerpos de agua que se congelan superficialmente, por lo que los procesos biológicos en el cuerpo de agua no se interrumpen cuando esto sucede.

La *capacidad de penetración de la luz* en el agua -distinta para cada longitud de onda- hace que no sólo varíe la cantidad sino también el tipo de luz que llega a diferentes profundidades, condicionando las formas de vida que pueden desarrollarse. La capa superior de un cuerpo de agua, en la que la luz solar es capaz de penetrar se designa como “zona fótica”; se asocia con la zona en que es posible la vida de organismos fotosintéticos.

Otro aspecto que vale la pena mencionar por su importancia ambiental es la *elevada tensión superficial* que tiene el agua. La tensión superficial es la energía requerida para expandir o penetrar

una superficie líquida y es más alta para los líquidos que poseen atracciones intermoleculares fuertes. Depende de la polaridad de sus moléculas y el número de puentes de hidrógeno. El agua tiene una gran tensión superficial debido a sus enlaces de hidrógeno. La tensión superficial es muy importante en los mecanismos de intercambio de sustancias con el agua. Es la causa por la que el polen, polvo, etc. se mantienen en la superficie de ésta. También controla la elevación por capilaridad. Existen sustancias que son depresoras de la tensión superficial, como los detergentes, jabones, etc., que aumentan el efecto humectante del agua. Por ejemplo, el jabón reduce a aproximadamente un tercio la tensión superficial del agua; esto permite que el agua se difunda sobre una superficie y la humedezca, facilitando la limpieza de diversos objetos, como la vajilla y la ropa.

Como elemento *imprescindible para la Vida*, condiciona el desarrollo de los organismos tanto terrestres como acuáticos, elementales o superiores. Su proximidad ha sido históricamente condición fundamental para el desarrollo de la vida humana, definiendo originalmente los lugares preferenciales de asentamiento de las comunidades. De ese modo, se podía contar con el agua necesaria para las personas, a la vez que con un vehículo para alejar rápidamente los efluentes allí generados.

1.3. El agua como recurso

Se habla del agua como *recurso* cuando se le asigna un valor de mercado, un precio –sea este precio potencial o real, directo o indirecto-.

1.3.1. Renovabilidad

Si bien el ciclo hidrológico es un ciclo naturalmente bastante ágil y equilibrado, el recurso “agua dulce” no es ilimitado. Las intervenciones humanas han venido afectando sostenidamente tanto la cantidad como la calidad de las aguas que son explotables con tecnologías y costos razonables.

En la Tabla 1-1 se presentan tiempos medios de renovación del agua en diferentes condiciones. Solamente las aguas superficiales, la humedad del suelo y de la atmósfera y las aguas que forman parte de los seres vivos, son verdaderamente renovables.

1.3.2. Disponibilidad

Como consecuencia de la superpoblación mundial y de las demandas crecientes de la agricultura y la industria, los recursos hídricos son objeto de presiones crecientes, no sólo para incrementar la producción de alimentos con el fin de sostener la alimentación de la humanidad.

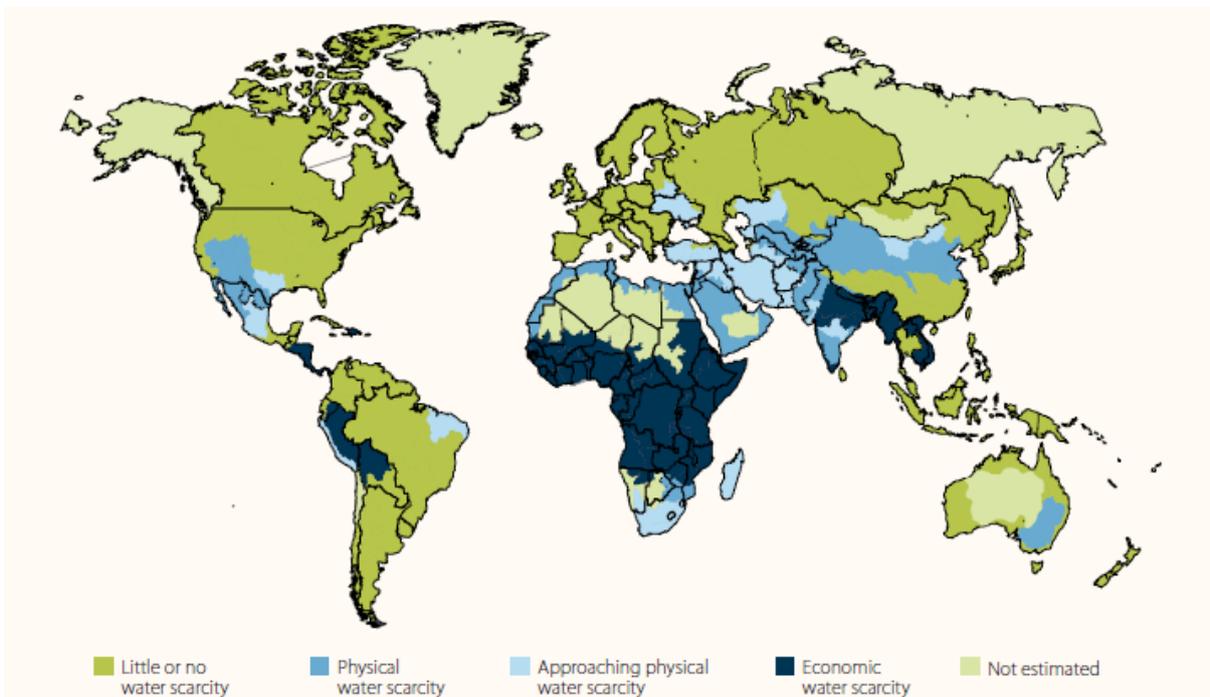
A su vez, la esperanza de vida ha crecido muy significativamente en buena parte de los países –quizás a veces sin que las sociedades se plantearan las posibles diferencias entre conceptos tales como longevidad y calidad de vida-. Así, la disponibilidad de agua dulce per cápita se reduce paulatinamente a nivel mundial por lo que, en el marco de la búsqueda de la sostenibilidad en las formas de desarrollo humano, el uso eficiente del agua es un tema central (Tabla 1-2).

La reducción de la disponibilidad de agua dulce per cápita no se relaciona solamente con el incremento de la población mundial sino con la sobreexplotación y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. En el caso de las aguas subterráneas, es frecuente que la explotación se realice con una tasa de extracción muy superior a la de renovación.

Tabla 1-2. Recursos hídricos renovables y disponibilidad teórica de agua por continente (tomado de UNESCO)

Continente	Área, en 10 ³ km ²	Población, en 10 ³ habitantes	Recursos hídricos, en km ³ /año			Disponibilidad teórica de agua	
			Media	Máximo	Mínimo	Por 10 ³ km ² /año	Por 10 ³ hab./año
Europa	10,46	685	2.900	3.410	2.254	277	4,23
América del Norte	24,3	453	7.890	8.917	6.895	324	17,4
África	30,1	708	4.050	5.082	3.073	134	5,72
Asia	43,5	3445	13.510	15.008	11.800	311	3,92
América del Sur	17,9	315	12.030	14.350	10.320	672	38,2
Australia y Oceanía	8,95	28,7	2.404	2.880	1.891	269	83,7
En el mundo	135	5.633	42.785	44.751	39.775	317	7,60

En el caso de las aguas superficiales, a la extracción para riego, potabilización o usos industriales se agregan las alteraciones en el ciclo hidrológico que se asocian con el cambio climático y las modificaciones locales en la escorrentía debido a intervenciones humanas. En la Figura 1-2 y la Figura 1-3 se muestra la distribución geográfica del agua en el planeta, en términos de su escasez actual y futura.



Referencias:

Escasez menor o inexistente: Recursos hídricos abundantes en relación a su uso, con extracción inferior al 25 % del agua de los ríos para fines humanos.

Escasez física de agua (el desarrollo de los recursos hídricos está próximo a exceder o excede los límites de sostenibilidad): Más del 75 % del caudal de los ríos se extrae para fines agrícolas, industriales y domésticos. Esto apunta a que la escasez de agua no necesariamente es una escasez física sino que también se asocia con sobreexplotación.

Próximo a la escasez física de agua. Se extrae más del 60 % del caudal de los ríos. Estas cuencas experimentarán escasez física de agua en el futuro cercano.

Escasez económica de agua (el capital humano, institucional y financiero limitan el acceso al agua, a pesar de que el agua en la naturaleza está disponible localmente para satisfacer las demandas humanas). Los recursos hídricos son abundantes en relación con su uso; la extracción con fines humanos es menor que el 25 % del caudal de los ríos.

Figura 1-2 Escasez de agua en la Tierra (según UNESCO, 2014)

Además de la extracción de aguas y la modificación en los coeficientes de escorrentía, debe agregarse una tercera forma de intervención del hombre que afecta en forma adversa la disponibilidad de agua dulce per cápita: se trata de la contaminación de los cuerpos de agua. En

efecto, el uso de un cuerpo de agua como receptor de ciertas descargas puede hacer inviable su empleo para otros usos más nobles como la potabilización con métodos convencionales, el riego o la recreación por contacto directo. Asimismo, el vertido de residuos sólidos en las riberas de los cursos de aguas puede generar conflictos con el potencial uso paisajístico o de recreación de la zona en cuestión.

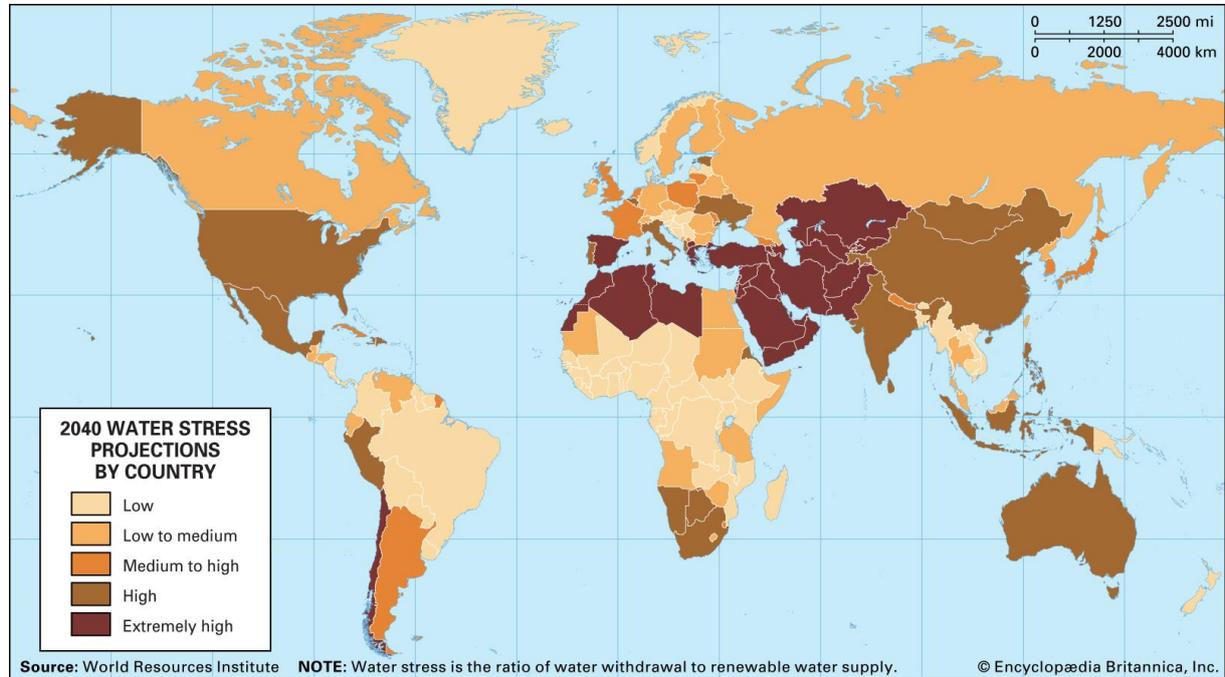


Figura 1-3 Proyecciones de estrés hídrico por país en el año 2040 (según Encyclopædia Britannica)

1.3.3. Usos

El concepto de *uso del agua*, como la mayoría de los temas ambientales, tiene una visión fuertemente antropocéntrica. Los usos del agua se definen en función de dar satisfacción a las necesidades o intereses humanos. Las características deseables de un agua dependen del uso –en sentido amplio- que se plantee ejercer sobre ella; así, el agua para consumo humano deberá cumplir con requisitos más estrictos que el agua para navegación.

Se pueden encontrar diferentes clasificaciones de los usos del agua. Una de las más sencillas permite identificar tres grandes familias: usos de quita, usos in situ y usos como cuerpo receptor.

- **Usos de quita:** Implican retirar el agua de su fuente para ser utilizada. Los usos de quita principales son: para potabilización (en nuestro país está reconocido como el uso de mayor jerarquía y tiene prioridad sobre todos los demás); para riego (cuantitativamente es el mayor uso de quita en nuestro país); para uso industrial; para refrigeración. En Uruguay los usos de quita sobre cuerpos de agua deben ser autorizados por la DINAGUA (Dirección Nacional de Agua del Ministerio de Ambiente).

Los usos de quita se pueden clasificar en **usos consuntivos** y **usos no consuntivos**. Los usos no consuntivos son los que no implican un consumo; el agua se devuelve al curso, aunque puede no ser en el mismo lugar o en las mismas condiciones. Usos no consuntivos son, por ejemplo, la generación de energía o la refrigeración en circuito abierto.

- **Usos in situ:** Se realizan directamente en el cuerpo de agua. Entre otros, incluyen recreación por contacto directo, deportes náuticos, abrevadero, explotación hidrobiológica (deportiva o industrial), navegación, transporte, generación hidroeléctrica.
- **Uso como cuerpo receptor:** Si bien se trata de un uso in situ, se suele separar de ellos por sus características. El uso de un cuerpo de agua como receptor implica el vertido de efluentes al mismo. Es muy frecuente que los cuerpos de agua actúen, además de como receptores de efluentes líquidos, también como receptores de residuos sólidos y de lixiviados de fuentes difusas como la agricultura. Para usar un cuerpo de agua como cuerpo receptor de un vertido puntual, se debe tramitar una autorización de desagüe ante la DINACEA (Dirección Nacional de Control y Evaluación Ambiental). Los requisitos de calidad que deben cumplir los vertidos dependen del a dónde se efectúen y están previstos en la normativa vigente (Decreto 253/979 y sus actualizaciones, cuyo texto consolidado se adjunta en Anexo).

En Uruguay, el 98 % del volumen anual autorizado para usos de quita corresponde a aguas superficiales. A su vez, el principal destino de esas aguas superficiales es el riego agrícola, que en 2019 implicó el 80 % de los volúmenes anuales autorizados. Las tomas de aguas superficiales para consumo humano representaron el 2,6 % de los volúmenes extraídos en ese año y los usos no consuntivos, el 1,13 % (ver Figura 1-4).



Figura 1-4 Usos de quita en Uruguay en 2019. Extraído de DINAGUA (2019)

1.3.4. Dotación

Por lo general, las necesidades de agua que impone un cierto uso se suelen expresar como valores específicos a alguna característica fácil de identificar y cuantificar de la actividad o uso: litros por persona, litros por litro de leche procesado, metros cúbicos por hectárea, entre tantos posibles ejemplos. Ese tipo de expresiones y sus valores reciben el nombre de **dotación**. Algunas dotaciones usuales se indican en la Tabla 1-3.

En la Figura 1-5 se muestra información aproximada sobre algunos consumos domésticos, tanto de artefactos como de algunas actividades.

Tabla 1-3. Algunos valores de dotaciones de agua potable

Uso	Consumo / Dotación
Consumo humano para supervivencia	2 L/día
Consumo de agua en viviendas rurales	50 a 75 (L/hab)/día
Consumo de agua en ciudades medianas	100 a 150 (L/hab)/día
Consumo de agua en viviendas de alto confort	250 a 400 (L/hab)/día
Volumen mínimo reglamentario de una cisterna elevada (Montevideo)	10 L/descarga
Volumen usual de una cisterna empotrada	13 L/descarga
Volumen usual de una cisterna mochila	6 L/descarga
Riego de arroz en Uruguay	12.000 a 15.000 m ³ /há/zafra
Riego de soja en Uruguay	7.000 m ³ /há/zafra
Limpieza de grandes superficies comerciales	5 L/m ²
Lavado manual de un automóvil	50 L/auto
Producción de 1 litro de leche envasada	10 L/L
Producción de 1 L de cerveza	24 L/L
Producción de 1 kg de carne vacuna procesada	10 L/kg

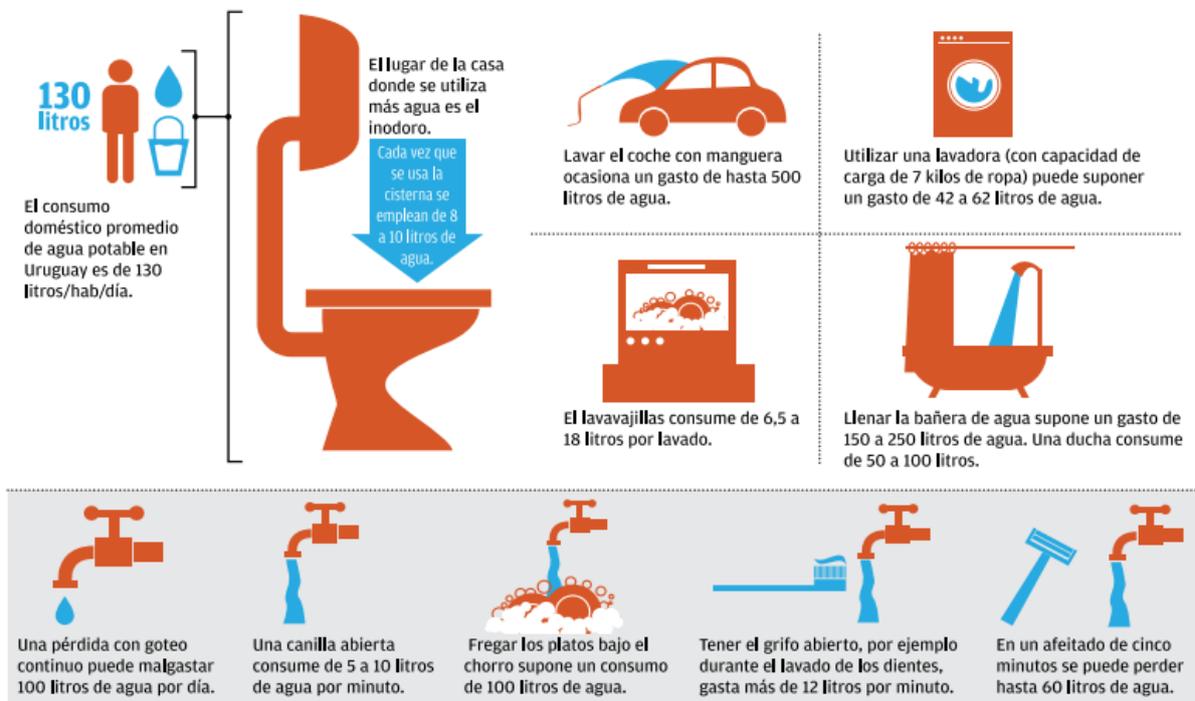


Figura 1-5 Consumo aproximado de algunos artefactos / actividades domésticas (imagen publicada por diario El Observador)

1.3.5. Huella Hídrica

Un concepto más actual es el de **huella hídrica** (HH) (que no es idéntico al de **huella de agua**, como se especificará más adelante). Fue acuñado en Holanda en el año 2002, por parte del Dr. Arjen Hoekstra, con la intención de evidenciar los consumos de agua “ocultos” que están detrás de cada bien, alimento o servicio que se produce. Desde entonces, este concepto ha sido difundido, por la organización Water Footprint Network (WFN). Para comprender mejor el concepto de HH, la WFN propone una metodología en la que clasifica la HH en tres colores: azul, verde y gris, con el fin de contabilizar el agua de uso directo e indirecto, como se esquematiza en la Figura 1-6.

La huella hídrica es el volumen total de agua dulce usado para producir un bien o servicio, medido a lo largo de toda la cadena de suministros. El uso de agua se mide en el volumen de agua consumida,

evaporada o contaminada, ya sea por unidad de tiempo para individuos y comunidades, o por unidad de producción para el sector productivo.

La designación de *huella de agua* es la que se emplea en la Norma ISO 14.046:2013; aunque el concepto es similar al de huella hídrica, se estila hablar de huella de agua únicamente cuando se aplica la metodología ISO para calcularla. Para ello, se puede recurrir a las bases de datos que se utilizan, por ejemplo, en Análisis de Ciclo de Vida.

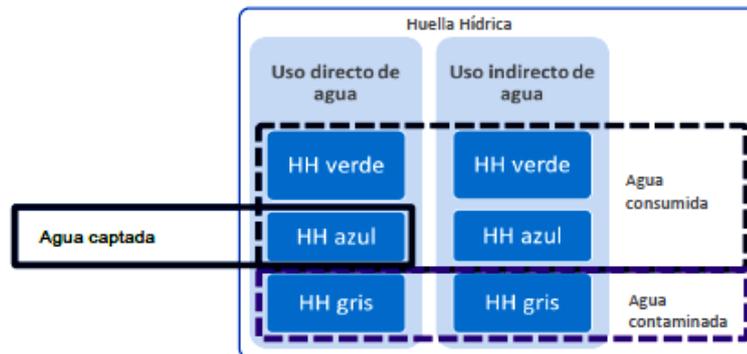


Figura 1-6 Huella hídrica según WFN (tomada del Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica)

La huella hídrica integra tres componentes, que se conocen como huella azul, huella verde y huella gris. A grandes rasgos:

- La huella hídrica **azul** se refiere al agua que se consume directamente, proveniente de fuentes superficiales o subterráneas, naturales o artificiales. El *consumo* se refiere a la pérdida de agua del cuerpo de agua superficial disponible en una zona de captación. Las pérdidas ocurren cuando el agua se evapora, regresa a otra zona de captación o al mar o se incorpora a un producto.
- La huella hídrica **verde** considera el agua pluvial que se incorpora a un producto o que se evapora en un proceso productivo. Tiene interés en cultivos o áreas verdes, pues en esencia es el agua que queda disponible en el suelo para ser usada por los vegetales. Es decir, la huella hídrica verde es agua de lluvia, en la medida en que no escurra.
- La huella hídrica **gris** cuantifica la cantidad de agua necesaria para que los efluentes líquidos alcancen el medio receptor con características compatibles con éste desde el punto de vista de la normativa de aplicación; se suele cuantificar como la cantidad de agua de dilución que sería necesaria para lograrlo.

Al tener las tres huellas en las mismas unidades (son volúmenes de agua) es posible visualizar cuál de ellas es la más representativa y, a partir de esto, se pueden definir acciones dirigidas a los puntos más críticos. Esta es la razón por la cual *se recomienda no sumar las tres huellas*, pretendiendo tener un solo valor de huella hídrica y sí hacer el análisis independiente de cada una de ellas, de forma que se pueda analizar la información asociada a cada color de huella y sus respectivos impactos.

El principal objetivo de la determinación de cualquier huella hídrica es lograr entender e integrar la huella hídrica y sus conceptos básicos al balance hídrico de un proceso, un producto, un consumidor o una zona geográfica. Según la WFN, los resultados de huella hídrica pueden emplearse para informar la estrategia hídrica de una empresa (en el caso de un producto) o tratar de incidir sobre los patrones de consumo de una población. La metodología propuesta por la WFN se puede aplicar a

medir la HH de un proceso, un producto, un consumidor, un grupo de consumidores, una cuenca o un área geográfica delimitada.

Para productos, la huella hídrica se define como el volumen de agua dulce que se consume directa o indirectamente para la producción de este, por lo tanto, se divide en huella hídrica azul, verde y gris (Hoekstra et.al, 2011).

Para calcular las huellas hídricas de un año de vida en determinado país, se debe calcular el volumen directo de agua consumida por una persona y el volumen indirecto asociado al consumo de bienes y servicios. Algunos valores de huellas hídricas se presentan en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4. Algunos valores de huella hídrica (tomados de fuentes diversas)

	Huella Hídrica
1 kg de carne vacuna procesada	16 m ³ /kg
1 kg de queso	5 m ³ /kg
1 kg de chocolate	17 m ³ /kg
1 kg de papas	287 L/kg
1 kg de tabaco	2.925 L/kg
1 kg de arroz	3.400 L/kg
1 kg de trigo	1.300 L/kg
1 kg de pasta seca	2.000 L/kg
1 L de leche	99 L/L
Una taza de café	140 L/taza
Un vaso de vino	117 L/vaso
Una jarra de cerveza	76 L/jarra
1 camiseta de algodón	2.500 L/unidad
1 pantalón vaquero	10.000 L/unidad
1 año de vida en China	1.071 m ³ /año/persona
1 año de vida en España	2.461 m ³ /año/persona
1 año de vida en USA	2.842 m ³ /año/persona

Determinación de la Huella Hídrica

Para la cuantificación de la Huella Hídrica, se deben planificar y realizar dos etapas: la recolección de datos y la aplicación de formas de cuantificación de la HH. Por ejemplo, para cuantificar la HH desde el enfoque de consumidor se aplica una metodología que no es idéntica a la que se utiliza desde el enfoque de producción. Obtener los datos a considerar es la etapa que mayor tiempo demanda, por lo cual se recomienda planificar esta etapa con márgenes de tiempo amplios.

Se deben identificar las fuentes de datos de las que se pueda obtener la información más confiable posible, para cada sector y cada tipo de HH. Asimismo, se debe identificar fuentes bibliográficas que respalden los datos obtenidos y permitan estimar datos faltantes.

Algunas fuentes usuales para obtener los datos necesarios para la evaluación de la HH se indican en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5. Información necesaria para cada tipo de Huella Hídrica evaluada (adaptada del Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica)

Huella Hídrica	Información	Fuente	Forma de estimación
Azul	Facturación mensual de agua (m ³)	Facturas mensuales por consumo de agua potable y saneamiento	Consumo per cápita
	Identificación y uso de fuentes por parte de los involucrados	Encuestas a los involucrados y visitas	Valores promedio de evaluaciones anteriores, tomando en cuenta los consumos del proceso que se evalúa
	Uso de agua en procesos operativos, así como el porcentaje de evaporación e incorporación	Datos propios de la unidad y visitas y datos bibliográficos (WFN)	Características estándar de las actividades tomadas en cuenta. Características técnicas de los equipos utilizados
Gris	Concentración de parámetros de interés en el afluente.	Datos monitoreados por OSE / URSEA. Resultados de análisis de laboratorio, datos bibliográficos.	Datos bibliográficos de calidad de agua potable. Concentraciones en agua potable en ciudades con características similares
	Concentración de parámetros de interés en el efluente	Resultados de análisis de laboratorio, datos bibliográficos	Datos bibliográficos de calidad de efluentes en casos similares
	Concentración máxima de parámetros de interés establecida en la normativa vigente	Normativa local en materia hídrica	Valores de otros países que tengan similitud con la normativa de nuestro país
	Concentración natural de parámetros de interés en el afluente	Informes de monitoreo en la cabecera de la cuenca evaluada, resultados de análisis de laboratorio	Concentración de parámetros establecidos por referencias bibliográficas o estudios locales
Verde	Superficie cubierta por áreas verdes	Datos del Gobierno departamental o municipal	Datos locales de superficie de áreas verdes en años anteriores. Información sobre el crecimiento o reducción de áreas verdes.
	Tipo de cobertura de áreas verdes	Datos del Gobierno departamental o municipal	Dependiendo de las características de la superficie, se puede asumir un porcentaje de cobertura de pasto y arbustos. Por ejemplo, en canchales centrales de avenidas, la cobertura será 90 % pasto y 10 % de arbustos y flores.
	Base de datos de CROPWAT (software libre de FAO)	CROPWAT (FAO)	El programa CROPWAT presenta una base de datos con información acerca de un amplio conjunto de cultivos. También se pueden utilizar datos de evaluaciones anteriores
Indirecta	Consumo de materiales por parte de las unidades involucradas.	Datos de las unidades involucradas (cantidad de personas involucradas, etc.)	
	Equivalentes HH para materiales consumidos.	Base de datos de Water Footprint Network WFN	

Huella Hídrica Azul

La HH Azul se define de la siguiente forma:

$$\text{HH Azul} = (\text{Agua Incorporada}) + (\text{Agua Evaporada})$$

Es decir, se contempla el volumen de agua que se incorpora y que se evapora a lo largo de todo el proceso. Si se conocen los volúmenes de incorporación y evaporación, esta ecuación puede utilizarse para cuantificar la HH Azul. Sin embargo, en el caso de la mayoría de las unidades no se tienen los datos exactos del volumen de agua incorporada o evaporada, por lo que se suele obtener como:

$$\text{HH Azul} = (\text{Agua tomada}) - (\text{Agua reintegrada})$$

Donde:

Agua tomada es el volumen de agua que ingresa en la actividad evaluada

Agua reintegrada es el volumen de agua que retorna al sistema sin modificar su calidad

Huella Hídrica Gris

Según su definición, la huella hídrica gris debe cumplir que, multiplicada por la diferencia entre el estándar para el cuerpo receptor y la concentración natural del contaminante en ese curso, debe devolver el valor de la carga contaminante vertida:

$$L = (HH\ Gris) \times (C_{m\acute{a}x} - C_{nat})$$

Dicho de otro modo, a partir de la expresión anterior se obtiene la siguiente:

$$HH\ Gris = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}}$$

Donde:

- L es la carga del contaminante (masa/tiempo)
- $C_{m\acute{a}x}$ es la concentración máxima admisible dada por normativa (masa/volumen)
- C_{nat} es la concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (masa/volumen)

En el caso de fuentes puntuales de contaminación del agua, esto es, cuando sustancias químicas son vertidas en un cuerpo de agua superficial en una ubicación específica, la carga puede ser calculada como el caudal del efluente (Q_{Efl} , volumen/tiempo) multiplicado por la concentración de contaminante en el efluente (C_{Efl} , masa/volumen). La huella hídrica gris puede calcularse como:

$$HH\ Gris = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} = \frac{Q_{Efl} * C_{Efl}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}}$$

Donde:

- Q_{Efl} es el caudal del efluente vertido (volumen/tiempo)
- C_{Efl} es la concentración del contaminante en el efluente vertido (masa/volumen)
- $C_{m\acute{a}x}$ es la concentración máxima admisible dada por normativa (masa/volumen)
- C_{nat} es la concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (masa/volumen)

Cuando $C_{Efl} = C_{m\acute{a}x}$ la huella hídrica gris es igual a una fracción del volumen efluente. Uno se puede preguntar: ¿por qué hay una huella hídrica gris mayor que cero cuando la concentración en el efluente es igual a la concentración máxima admisible? La respuesta es que parte de la capacidad de asimilación de los contaminantes ha sido consumida.

Cuando $C_{max} = 0$ (caso de un tóxico muy persistente y contaminante, para el cual también $C_{nat} = 0$), cualquier efluente con una concentración mayor que cero daría lugar a una huella hídrica de volumen infinito. Esto se corresponde con una prohibición absoluta de ciertas sustancias en el cuerpo de agua receptor. El caso de $C_{max} = C_{nat}$ conduciría a una huella hídrica infinitamente grande también, pero este caso no ocurre, ya que establecer estándares de vertido con igual concentración que la esperable naturalmente en el cuerpo receptor carece de sentido; no es normal que suceda.

La HH Gris puede medirse para diferentes parámetros de calidad. La HH Gris total será la máxima entre las HH Grises calculadas en base a distintos parámetros.

Esto quiere decir que, si se cuantificara la HH Gris con 3 parámetros P1, P2, P3 y los resultados fueran los siguientes:

$$HH\ Gris_{P1} = X$$

$$HH\ Gris_{P2} = 2X$$

$$HH\ Gris_{P3} = X/2$$

La HH Gris total a informar sería la HH Gris cuantificada con base en el parámetro P2, por ser la mayor de las tres.

Huella Hídrica Verde

Para la cuantificación de la HH Verde, se necesitan los siguientes datos:

- Superficie cubierta por áreas verdes
- Tipo de cobertura (pastos, arbustos, cultivos, etc.)

La HH Verde es el agua de lluvia que los vegetales son capaces de aprovechar, que es la que se mantiene como humedad del suelo o queda en la superficie o del suelo o de los propios vegetales. La fracción de agua de lluvia aprovechable por los vegetales se designa como **precipitación efectiva**.

En un cultivo, la HH verde puede expresarse como:

$$HH\ verde = (\text{Evapotranspiración del cultivo, } m^3/\text{ha}) / (\text{Rendimiento del cultivo, } t/\text{ha})$$

Corresponde establecer que la **evapotranspiración** es la suma del agua que evapora desde el suelo y desde la superficie cubierta por vegetales, más el agua que dichos vegetales transpiran a través de sus hojas. Hay metodologías para obtener los valores tanto de la precipitación efectiva como de la evapotranspiración, que se abordan en otras unidades curriculares de la carrera. También la información acerca de las necesidades de agua de los cultivos está disponible en la bibliografía. A los efectos de la HH verde, se suele asumir que los cultivos de secano incorporan hasta un 70 % de la precipitación efectiva.

Interesa señalar que los aspectos vinculados con la determinación y abatimiento de la huella hídrica seguramente están comenzando a ser encarados por nuestro país, dado que los principales productos de exportación tienen un consumo intensivo de agua (ver Tabla 1-6).

Tabla 1-6. Principales productos de exportación de Uruguay (modificada de Gómez&Inthamoussu, 2019)

Producto	Nivel de consumo de agua	Nivel de impacto en la calidad del agua
Carne vacuna congelada	Intensivo	Muy alto
Lácteos	Intensivo	Alto
Celulosa	Intensivo	Intermedio
Arroz	Intensivo	Intermedio
Soja	Intensivo	Intermedio

Gómez e Inthamoussu (2019) recomiendan institucionalizar la gestión sostenible del agua, y realizan algunas propuestas concretas al respecto:

La institucionalización de la gestión sostenible de agua permite asegurar los niveles mínimos de cumplimiento de las exigencias internacionales en relación con la gestión de agua y su sostenibilidad en el tiempo. El riesgo de no crear mecanismos de institucionalización permite que la continuidad de las estrategias dependa de la voluntad política, la cual puede ser muy variable ya que está sujeta a las autoridades de turno. La institucionalidad de la gestión de agua minimiza este riesgo al crear el marco legal o mecanismos necesarios para su permanencia y progreso en el tiempo.

Algunas formas para institucionalizar la gestión sostenible del agua son:

- *Contar con una Autoridad Nacional del Agua, como en el caso de Perú,*
- *Contar con una etiqueta o sello nacional del cuidado del agua,*
- *Contar con un reglamento o guía técnica nacional que asegure el cumplimiento de las exigencias del mercado internacional,*
- *Tener un departamento estatal que coordine y haga seguimiento del progreso por la gestión sostenible de agua, entre otras.*

Ejemplo de cálculo de Huella Hídrica Gris

Se considera el caso de una planta de tratamiento de efluentes domésticos. Se trata de instalaciones que tienen el objetivo de reducir los contaminantes del agua residual afluyente a la planta, para que el efluente obtenido tenga la calidad adecuada según lo dispuesto por la normativa (en el caso de Uruguay es el Decreto 253/79, cuyo texto se presenta como Anexo en estas notas).

Se supone que la planta de tratamiento sirve a una localidad de 7000 habitantes, donde el uso medio de agua diario es de 150 L/(hab*día). El efluente final de la planta de tratamiento se vierte en un curso de agua. Se quiere calcular la Huella Gris para DBO₅.

La ecuación general para calcular la HH Gris para una fuente puntual de contaminación es la que sigue:

$$HH\ Gris = \frac{Q_{Efl} * C_{Efl}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}}$$

Para calcular el caudal del efluente que se vierte se tiene como dato la dotación de la población y el número de habitantes del poblado. A los efectos de este ejemplo, se simplificarán algunos cálculos que se profundizan en otras unidades curriculares de la carrera. Así, el volumen de agua que entra o sale de la planta a lo largo de un día entero se puede obtener como:

$$Q_{Efl} = Pob * Dot = 7000\ hab * 150 \frac{L}{hab * día} = 1.050.000 \frac{L}{día} = 1.050 \frac{m^3}{día}$$

Para que la concentración de DBO₅ en el efluente vertido sea admisible de acuerdo con la normativa nacional, no puede superar la concentración admitida en el artículo 11 del Decreto 253/79 para vertidos a curso de agua; para DBO₅, el valor máximo admitido es de 60 mg/L, por lo que, a modo de ejemplo, se tomará 50 mg/L para la concentración de DBO₅ del efluente.

Por otro lado, la concentración máxima admisible para el cuerpo de agua depende, en el caso de la normativa de Uruguay, de la clase en la que se clasifica el cuerpo de agua de acuerdo con el artículo 4 del Decreto. Para cuerpos de agua en los que se hacen vertidos de plantas de tratamiento de efluentes no se tiene una clasificación explícita, por lo que para este ejemplo se elige que sea Clase 4, que es la menos exigente. Para esa Clase, la concentración máxima admisible de DBO₅ en el cuerpo de agua receptor es 15 mg/L.

La concentración natural es la que se podría esperar en el curso de agua en ausencia de impactos antropogénicos; esta información puede obtenerse del Observatorio Ambiental Nacional (OAN). Un valor razonable es del orden de 3 mg/L.

Con esto se tiene:

$$HH\ Gris = \frac{Q_{Efl} * C_{Efl}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}}$$

$$HH\ Gris = \frac{1.050 \frac{m^3}{d\acute{a}a} * 50 \frac{mg}{L}}{15 \frac{mg}{L} - 3 \frac{mg}{L}} = 4.375 \frac{m^3}{d\acute{a}a}$$

1.4. El agua como determinante ambiental y social de salud

Los primeros episodios de contaminación de aguas que relata la historia, vinculados por lo general a cierre del ciclo fecal–oral, se originaron por el vertido de excretas humanas. Sin embargo, aunque los problemas de salud pública asociados con contaminación de aguas se conocen desde tiempos inmemoriales, recién a partir de la Cumbre del Milenio realizada en Nueva York en el año 2000 ha habido un retorno a la concepción del saneamiento básico como un asunto prioritario para la calidad de vida de una sociedad.

En 2005 entra en funcionamiento la Comisión sobre Determinantes Sociales de la Salud en el seno de la OMS y tras tres años de trabajo publica el informe titulado: “Comisión sobre Determinantes Sociales de la Salud: Atacar las raíces sociales de las inequidades sanitarias”, en el que se abordan fundamentadamente algunos temas muy sensibles, en discusión por lo menos desde 1987 con la publicación del Informe Brundtland.

En el mencionado Informe de OMS se formulan afirmaciones como las que se transcriben a continuación:

En todo el mundo, las personas que son vulnerables y socialmente desfavorecidas tienen menos acceso a los recursos sanitarios y se enferman y mueren antes que las personas que tienen una posición social más privilegiada. Las disparidades en el ámbito de la salud siguen aumentando a pesar de la riqueza sin precedentes y el progreso tecnológico mundial. La mayor parte de los

*problemas de salud puede atribuirse a las condiciones sociales en las cuales las personas viven y trabajan: esas condiciones se denominan “**determinantes sociales de la salud**”¹.*

*(...) El término “**inequidad**” es el que mejor define esas desigualdades, “como **diferencias** que son **innecesarias** y **evitables**, pero, además, **abusivas** e **injustas**”¹.*

En varios estudios se señala que “una vez superado un límite determinado de crecimiento económico en un país, un crecimiento adicional de la riqueza no se traduce en mejoras en las condiciones sanitarias”. Eso lleva a la conclusión de que “**el factor más importante para explicar la situación sanitaria general de un país no es su riqueza total, sino la manera en que se distribuye**”.

El enfoque de “**determinantes ambientales y sociales de la salud**” ha tomado fuerza y ha promovido métodos de cuantificación de la incidencia de factores sociales y ambientales sobre la salud como por ejemplo la determinación de la “*carga de enfermedad atribuible al ambiente*”, que suele cuantificarse en términos de *años de vida sana perdidos por año* (AVAD, años de vida ajustados por discapacidad, o DALY, *disability adjusted lost years*, por su sigla en inglés).

De acuerdo con este enfoque, el estado de salud de una población está fuertemente condicionado por las características de los factores ambientales –no necesariamente naturales- en los que está inmersa. Por ejemplo, ante la falta de agua bacteriológicamente segura para consumo humano, es esperable la ocurrencia frecuente de enfermedades de transmisión hídrica.

Las enfermedades de transmisión hídrica se asocian, por lo general, con el ciclo fecal – oral (Figura 1-7), aunque existen excepciones; por ejemplo, la “enfermedad de los legionarios” es una enfermedad respiratoria transmitida por *Legionella pneumophila*, que aparece en el agua aerosolizada liberada por el aire acondicionado.

Entre las enfermedades de transmisión hídrica se pueden reconocer enfermedades causadas por bacterias, por virus, por protozoarios y por parásitos.

- Algunas enfermedades bacterianas: cólera, fiebre tifoidea, diarreas, enterocolitis.
- Algunas enfermedades transmitidas por virus: hepatitis A, hepatitis E.
- Algunas enfermedades transmitidas por protozoarios: giardiasis, amebiasis.

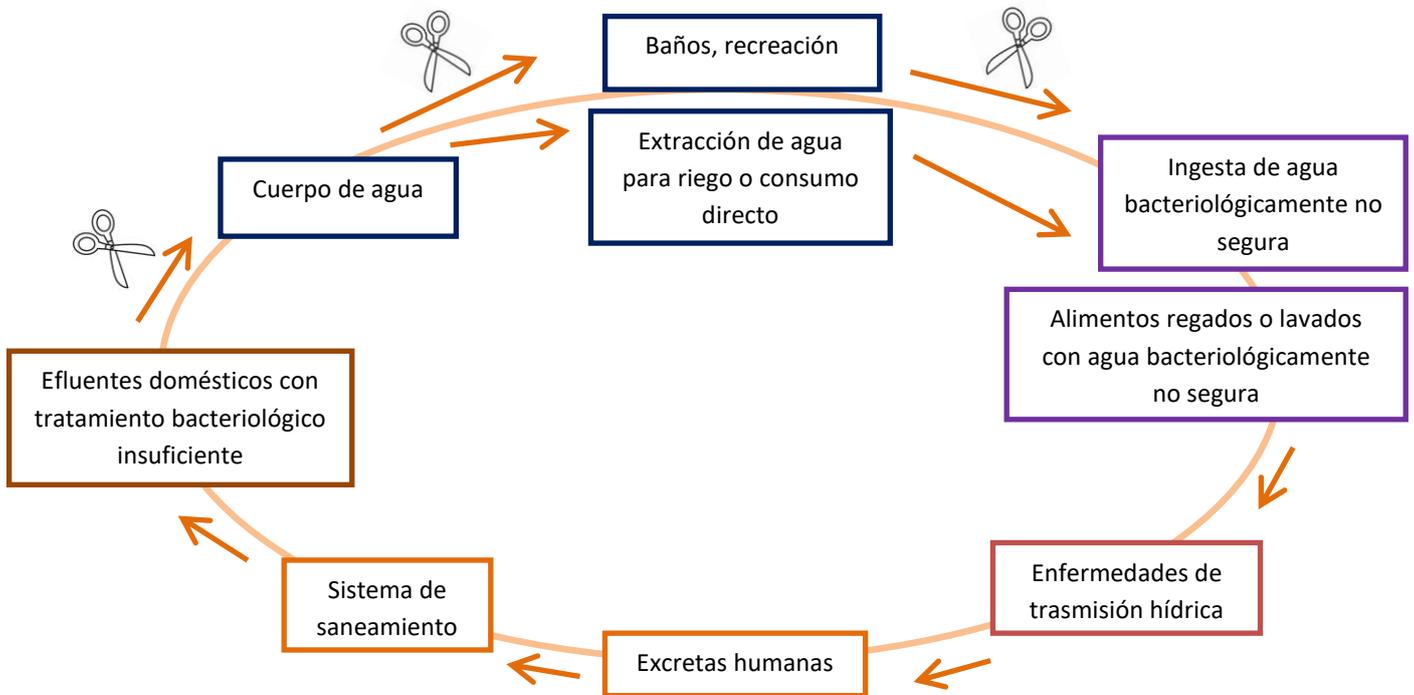
El **ciclo fecal – oral** da cuenta de agentes presentes en las excretas (parte fecal del ciclo) que pueden –potencialmente- regresar al tracto digestivo al ingerir agua o alimentos contaminados (parte oral del ciclo), infectando a quienes los consumen. Algunos de esos agentes se mencionan en la Tabla 1-7.

Las enfermedades vinculadas al ciclo fecal – oral pueden ser prevenidas si se evita que éste se cierre. Para ello, las medidas preventivas principales consisten en:

- Lograr un nivel adecuado de remoción de microorganismos previo al vertido de efluentes al cuerpo receptor.
- Realizar actividades recreativas y tomar baños en playas habilitadas para ello.

¹ Los destacados son nuestros, no aparecen en el original.

- Usar agua *bacteriológicamente segura* para riego de alimentos que se consumen crudos y cuyas partes comestibles pueden tener contacto con el agua de riego (vegetales de hoja verde en general, tomates, frutillas, etc.).
- Consumir agua *bacteriológicamente segura*.



NOTA: Las tijeras indican los principales puntos de corte para evitar el cierre del ciclo fecal-oral: adecuado tratamiento de efluentes, bañarse en playas habilitadas, consumir agua bacteriológicamente segura, regar con agua bacteriológicamente segura

Figura 1-7. Esquema del ciclo fecal – oral. (Elaboración propia)

Tabla 1-7. Agentes de algunas enfermedades bacterianas de transmisión hídrica

	Hábitat natural	Enfermedad que trasmite
<i>Escherichia Coli</i>	Naturalmente muy abundante en el tracto digestivo humano	Diarrea
<i>Shigella dysenteriae</i>	Habita exclusivamente en el intestino humano	Disentería
<i>Salmonella typhi</i>	Habita en el intestino del hombre y de otros animales	Fiebre tifoidea
<i>Vibrio cholerae</i>	Medio acuático	Cólera

La expresión “*agua segura*” se aplica cuando ésta tiene una **calidad compatible con el uso** que se desea hacer de ella, aunque no pueda recibir la designación de agua potable; de hecho, el agua para riego no requiere ser potable, ni tampoco el agua de las playas lo requiere. La expresión “*agua bacteriológicamente segura*” no implica la ausencia de microorganismos, sino que es también un concepto **relativo al uso** que se realizará de esa agua.

Si se trata de agua para consumo humano, para que un agua sea *bacteriológicamente segura* debe estar exenta de microorganismos y por lo general se agrega el calificativo de “*salubre*”. Pero las exigencias de un agua segura desde el punto de vista bacteriológico para recreación por contacto directo o para riego pueden ser más amplias, dado que la ingesta de agua es accidental en el primer

caso y en el segundo, los vegetales se lavan previo a su consumo además de mediar un cierto tiempo entre el riego y el consumo. Por lo tanto, los criterios de uso internacional (y también los estándares de muchos países) consideran que, en esos casos, las aguas pueden ser seguras pese a tener un cierto contenido bacteriológico (acotado).

Las estadísticas indican que las enfermedades infecciosas y parasitarias fueron la principal causa de muerte en Uruguay hasta mediados del siglo XX, hasta que el rol protagónico pasa a las enfermedades del aparato circulatorio (ver Figura 1-8 y Tabla 1.8).

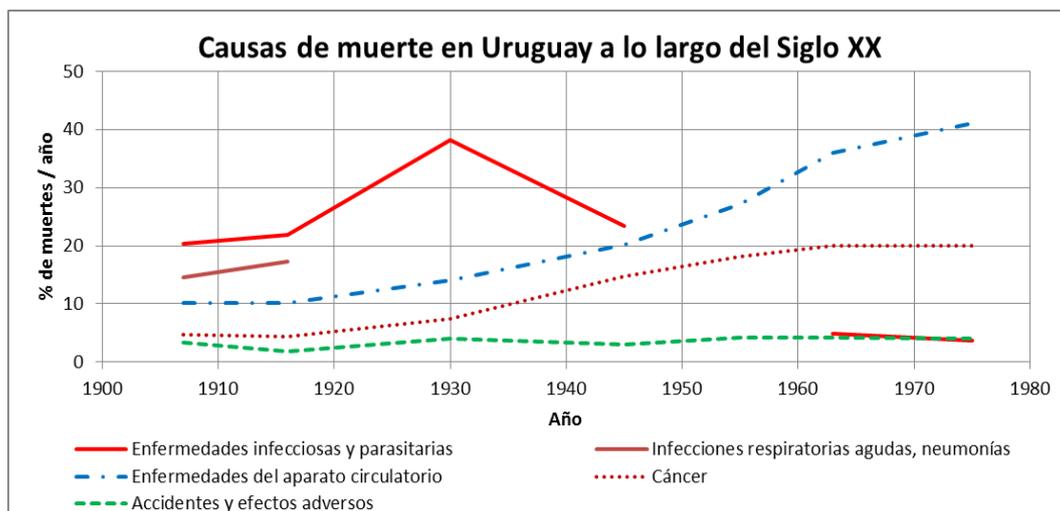


Figura 1-8 Principales causas de muerte en Uruguay en el Siglo XX (a partir de datos de Mieres Gómez, 1995)

Tabla 1.8. Principales causas de muerte en Uruguay, en % de casos (fuentes varias)

Causas \ años	1907	1916	1930	1945	1955	1963	1975	1987	2016	2022
Enfermedades infecciosas y parasitarias	20,4	21,9	38,2	23,4	S/D	4,8	3,7	S/D	2,3	S/D
Infecciones respiratorias agudas, neumonías	14,5	17,3	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	2,5	10,6	10,6
Enfermedades del aparato circulatorio	10,1	10,1	14,1	20,2	27,1	36,0	41,1	39,4	28,1	23,5
Cáncer	4,7	4,4	7,4	14,8	18,1	20,1	20,0	23,6	23,2	20,2
Accidentes y efectos adversos	3,3	1,9	4,0	3,0	4,2	4,2	4,1	5,2	6,9	S/D

También la mortalidad infantil a causa de enfermedades diarreicas tuvo una gran caída más o menos en el mismo período (Figura 1-9). Un dato adicional es que, si bien existía un servicio público de agua potable desde 1875, la Administración de Obras Sanitarias del Estado OSE se crea el 19 de diciembre de 1952.

Mortalidad infantil por diarrea aguda. Tasa por 1000 nacidos vivos (Fuente: MSP, División Estadística)	
Año	Mortalidad por diarrea
1950	17,7
1960	9
1970	5
1980	3,8
1990	1,1
2000	0,20

Figura 1-9. Evolución de la tasa de mortalidad infantil por enfermedad diarreica en Uruguay (1950 – 2000). Tomado de García et al. (2005)

Los agentes patógenos responsables de esta enfermedad en un estudio de 4 años de duración de población infantil atendida en el Hospital Pereira Rossell fueron virotipos de *Escherichia Coli* en casi el 40 % de los casos. Aunque *E. Coli* es la especie dominante de la flora aerobia del tubo digestivo, en diversas circunstancias puede causar enfermedades tales como infecciones abdominales, septicemias, meningitis. Actualmente la cobertura nacional de agua potable es del 98 %, la cobertura media de saneamiento² en el interior es del 63 % y en el área urbana de Montevideo, del 91 %. En la Figura 1-10 y Figura 1-11 se muestra la ubicación de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de efluentes de OSE en todo el país (Fuente: OSE).



Figura 1-10: Ubicación de las plantas potabilizadoras de OSE en todo el país (tomado de www.ose.com.uy)

1.5. Tendencias actuales acerca de la gestión de recursos hídricos

La Agenda 21, resultado de la Conferencia de Río '92 (reconocida por la amplia mayoría de los países del mundo), presenta dos enunciados relevantes en torno a la gestión de calidad de aguas, que no sólo no han perdido vigencia, sino que, con el correr de los años, se van tornando cada vez más imperiosos:

El agua dulce debe considerarse como un recurso finito y vulnerable esencial para mantener la vida, el desarrollo y el ambiente.

El agua debe ser considerada como un bien social y económico con un valor que refleje su uso potencial más valioso.

² Los servicios de agua potable y saneamiento son de responsabilidad de OSE, excepto el saneamiento de Montevideo, que es de competencia de esa Intendencia Departamental.

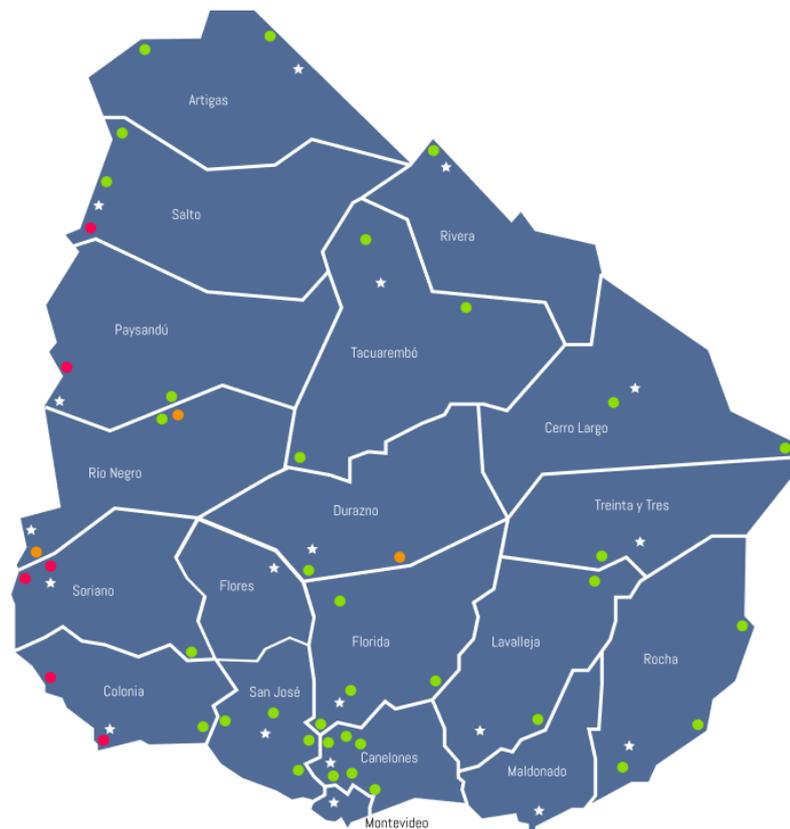


Figura 1-11 Ubicación de las plantas de tratamiento de efluentes de OSE en todo el país (tomado de www.ose.com.uy)

A nivel internacional, los siguientes principios orientadores, que tienen implícitos conceptos de desarrollo y que promueven la definición de políticas realistas y duraderas, han regido los criterios aplicados en las últimas décadas en cuanto a gestión y prevención de la contaminación de los recursos hídricos:

- Establecer los objetivos de calidad de aguas en función de su uso más sensible.
- Proteger las aguas susceptibles de usarse para potabilizar.
- Prevenir la contaminación en vez de tratar sus síntomas.
- Tomar las medidas preventivas o correctivas en el punto más temprano posible (en la fuente, antes que en el medio de propagación, y en este antes que en el receptor).
- Buscar siempre la mejor práctica ambiental.
- Promover el uso de tecnologías apropiadas.
- Ante información científica insuficiente o incompleta, aplicar el principio preventivo.
- Aplicar estándares y reglamentos realistas.
- Internalizar los costos ambientales en las cadenas de producción.
- Considerar instrumentos económicos explícitos (“el que contamina paga”, u otras variantes).
- Equilibrar instrumentos económicos y reglamentarios, para evitar que se opte por pagar en vez de mejorar las prácticas ambientales.

- Aplicar el control de la contaminación del agua en el nivel apropiado más bajo (es el más directo para solucionar los problemas reales).
- Establecer mecanismos para asegurar la coordinación entre los distintos sectores involucrados, aun cuando se consideren que son aparentemente disjuntos.
- Brindar acceso libre y por caminos sencillos a la información disponible.
- Fomentar la participación de todos los interesados.

2. Recursos hídricos en Uruguay

Uruguay tiene una gran fortaleza derivada de su densa red de recursos hídricos superficiales, además de contar con acceso a reservas abundantes de agua subterránea.

2.1. Algunos comentarios generales

2.1.1. Concepto de cuenca

Es una superficie delimitada por puntos altos de la topografía tal que, si esa superficie fuera impermeable, las gotas de lluvia que precipitaran dentro de esa área escurrirían por la superficie hasta el punto de cierre de esa cuenca, que corresponde al punto de menor nivel topográfico de esa área. Las gotas que precipitan fuera de esa área escurren por la superficie de otra cuenca vecina.

2.1.2. Algunos valores medios anuales

Algunos **valores medios anuales** característicos de nuestro país, de acuerdo con series históricas de datos y con su procesamiento, se indican en la Tabla 2.1. Estos valores fueron obtenidos por medio de un **balance hídrico**. Esto significa cuantificar dentro de un volumen de control cómo es la variación del contenido de agua dentro de ese volumen, aplicando la ley de conservación de la masa. Este balance se realizó siguiendo el Modelo de Témez, que permite estimar mes a mes el caudal de escurrimiento superficial de una cuenca dada partiendo de valores mensuales de precipitación y evapotranspiración y teniendo en cuenta los distintos procesos del ciclo hidrológico que pueden influir en una escala temporal de un mes. Los datos que se utilizaron para obtener los resultados del modelo son los registros de las distintas instituciones hidrometeorológicas de Uruguay.

Tabla 2-1. Algunas variables hidrometeorológicas en Uruguay (tomado del Plan Nacional de Aguas)

Variable	Valor medio anual
Precipitación media anual	1311 mm
Evapotranspiración potencial	871,3 mm
Escorrentía	439 mm
Aportación	29.479 m ³ /s
Caudal específico	166,8 L/s.km ²

La **precipitación media anual** es el promedio del acumulado de lluvia que precipita sobre el territorio del país durante todo el año, es decir, la suma de todas las precipitaciones registradas durante un año.

La **evapotranspiración real** es la cantidad de agua que evapora directamente la superficie del suelo más la transpiración desde los tejidos de la vegetación, acumulados a lo largo de todo el año.

La **evapotranspiración potencial** es la cantidad de agua que perdería una superficie completamente cubierta de vegetación, tanto por evaporación desde el suelo como por transpiración de las plantas, si en todo momento hay en el suelo agua suficiente para el crecimiento activo de las plantas.

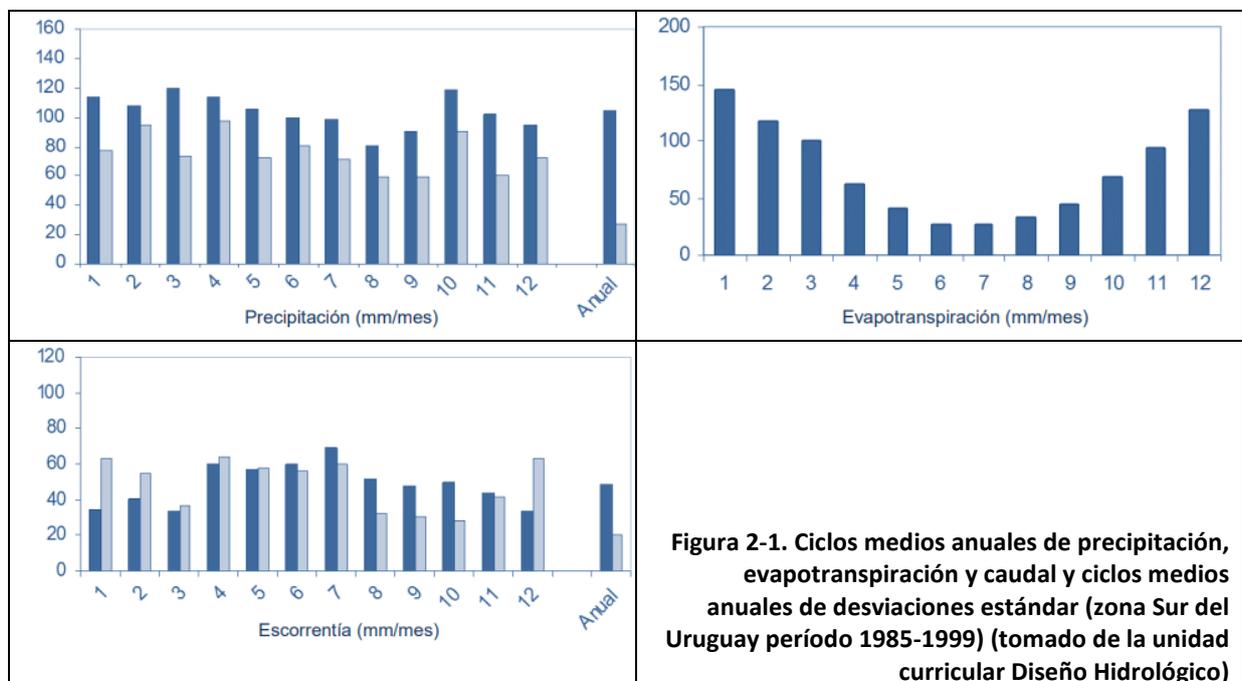
La **escorrentía** es el volumen de agua que circula a nivel superficial como resultado de los aportes de precipitación, aportes subsuperficiales que se incorporan a un cauce natural, así como también aportes subterráneos.

Se designa como **aportación** a la suma de todos los volúmenes de agua que circulan a nivel superficial sobre el territorio del país.

El **caudal específico** es una medida de distribución del volumen total de agua que circula a nivel superficial en el territorio de Uruguay.

Las variables de la primera columna de la Tabla 2.1 son de gran importancia para muchos fines, tales como conocer el agua disponible que se tiene en una cuenca para satisfacer diferentes tipos de demandas (abastecimiento a la población, riego, generación de energía, entre otros); diseñar obras hidráulicas; gestionar de forma correcta el agua disponible; servir de entrada para modelos de predicción de eventos extremos de precipitación; entre muchos otros. Por lo general, interesa conocer estas variables a diferentes escalas espaciales y temporales, en función del fin buscado.

Una forma gráfica de visualizar el comportamiento de estas variables son los **ciclos medios anuales**. Estos corresponden a los promedios de las variables en cada mes del año, de forma que, a priori, se podría esperar un comportamiento regular de las variables en cada mes del año respecto al año anterior. En los gráficos que se muestran a continuación, las columnas de color azul son el promedio de las variables en cada mes y las columnas de color celeste son las desviaciones estándar de la variable.



Como se puede ver, en algunos casos la desviación estándar es del orden de la magnitud de la variable (por ejemplo, para las precipitaciones), lo que significa que el comportamiento de estas

variables no es fácil de predecir. En el caso de las escorrentías, la variabilidad es aún más notoria, lo que hace que haya una incertidumbre muy grande respecto a cuándo se va a poder contar o no con la cantidad suficiente de agua en el futuro.

Por lo tanto, se deben tomar medidas para hacer una buena gestión de los recursos hídricos, como por ejemplo recurrir a la construcción de embalses para asegurar la disponibilidad de agua para ciertos usos. La variable más predecible es la evapotranspiración debido a que en las estaciones de temperatura elevada es cuando se hace mayor, mientras que en los meses de menor temperatura la evapotranspiración disminuye.

2.1.3. Aguas subterráneas

El agua subterránea se extrae de las formaciones geológicas del suelo por medio de perforaciones artificiales con bombas sumergibles. La cantidad de agua que se puede extraer de estas fuentes depende de características del suelo tales como la porosidad, granulometría, tipo de material, entre otras. Estas características permiten clasificar los medios subterráneos de la siguiente manera:

Acuífero: es un estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas y su aprovechamiento en cantidades económicamente apreciables. Los acuíferos se clasifican según la presión a que se encuentra:

- **Acuífero libre:** es el que se encuentra a presión atmosférica.
- **Acuífero confinado o cautivo:** es el que está a una presión mayor que la atmosférica, protegido por una capa *acuiclusa*. El agua ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que la contiene, saturándola completamente. Al perforar su techo, el nivel de agua asciende rápidamente hasta estabilizarse.

De acuerdo con la relación entre ese nivel y el nivel de la boca del pozo se tienen dos tipos: *surgentes* y *artesianos*. Un pozo *surgente* se da en el caso que el acuífero se encuentre a una presión suficiente, tal que el agua mane de la perforación naturalmente. En un pozo *artésiano*, el agua no se eleva naturalmente hasta el nivel de superficie (Figura 2-3).

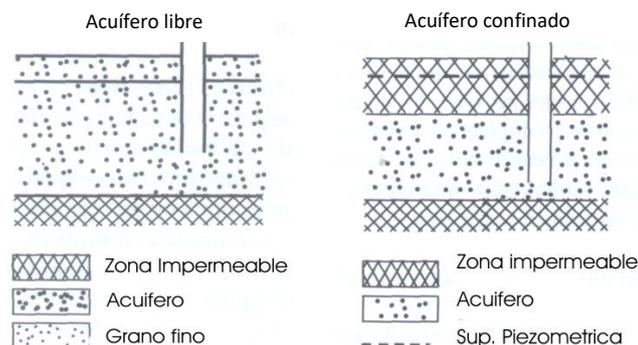


Figura 2-2 Esquema de acuífero libre y confinado (tomado de Tomoyuki)

Acuitardo: es una formación geológica que contiene apreciables cantidades de agua, pero la transmite muy lentamente. Por lo tanto, no es adecuado para ser explotado con fines de extracción de agua.

Acuífugo: es una formación geológica que no contiene agua y no permite el movimiento del agua.

Acuicludo (acuiclusos): es una formación que contiene agua, pero no la trasmite; se comporta como si fuera impermeable.

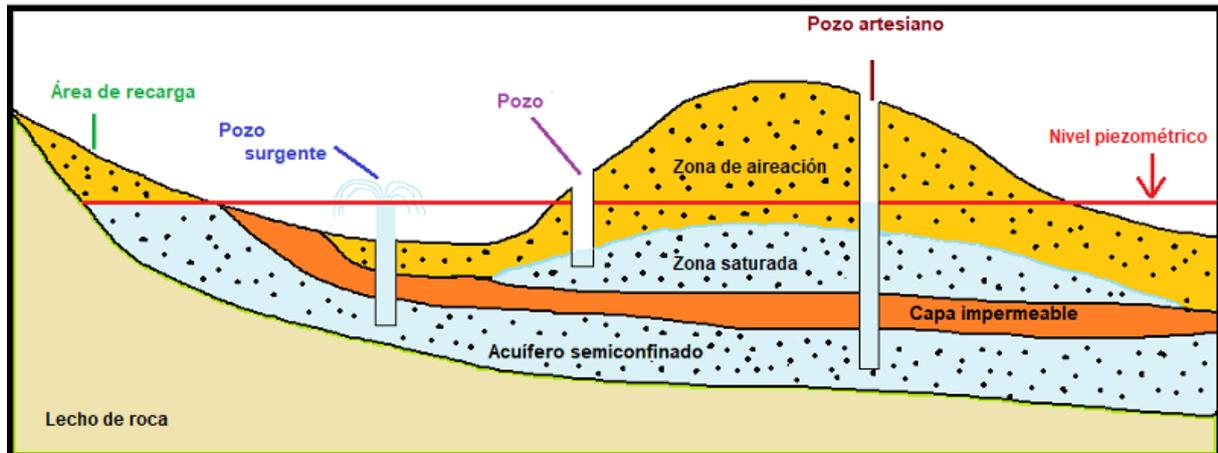


Figura 2-3 Tipos de pozos y acuíferos. Tomado de: Olga Arriaga, en https://edejuntadeandalucia.es/bancorecursos/file/552f3ca5-f395-4d07-a209-8835d443a241/1/es-an_2019020712_9084331.zip/42acuferos_estructura_y_tipos.html?temp.hn=true&temp.hb=true

2.2. Recursos hídricos superficiales

A nivel regional hay tres macrocuencas en las que se distribuye la red hidrográfica del territorio de Uruguay: la cuenca del Río Uruguay, la cuenca de la Laguna Merín y la cuenca del Río de la Plata y su Frente Marítimo, Figura 2-4.

Por otro lado, a nivel nacional las principales cuencas son la cuenca del Río Negro, la del Río Uruguay, la del Río de la Plata, la del Río Santa Lucía, la cual es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la región centro-sur de Uruguay, y la de la Laguna Merín.

La disponibilidad de agua de recursos superficiales se determina de acuerdo al caudal específico y el grado de afectación por tomas directas de extracción en cursos principales. Un mapa esquemático de la disponibilidad de agua superficial se muestra en la Figura 2-5.

En el año 2012 había 1300 embalses para acumulación de aguas pluviales registrados.

2.3. Recursos hídricos subterráneos

Además de los recursos superficiales, se deben mencionar las aguas subterráneas, las cuales no son independientes de los cuerpos de agua superficiales, ya que los pueden recargar a los otros y viceversa.

La extracción de agua subterránea tiene algunos beneficios tales como:

- Necesita menos tratamiento de potabilización que el agua superficial en general.
- Las perforaciones no tienen grandes complejidades y son relativamente económicas.
- Los reservorios de agua subterránea son más estables en el tiempo que los de agua superficial.
- No se necesitan grandes conducciones por medio de tuberías para obtener el agua.

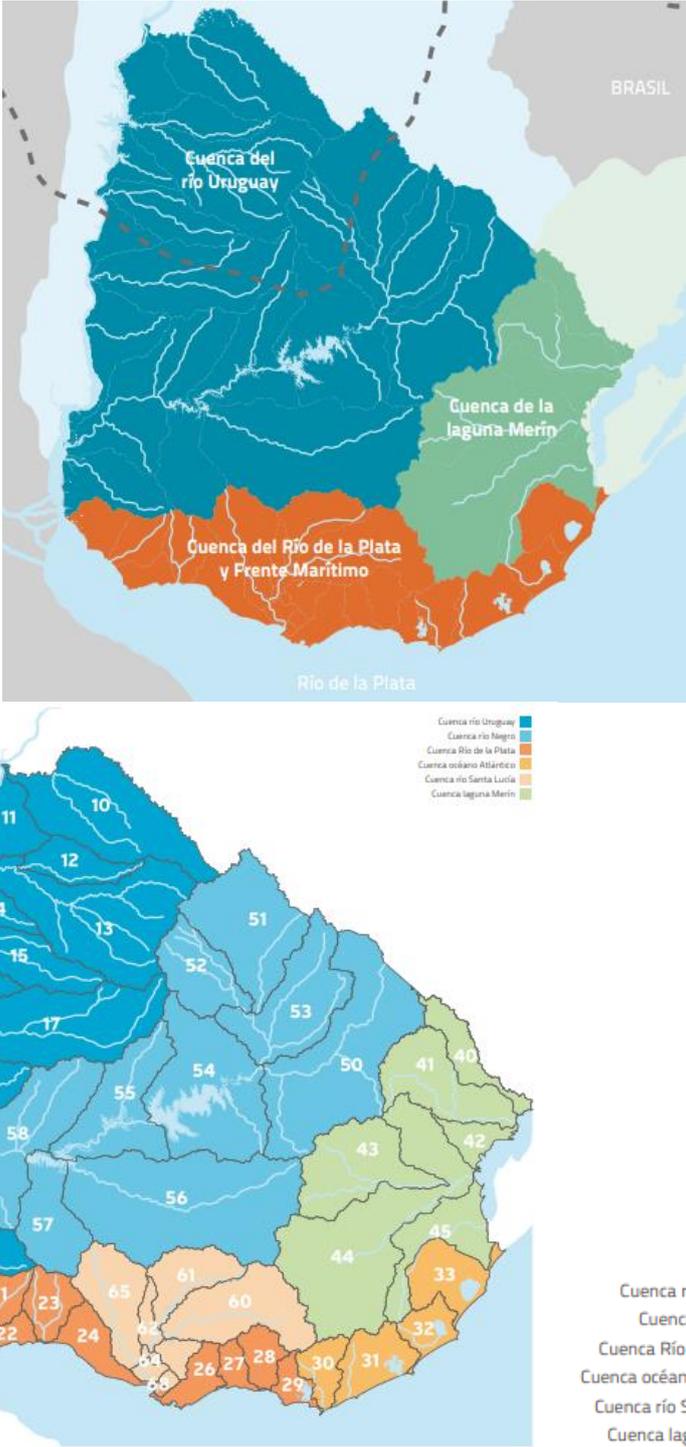


Figura 2-4. Cuencas a nivel regional y nacional en Uruguay. Tomado de: Plan Nacional de Aguas.

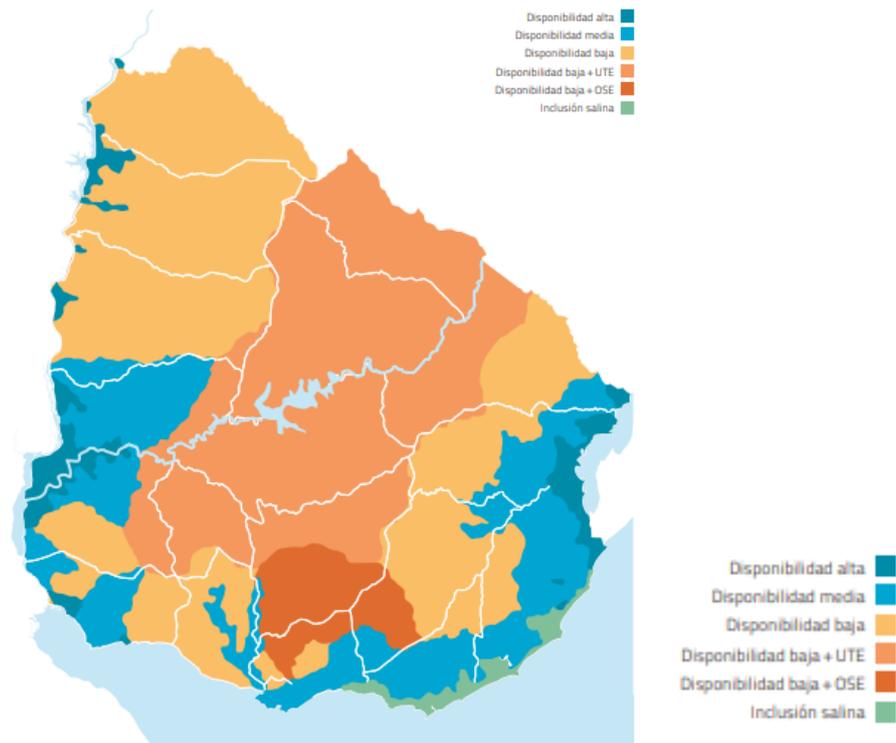


Figura 2-5. Disponibilidad de agua superficial. Tomado del Plan Nacional de Aguas.

Por otro lado, las principales desventajas del abastecimiento de fuentes subterráneas son:

- No hay agua subterránea en todas partes.
- Si se sobreexplotan los acuíferos puede haber consecuencias de afectación en las reservas de estos y en los caudales de los cuerpos de agua superficiales. Esto no es beneficioso para su sustentabilidad ya que son recursos que no se renuevan en una escala de tiempo de vida humana.
- En zonas costeras la sobreexplotación puede tener como consecuencia la intrusión de agua salina, lo cual es perjudicial para el abastecimiento y para el suelo.
- Como las perforaciones son construcciones pequeñas y están distribuidas geográficamente por muchos lugares es difícil regular la gestión.
- Es necesario tener formas de prevenir la contaminación del agua subterránea porque su remediación es muy costosa y compleja.

Para hacer una buena gestión de los acuíferos se debe conocer la zona geográfica, las formaciones geológicas que hay en el subsuelo, cómo estas formaciones afectan al movimiento del agua en el acuífero, la variabilidad temporal del recurso, la calidad del agua, el tipo de acuífero, entre otras. Esta información se encuentra en los **mapas hidrogeológicos**, estos dan información de la formación geológica, la aptitud del agua para riego, el caudal específico (medida de la facilidad de obtención del agua), y la profundidad del acuífero. El mapa hidrogeológico de Uruguay se muestra en la Figura 2-6.

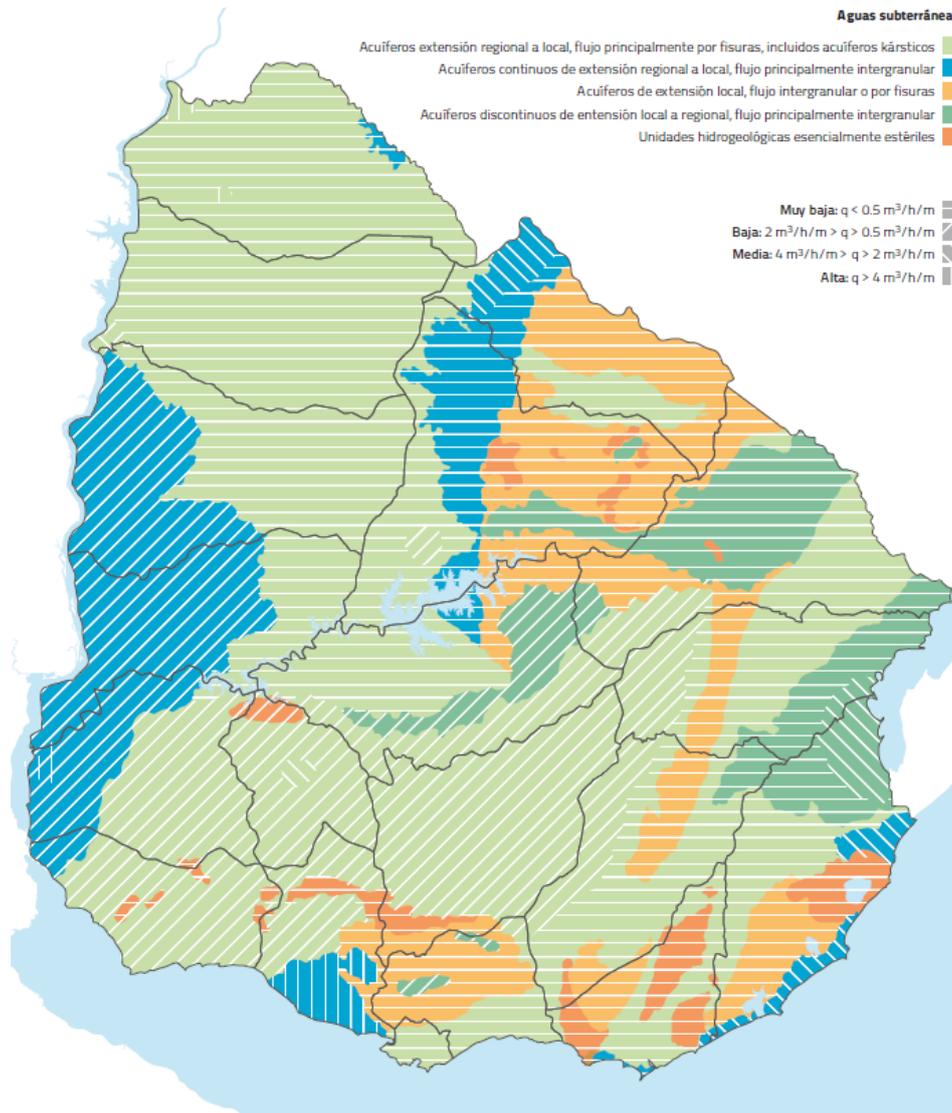


Figura 2-6 Mapa hidrogeológico de Uruguay con sus principales sistemas acuífero con su productividad. Tomado del Plan Nacional de Aguas

3. Marco regulatorio en Uruguay

3.1. Evolución del marco legal

La regulación de las aguas tiene un muy largo arraigo en nuestro país. Los antecedentes de las últimas décadas se inician en 1978, con la sanción del Código de Aguas (Decreto-Ley 14.859) que, entre otras muchas disposiciones, crea el Inventario de Recursos Hídricos y el Registro Nacional de Aguas. Al año siguiente se promulga el aún vigente Decreto 253/979 (Decreto de Calidad de Aguas) que se presenta más adelante en estas notas y cuyo texto se adjunta en Anexo.

Aunque el interés general acerca de la protección del ambiente se incorpora a la Constitución de la República Oriental del Uruguay en la Reforma Constitucional de 1997, la última modificación de ese artículo en octubre de 2004 introduce algunos conceptos fundamentales en la Carta Magna. A continuación, se transcribe el texto completo del Artículo 47 de la Constitución en su redacción vigente:

Artículo 47

La protección del medio ambiente es de interés general. Las personas deberán abstenerse de cualquier acto que cause depredación, destrucción o contaminación graves al medio ambiente. La ley reglamentará esta disposición y podrá prever sanciones para los transgresores.

El agua es un recurso natural esencial para la vida. El acceso al agua potable y el acceso al saneamiento, constituyen derechos humanos fundamentales.

1) La política nacional de Aguas y Saneamiento estará basada en:

- a) el ordenamiento del territorio, conservación y protección del Medio Ambiente y la restauración de la naturaleza.*
- b) la gestión sustentable, solidaria con las generaciones futuras, de los recursos hídricos y la preservación del ciclo hidrológico que constituyen asuntos de interés general. Los usuarios y la sociedad civil, participarán en todas las instancias de planificación, gestión y control de recursos hídricos; estableciéndose las cuencas hidrográficas como unidades básicas.*
- c) el establecimiento de prioridades para el uso del agua por regiones, cuencas o partes de ellas, siendo la primera prioridad el abastecimiento de agua potable a poblaciones.*
- d) el principio por el cual la prestación del servicio de agua potable y saneamiento, deberá hacerse anteponiendo las razones de orden social a las de orden económico.*

Toda autorización, concesión o permiso que de cualquier manera vulnere las disposiciones anteriores deberá ser dejada sin efecto.

2) Las aguas superficiales, así como las subterráneas, con excepción de las pluviales, integradas en el ciclo hidrológico, constituyen un recurso unitario, subordinado al interés general, que forma parte del dominio público estatal, como dominio público hidráulico.

3) El servicio público de saneamiento y el servicio público de abastecimiento de agua para el consumo humano serán prestados exclusiva y directamente por personas jurídicas estatales.

4) La ley, por tres quintos de votos del total de componentes de cada Cámara, podrá autorizar el suministro de agua, a otro país, cuando éste se encuentre desabastecido y por motivos de solidaridad.

En 2005 se crean la Dirección Nacional de Agua y Saneamiento (DINAGUA) –inicialmente designada en 2011 como Dirección Nacional de Saneamiento (DINASA)- y la Comisión Asesora de Agua y Saneamiento (COASAS) con el cometido de integrar diferentes visiones a las políticas del sector. La Política Nacional de Aguas se sanciona por la Ley 18.610 en 2009 y sus principios se detallan tal y como los plantea la Ley en la sección siguiente. En cuanto a riego, la Ley de Riego 16.858 modificada en 2017 fue sancionada en 1997.

En 2020 se creó el Ministerio de Ambiente, y tanto la ex DINAMA (ahora DINACEA) como la DINAGUA han sido transferidas a él.

Tanto la Política Nacional de Aguas como el Plan Nacional de Agua, el Plan Nacional de Drenaje Urbano y el Plan Nacional de Saneamiento se ven con mayor detalle en otros cursos, por lo que solamente se realizará una breve mención de ellos.

3.2. Política Nacional de Aguas

La Política Nacional de Aguas de nuestro país está contenida en la Ley 18.610 de octubre de 2009. Los principios de dicha política están contenidos en el artículo 8 de dicha Ley y son los siguientes:

La Política Nacional de Aguas tendrá por principios:

- A) La gestión sustentable, solidaria con las generaciones futuras, de los recursos hídricos y la preservación del ciclo hidrológico que constituyen asuntos de interés general.*
- B) La gestión integrada de los recursos hídricos -en tanto recursos naturales- deberá contemplar aspectos sociales, económicos y ambientales.*
- C) Que la falta de certeza técnica o científica no podrá alegarse como eximente ante el riesgo de daño grave que afecte los recursos hídricos para la no adopción de medidas de prevención, mitigación y recomposición.*
- D) Que la afectación de los recursos hídricos, en cuanto a cantidad y calidad, hará incurrir en responsabilidad a quienes la provoquen.*
- E) El reconocimiento de la cuenca hidrográfica como unidad de actuación para la planificación, control y gestión de los recursos hídricos, en las políticas de descentralización, ordenamiento territorial y desarrollo sustentable.*
- F) La educación ambiental como una herramienta social para la promoción del uso responsable, eficiente y sustentable de los recursos hídricos en sus distintas dimensiones: social, ambiental, cultural, económica y productiva.*
- G) Que el abastecimiento de agua potable a la población es la principal prioridad de uso de los recursos hídricos. Los demás usos se determinarán teniendo en cuenta las prioridades que se establezcan por regiones, cuencas hidrográficas y acuíferos.*
- H) Equidad, asequibilidad, solidaridad y sustentabilidad, como criterios rectores que tutelen el acceso y la utilización del agua.*
- I) Que para la gestión sustentable de los recursos hídricos compartidos con otros Estados deberán promoverse estrategias de coordinación y cooperación internacional, según lo establecido por la Constitución de la República en materia de aguas y saneamiento.*
- J) La participación de los usuarios y la sociedad civil en todas las instancias de planificación, gestión y control.*
- K) Que las personas jurídicas estatales sean las únicas que puedan prestar, en forma exclusiva y directa, los servicios públicos de agua potable y saneamiento.*
- L) Que el marco legal vigente en materia de aguas debe estar en consonancia con la evolución del conocimiento científico y tecnológico.*

En lo que tiene que ver con la participación que prevé el literal "J", en 2011 se constituyeron los tres Consejos Regionales de Recursos Hídricos del país, que corresponden respectivamente a las cuencas del Río Uruguay, de la Laguna Merín y del Río de Plata y su Frente Marítimo; comenzaron a funcionar en 2012. Cada Consejo está integrado por 21 miembros, que se distribuyen equitativamente entre representantes del gobierno, de los usuarios y de la sociedad civil. En todos los casos los Consejos son presididos por el Director Nacional de Aguas (DINAGUA).

Entre las múltiples competencias de los Consejos Regionales cabe destacar formular el Plan Regional de Recursos Hídricos y las directrices para los Planes Locales de Recursos Hídricos, así como coordinar la conformación de Comisiones de Cuenca y de Acuíferos.

En la Figura 3-1 se muestran las jurisdicciones de las Comisiones de Cuenca y de Acuíferos, y de las Juntas Regionales de Riego, de acuerdo con el Primer Plan Nacional de Aguas.

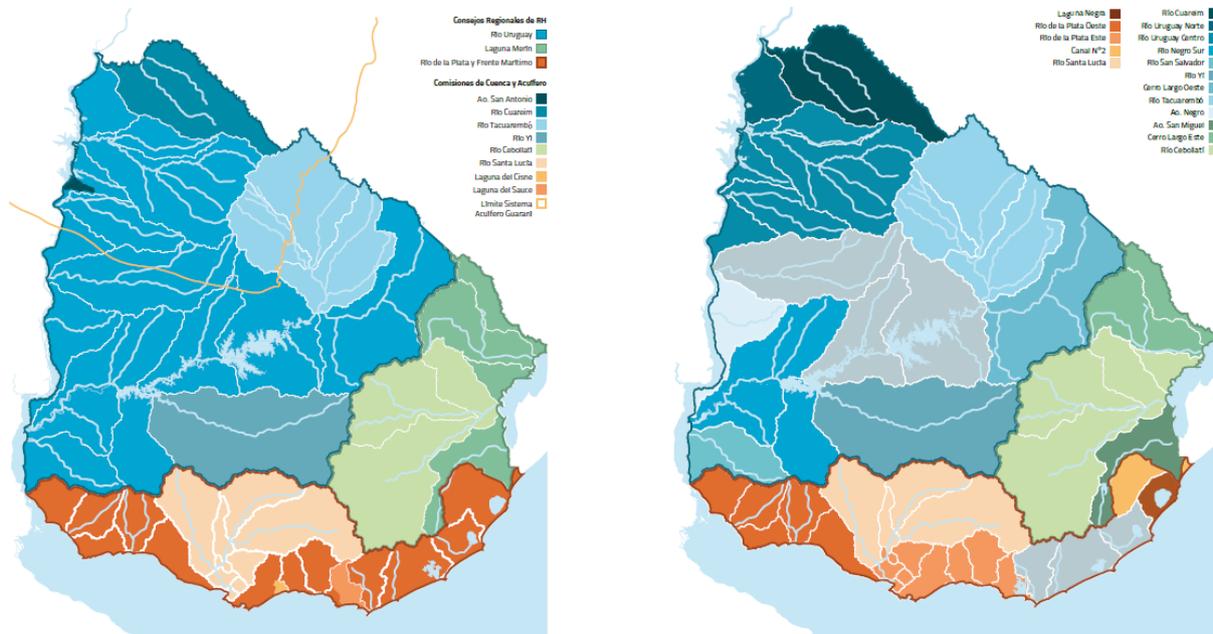


Figura 3-1 Comisiones de Cuenca y de Acuíferos (izq.); Juntas Regionales de Riego (der.). Tomado del Plan Nacional de Aguas (2017)

3.3. Plan Nacional de Aguas

El Plan Nacional de Aguas es un instrumento técnico elaborado para la planificación y gestión de las aguas, teniendo en consideración los diversos usos del recurso. Fue aprobado por el Poder Ejecutivo en 2017, siendo el primer Plan Nacional de Aguas de Uruguay. Sus tres grandes ejes son:

- El agua para un desarrollo sostenible.
- El acceso al agua y el saneamiento como derecho humano.
- La gestión del riesgo de inundaciones y sequías.

Su desarrollo implicó una gran campaña de recopilación, análisis y generación de información por parte de DINAGUA, con colaboración de muchos organismos nacionales e internacionales, y el aporte de técnicos individuales y consultoría internacional. Su contenido tiene aspectos normativos; descripción de Uruguay en aspectos sociales, políticos, climáticos, geofísicos y ecológicos; descripción de los recursos hídricos y sus usos e impactos; descripción de las regiones hidrográficas transfronterizas; gestión de los recursos hídricos; variabilidad climática; y proyecciones de escenarios y metas a futuro.

3.4. Plan Nacional de Saneamiento

El Plan de Saneamiento es un instrumento dirigido a la ciudadanía. Tiene por objetivo articular las acciones y recursos necesarios para lograr el acceso a sistemas de saneamiento adecuado para toda la ciudadanía al año 2030. Para esto establece que se debe considerar una amplitud de soluciones que puedan ser adecuadas para cada situación particular a lo largo y ancho del país.

En este documento se dan a conocer aspectos relevantes para alcanzar la universalidad y se plantean posibles soluciones de modo general, explicitando las actividades que se requieren para ser implementadas, y cuantificando sus costos y los posibles medios para su financiación.

3.5. Plan Nacional de Drenaje Urbano

Este plan se publicó en octubre de 2023. Es un instrumento de gestión que permite comprender cómo interactúan las ciudades con las aguas pluviales, identifica conflictos y potencialidades; define líneas estratégicas, programas y acciones concretas, priorizadas y pensadas en etapas dentro de un plan de inversiones a corto, mediano y largo plazo.

El contexto en el que se elabora este plan es el del cambio climático, el cual provoca en muchas ciudades del país inundaciones que tienen como consecuencia la pérdida de bienes, el desplazamiento de parte de la población a refugios, entre otras. El objetivo es, entonces, dirigirse hacia un modelo de planificación-gestión de las aguas urbanas más sostenible y resiliente, entendiendo que el uso de buenas prácticas, junto con el aprendizaje a partir de los errores es un aporte relevante para la gestión de las aguas urbanas.

Algunas de las preguntas que se busca responder son las siguientes:

- ¿Cuáles son los principales **problemas**? y ¿cómo se pueden agravar en **escenarios futuros** (cambio climático, dinámicas urbanas)?
- ¿Cuáles son las **alternativas** de solución?
- ¿Cuál es el **costo** del país y por departamento para enfrentar el problema?
- ¿Cuál es la brecha entre la disponibilidad de **recursos** y las inversiones necesarias?
- ¿Cuáles son las **prioridades**?
- ¿Es necesario adaptar la **normativa** para llevar adelante acciones?
- ¿Cómo se incorporan las nuevas **tecnologías** a la gestión de las aguas pluviales urbanas?

El abordaje que tiene el plan hacia este tema es sobre la base de algunos aspectos como fortalecer la coordinación, planificación e integralidad de procesos nacionales y departamentales; que haya integralidad en las obras de saneamiento, drenaje, vialidad y espacios públicos (esto es, que se piensen y diseñen como un todo, no como partes independientes); transitar hacia el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN); entre otros.

3.6. Estándares de Calidad de Aguas en Uruguay

3.6.1. Decreto 253/979 y actualizaciones

En nuestro país, los estándares nacionales de calidad de aguas están contenidos en el **Decreto 253/79**, reglamentario del **Código de Aguas** (Decreto-Ley 14.859 de 1978), y en sus actualizaciones. La versión vigente se anexa como parte del material de este módulo.

Entre las características más relevantes de este Decreto, cabe citar dos:

- Clasifica los cuerpos de agua según los usos que sobre ellos se ejercen o se considera deseable poder ejercer.
- Regula los requerimientos exigibles a vertimientos, diferenciándolos según el cuerpo receptor.

Es conveniente hacer notar que el Decreto 253/979 y sus modificatorios no consideran el agua subterránea, dado que ésta ha pasado a ser un bien público recién a partir de la reforma constitucional de 2004.

El Grupo de Estandarización en Agua (GESTA-Agua), asesor de la COTAMA (Comisión Técnica Asesora de Medio Ambiente), ha realizado en los últimos años una revisión integral de dicho Decreto, pero aún no ha sido sancionada. La última versión de su propuesta data de 2008.

3.6.2. Clasificación de cuerpos de agua superficial según su uso

En cuanto a la clasificación de cuerpos de agua según su uso, en su artículo 3º el Decreto establece:

Los cursos o cuerpos de agua del País se clasificarán según sus usos preponderantes actuales o potenciales en cuatro clases...

Luego, en el mismo artículo, define cada una de las clases de la siguiente forma:

CLASE 1: *Aguas destinadas o que puedan ser destinadas al abastecimiento de agua potable a poblaciones con tratamiento convencional.*

CLASE 2:

a) *Aguas destinadas al riego de hortalizas o plantas frutícolas u otros cultivos destinados al consumo humano en su forma natural, cuando éstas son usadas a través de sistemas de riego que provocan el mojado del producto.*

b) *Aguas destinadas a recreación por contacto directo con el cuerpo humano.*

CLASE 3: *Aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyo producto no se consume en forma natural o en aquellos casos que siendo consumidos en forma natural se apliquen sistemas de riego que no provocan el mojado del producto.*

CLASE 4: *Aguas correspondientes a los cursos o tramos de cursos que atraviesan zonas urbanas o suburbanas que deban mantener una armonía con el medio, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyos productos no son destinados al consumo humano en ninguna forma.*

Inmediatamente advierte:

ARTICULO 4: *Quedan excluidos de esta clasificación los cuerpos de aguas destinados al tratamiento o transporte de aguas residuales.*

Para cada una de las Clases, el Decreto establece estándares a satisfacer en cuanto a pH, DBO₅, aceites y grasas, nitratos, algunos metales, entre otros parámetros.

La clasificación de un cuerpo de agua como Clase 1 (fuente de agua para potabilizar) confiere total primacía al uso para potabilización sobre cualesquiera otros usos que se deseen ejercer.

Pese a que este Decreto en su versión original está vigente desde hace casi 40 años, no existe en nuestro país una clasificación exhaustiva de los cuerpos de agua en función de sus usos. Sí se reconocen como cuerpos de agua de Clase 1 aquellos en los que están instaladas tomas de agua para potabilización, o se adoptan como referencia las características de determinada Clase cuando por la vía de los hechos o por la existencia de autorizaciones administrativas se conoce del ejercicio de determinados usos (quita de agua para riego, recreación por contacto directo, navegación, etc.).

En febrero de 2005, por **Resolución 99/005** del Poder Ejecutivo, se clasificaron como **Clase 3** (de acuerdo con la designación del decreto 253/979) todos los cuerpos de agua no clasificados aún y cuya cuenca tributaria fuera de un área igual o mayor a 10 km².

Por otra parte, debe señalarse que los valores que deben cumplir los diferentes parámetros de calidad de aguas para cada una de las clases deben ser respetados cuando se efectúan vertimientos; o sea que se tiene un doble control: la calidad del vertimiento en sí misma (prevista en el artículo 11 del Decreto de acuerdo con el tipo de cuerpo receptor), y la verificación de que no se comprometa la Clase a la que pertenece el cuerpo receptor en función de su uso.

3.6.3. Estándares para vertido

En el artículo 11 del Decreto se establecen los requisitos de calidad que debe satisfacer un efluente para que sea admisible su descarga. El Decreto considera tres casos:

- **Vertido a curso de agua:** los parámetros de control se orientan a asegurar que las descargas a curso de agua alteren lo menos posible los ecosistemas presentes. Entre los parámetros que se acotan cabe mencionar la temperatura, el pH, el contenido de materia orgánica biodegradable medido como DBO₅, el contenido de nutrientes medido como amoníaco y fósforo total, el contenido de coliformes fecales.
- **Vertido a colector:** los parámetros de control se orientan a conservar la integridad y buen funcionamiento de la infraestructura. En consecuencia, la permisividad es mayor en muchos de los parámetros de control e incluso alguno de los ya mencionados desaparece, como es el caso de los coliformes fecales. Vale la pena señalar que el Decreto presupone que existe algún tipo de tratamiento de los líquidos conducidos por el colector previo a su descarga al cuerpo receptor.
- **Infiltración al terreno:** En este caso, además de acotar un conjunto de parámetros como en los casos anteriores, el Decreto establece que este tipo de disposición sólo es admisible en zonas rurales y fija distancias mínimas a medianeras y a cursos de agua o pozos manantiales. Además de

la protección de las fuentes de agua tanto superficiales y subterráneas, en este caso aparece una restricción vinculada a evitar perjuicios a terceros (en este caso, vecinos linderos).

A su vez, ningún vertimiento puede, por su sola causa, hacer cambiar (empeorar) la clase de un curso de agua.

4. Parámetros de calidad de aguas

La calidad de un agua queda definida por su composición química, física y bacteriológica. Para cuantificar características o propiedades del agua, en forma directa o indirecta, se emplea un conjunto de parámetros. Algunos de ellos se pueden determinar in situ, otros requieren tomar una muestra para su análisis en laboratorio; también hay parámetros que implican una determinación organoléptica.

En este punto se presenta una serie de parámetros de calidad de aguas, que procura incluir los que tienen mayor relevancia desde el punto de vista de la ingeniería ambiental.

4.1. Temperatura

Es un parámetro de fácil determinación, tanto en campo como en laboratorio. En general interesan las modificaciones de temperatura que resultan de una determinada intervención –un vertimiento, por ejemplo- o los perfiles verticales de temperatura en una columna de agua. Por ejemplo, en un cuerpo de agua léntico un perfil homogéneo de temperatura en toda la columna de agua informa sobre una buena mezcla en la masa de agua; en cambio, un perfil con tramos diferenciados advierte sobre la posible estratificación del cuerpo de agua.

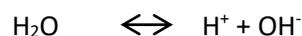
El ascenso de la temperatura de un curso o zona de un cuerpo de agua puede generar modificaciones en la biota que en él habita, ya sea por vía directa como a través de modificaciones (descenso) en el oxígeno disuelto disponible al variar el nivel de saturación y aumentar las tasas metabólicas de procesos biológicos en los que se consume oxígeno.

4.2. pH

El pH (potencial hidrogeniónico) se define como: $-\log_{10} [H^+]$ y, es una medida del grado de acidez o basicidad del medio en cuestión. Un litro de agua pura contiene 10^{-7} moléculas de ion hidrógeno, lo que lleva a que:

$$pH = -\log [10^{-7}] = 7 \text{ a } 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

El valor de pH 7 representa la igualdad entre concentraciones de H^+ y OH^- , lo que puede escribirse por medio de la siguiente reacción de equilibrio:



La mayoría de las aguas naturales tiene un pH cercano al neutro. Aproximadamente el 95 % de todas las aguas naturales tiene un pH entre 6 y 9, y la mayor parte del agua de lluvia no afectada significativamente por emisiones antropogénicas, tiene un pH aproximado de 5,6 debido a la presencia de dióxido de carbono disuelto proveniente de la atmósfera.

Los valores de pH extremos en aguas no son compatibles con la presencia de formas de vida superiores. Asimismo, las fluctuaciones amplias del pH del medio condicionan la permanencia de especies con rangos de tolerancia estrechos.

La determinación del pH es sencilla: en laboratorio se determina por lectura directa en pH-ímetro, pero en campo ya se puede tener una aproximación válida empleando cintas de papel pH. Este último método se basa en que varias sustancias sufren cambios de color a diferentes valores de pH, posibilitando una determinación aproximada de éste a partir del viraje de color de la cinta testigo.

Los métodos colorimétricos no deben ser usados para aguas turbias y coloridas, o en presencia de elementos que puedan causar interferencia en los resultados.

4.3. Alcalinidad

Se refiere a la capacidad de aceptar iones H^+ (la capacidad de neutralizar ácidos), que en última instancia es la capacidad del medio de resistirse a cambios bruscos de pH al introducirse un agente ácido. La alcalinidad se suele expresar en mg/L de $CaCO_3$, aun cuando no esté producida total o parcialmente por $CaCO_3$ (carbonato de calcio).

La **alcalinidad total** se determina como: $[OH^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] - [H^+]$

Cada sumando se designa como “alcalinidad de hidróxidos”, “de bicarbonatos” o “de carbonatos” y a la suma se le resta la cantidad de hidrogeniones libres.

Únicamente dos tipos de alcalinidad pueden estar presentes en el agua simultáneamente, según sea el pH del medio; en la Figura 4-1 se ilustra esta dependencia.

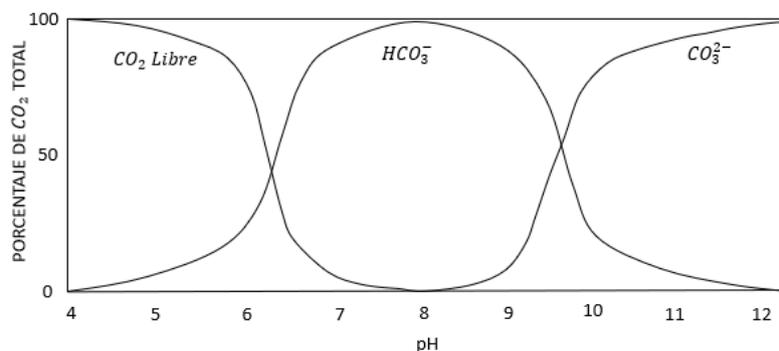


Figura 4-1 Iones causantes de alcalinidad en agua en función del pH

La alcalinidad de las aguas naturales se debe comúnmente a las sales de los ácidos débiles que existen en forma natural. Todos los iones causantes de alcalinidad son básicos y son capaces de reaccionar con ácidos. El bicarbonato (HCO_3^-) es el ion predominante en la mayoría de las aguas naturales (pH 6 a 9), y en menor proporción existen el ion carbonato (CO_3^{2-}) y el hidroxilo u oxhidrilo (OH^-).

En algunas aguas naturales e industriales, pueden existir otras sales débiles que podrían ser importantes para determinar la alcalinidad de una solución, tales como boratos, fosfatos, o bien amonio o ácidos orgánicos.

4.4. Dureza

Se refiere al contenido de algunos iones metálicos, principalmente *calcio* (Ca^{++}) y *magnesio* (Mg^{++}) y, en menor grado, hierro (Fe^{++}) y estroncio (Sr^{++}).

La dureza es la capacidad que tienen algunas aguas de cortar el jabón y de producir incrustaciones en calderas. Las “aguas duras” no generan afecciones a la salud, pero, por sus características, pueden causar perjuicios económicos.

Se suele diferenciar entre *dureza temporaria* (desaparece al llevar el agua a ebullición, pues las sales que se forman precipitan) y *dureza permanente* (es la que se mantiene aún después de hervir el agua); *dureza de carbonatos* o *dureza de bicarbonatos* (debido a asociaciones de los iones de calcio y magnesio con radicales CO_3^- o HCO_3^- respectivamente).

La dureza, en cualquiera de sus variantes (total, permanente, temporaria, etc.), se suele expresar en mg/L de $CaCO_3$. Las normas de calidad de agua potable de OSE indican un límite máximo de dureza en aguas de consumo, de 500 mg/L de $CaCO_3$.



Figura 4-2 Caños de hierro galvanizado envejecido, con incrustaciones

4.5. Salinidad

El concepto de salinidad se refiere a la *presencia de iones libres en el agua*.

Si bien la salinidad suele expresarse como mg/L de $[Cl^-]$, no sólo se debe a la presencia de cloruros; es más, no se refiere sólo a la presencia de aniones.

La evaporación del agua de los océanos es la forma por la que el agua salada se transforma en agua dulce en la naturaleza. La evaporación de agua de riego podría contribuir a la salinización de suelos, especialmente cuando se riega con aguas subterráneas, como se indicó en el Módulo Introductorio al abordar los procesos de degradación química de suelos.

4.6. Conductividad

El agua pura (H_2O) es muy mala conductora de la electricidad. Por lo tanto, si hay conducción eléctrica significativa en un agua se deberá a la presencia de iones libres en ella. En consecuencia, la conductividad resulta ser una buena medida de campo de los iones libres en el agua.

Se mide con conductímetro y sus resultados se expresan en $\mu S/m$ (micro Siemens por metro). Si bien tiene una relación directa con la salinidad, un valor no se infiere a partir del otro.

Por lo general, las sondas para trabajo de campo en cuerpos de agua tienen sensores de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura; permiten conocer valores puntuales y también efectuar perfiles verticales de estos parámetros.

4.7. Contenido de Sólidos

La presencia de sólidos en el agua no se refiere sólo a elementos de gran tamaño visibles a simple vista y susceptibles de flotar o depositarse, sino que incluye a los sólidos microscópicos que permanecen en suspensión en el agua y a los sólidos disueltos –de tamaño iónico- que están presentes en ella.

Al final de esta sección se sintetizan en forma esquemática las clasificaciones que se presentan a continuación.

4.7.1. Sólidos Sedimentables

Una primera categoría dentro de los sólidos que contiene el agua está dada por los sólidos sedimentables. El contenido de sólidos sedimentables se determina por lectura directa en un cono transparente graduado (cono de Imhoff, ver Figura 4-3), y su valor se expresa en mL/L (es una cuantificación *volumétrica*).

Las lecturas habituales de sólidos sedimentables se efectúan a los 10 minutos y a 1 hora de colocada la muestra en el cono.

4.7.2. Sólidos totales (ST)

Los sólidos totales presentes en una muestra de agua son los que están presentes una vez retirados los sólidos sedimentables.



Figura 4-3 Cono de Imhoff

Analíticamente, los sólidos totales se definen como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 °C y 105 °C. Los sólidos totales se suelen clasificar según su tamaño o según su naturaleza (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 4-4). La separación entre sólidos suspendidos y sólidos disueltos se refiere al tamaño de las partículas en cuestión y la separación entre sólidos fijos y volátiles se refiere a su naturaleza.

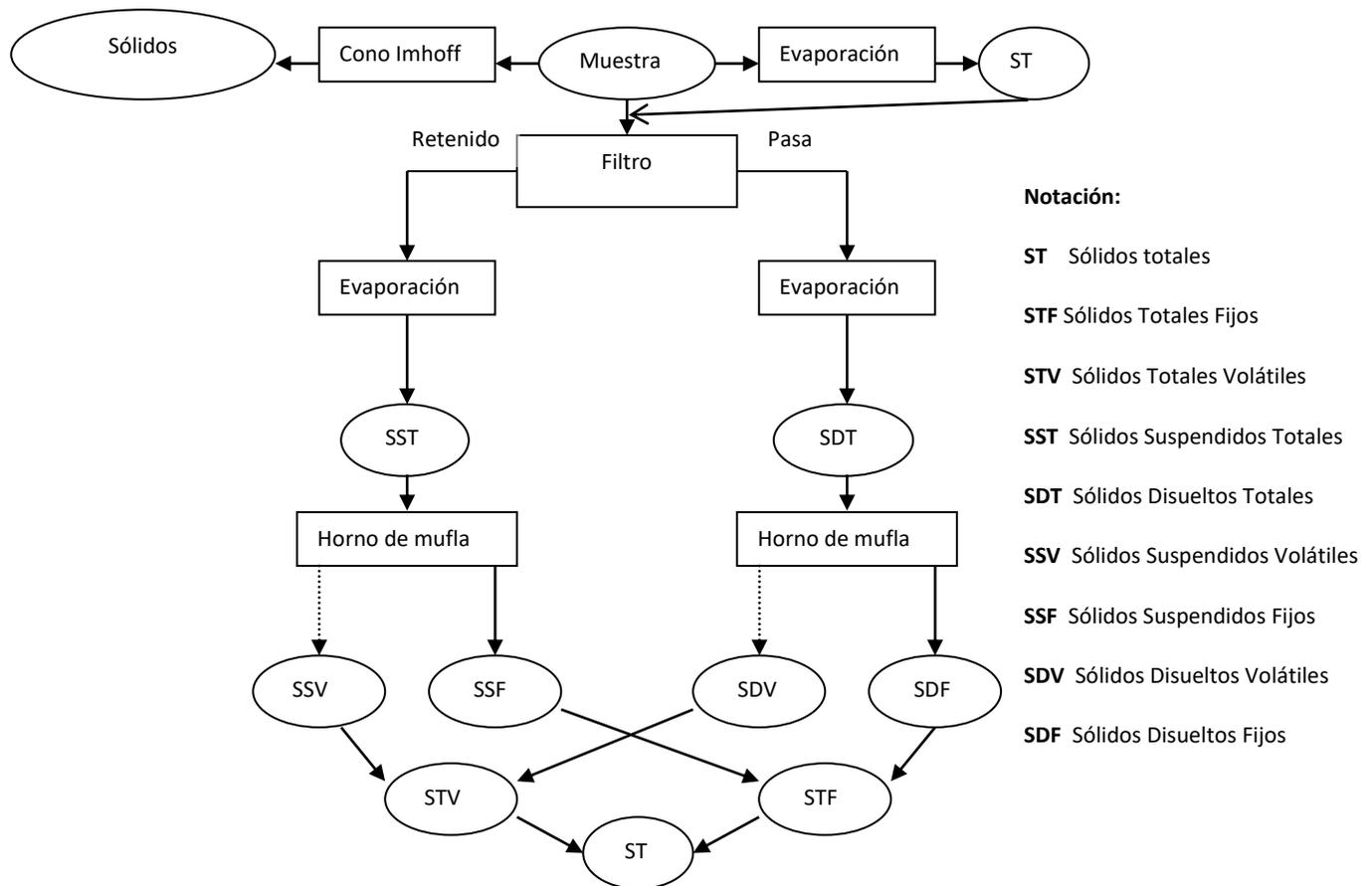


Figura 4-4. Clasificación de sólidos presentes en el agua

Tabla 4-1. Clasificación de los sólidos totales

	Pasan el filtro	Retenidos en el filtro	
Se volatilizan	Sólidos Disueltos Volátiles	Sólidos Suspendedos Volátiles	Sólidos Volátiles Totales
Permanecen después de calcinar	Sólidos Disueltos Fijos	Sólidos Suspendedos Fijos	Sólidos Fijos Totales
	Sólidos Disueltos Totales	Sólidos Suspendedos Totales	Sólidos Totales

4.7.3. Sólidos Suspendedos (SS)

Los sólidos suspendidos forman parte de los sólidos totales y corresponden a los que son retenidos en un filtro de vidrio con tamaño de poros de 2,0 µm o menor al filtrar en vacío la muestra. Se expresan en mg/L.

Por su parte, los sólidos suspendidos totales son la parte de la muestra que quedan retenidos en el filtro luego de pasar por una evaporación en estufa a 103 – 105 °C.

4.7.4. Sólidos Disueltos (SD)

También forman parte de los sólidos totales. Son los que pasan con la fracción líquida en la filtración antes mencionada. Se expresan en mg/L. Las normas de calidad de agua potable de OSE indican un límite máximo de sólidos disueltos totales de 1000 mg/L.

La suma de sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales es el contenido de sólidos totales de la muestra que se analiza.

4.7.5. Sólidos Fijos (SF)

Tanto para la muestra total inicial como para las fracciones de sólidos suspendidos y disueltos, que se han separado previamente por filtración, se pueden determinar las fracciones volátil y fija a través del secado y calcinación de la muestra a 550 °C. Las distintas fracciones se determinan por gravimetría (es decir, por diferencia de pesos) antes y después de cada una de las operaciones de calentamiento, previa evaporación y secado de la muestra a baño maría.

Los sólidos fijos son los que permanecen luego de calcinar la muestra. Se asocian con el contenido inorgánico de ésta. Se expresan en mg/L, aclarando si son sólidos totales fijos *STF*, sólidos suspendidos fijos *SSF* o sólidos disueltos fijos *SDF*.

4.7.6. Sólidos Volátiles (SV)

Así como la fracción fija se asocia con materia inorgánica, la fracción volátil proporciona una medida de la materia orgánica presente en la muestra. Los sólidos volátiles corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación de la muestra a 550 °C. Se determinan por diferencia de peso entre sólidos totales (muestra seca) y fijos (muestra calcinada).

El contenido de sólidos volátiles se expresa en mg/L, aclarando si se trata de sólidos totales volátiles (STV), o de una fracción de ellos (sólidos suspendidos volátiles *SSV* o sólidos disueltos volátiles *SDV*).

4.8. Color

La presencia de sustancias disueltas en el agua puede alterar su color, dependiendo de la naturaleza y cantidad del material presente. Normalmente en las aguas naturales el color es debido a ácidos húmicos y taninos originados por la descomposición de vegetales; estas sustancias no presentan riesgos para la salud, aunque sí afectan el aspecto visual del agua.

Se debe diferenciar el *color verdadero* del *color aparente*. En efecto, parte del *color aparente* de una muestra es debido a la turbiedad; una vez removida ésta por centrifugación en condiciones predeterminadas, se dice que el color es el *verdadero*. El color verdadero es causado por sólidos disueltos, pero no se puede inferir simplemente conociendo la concentración de éstos en el agua.

Para cuantificar el color de un agua éste debe determinarse en colorímetro; el resultado se expresa en unidades de color platino-cobalto (Pt-Co).

4.9. Turbiedad

La turbiedad se refiere a la propiedad de desviar los rayos de luz. Así como el color se debe a los sólidos disueltos, la turbiedad se debe a los sólidos suspendidos, aunque no existe tampoco en este caso una relación general que permita inferir un valor a partir del otro. Por lo tanto, para conocer la turbiedad se debe realizar la determinación en turbidímetro. El resultado se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU).

La turbiedad puede ser causada por partículas de arcilla, lodo, sólidos, descargas de líquidos domésticos o industriales, e incluso por presencia de gran número de microorganismos. También puede ser causada por burbujas muy pequeñas de aire.



Figura 4-5. (Izq) Lago con bajos valores de turbiedad. (Der) Lago con agua con altos valores de turbiedad. Tomado del material de la Unidad Curricular Potabilización de Aguas.

4.10. Indicadores Bacteriológicos

4.10.1. Por qué usar indicadores

Existen muchas enfermedades que pueden ser transmitidas por la ingesta de agua o alimentos en condiciones bacteriológicas no seguras. En la sección 1.4 de estas Notas se mencionaron varias que están relacionadas con el cierre del ciclo fecal-oral, es decir, con la posibilidad de que agentes patógenos presentes en excretas humanas puedan ser ingeridos al consumir agua o alimentos contaminados.

Los agentes patógenos presentes en el agua pueden ser muy diversos (virus, bacterias y protozoarios) y cada uno de ellos puede estar en pequeñas cantidades. Por eso, en vez de rastrear cada uno de ellos por separado, lo que insumiría mucho tiempo y recursos, se busca determinar de una forma más sencilla la posibilidad de que tales patógenos estén presentes en el cuerpo de agua de interés.

Como, en principio, la causa subyacente que más preocupa es la contaminación de las aguas por excretas humanas, si se halla una forma de inferir si ha ocurrido esta contaminación recientemente, se podrá inferir el nivel de riesgo de cierre del ciclo fecal-oral: si hay contaminación fecal reciente, entonces ese riesgo será elevado. La idea es, entonces, detectar la presencia de microorganismos *que adviertan sobre el riesgo* de que estén también presentes los patógenos, *sin buscarlos directamente* y sin saber entonces a ciencia cierta si hay o no patógenos ni, de haberlos, qué patógenos son los que están presentes. Bajo la hipótesis formulada, los indicadores a emplear *deben* provenir del tracto intestinal de animales de sangre caliente (para que compartan el hábitat con los patógenos buscados y puedan llegar al agua por la misma vía que ellos).

Luego, los indicadores bacteriológicos se emplean para cuantificar el riesgo de que haya presencia de agentes patógenos capaces de causar enfermedades de transmisión hídrica por cierre del ciclo fecal – oral en el agua que se analiza.

4.10.2. Características de los indicadores bacteriológicos ideales

Los requisitos que debe cumplir un **indicador bacteriológico ideal** para ser considerado como tal se listan a continuación:

- Debe estar presente exclusivamente en las heces de animales homeotermos y ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos. Este requisito permite garantizar que, si se encuentra presente, es porque hay contaminación con heces de animales de sangre caliente; el caso de mayor interés es el de contaminación con heces humanas.
- Debe presentarse en número elevado y ser más abundante que los patógenos. Al ser más abundante que los patógenos, es razonable esperar que la detección de los indicadores sea, desde este punto de vista, más sencilla que la de aquellos.
- Debe sobrevivir en agua más tiempo que los patógenos de origen fecal. De este modo, el indicador podría estar presente aun si los patógenos han muerto, no así a la inversa.
- Debe ser incapaz de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotermos (en particular, debe ser incapaz de reproducirse en agua). Este requisito apunta a que, al encontrar el indicador en un cuerpo de agua, sea únicamente porque ha llegado allí por vertido de excretas.
- Debe ser de fácil detección (fácil de aislar y de cuantificar). Este último requisito tiene la finalidad de que las técnicas a aplicar sean de un costo razonable, que justifique apuntar a la detección de indicadores y no de cada uno de los agentes patógenos.

4.10.3. Uso de coliformes termotolerantes como indicadores bacteriológicos

En nuestro país los indicadores microbiológicos que se emplean y para los que hay estándares, tanto para vertido de efluentes como para calidad de aguas, son los coliformes termotolerantes. Son un subgrupo de los coliformes totales, capaz de fermentar la lactosa a 44,5 °C.

Los coliformes termotolerantes se designaban, hasta no hace demasiado tiempo, como coliformes fecales. Es más, en la normativa nacional de calidad de aguas (Decreto 253/979, ver Anexo) se mantiene esa nomenclatura. La designación actual es más adecuada pues no sólo destaca su característica de crecer a temperaturas superiores que los coliformes totales, sino que además en la actualidad se sabe que algunos de los géneros que pertenecen a este grupo no son de origen exclusivamente fecal (por ejemplo, *Clostridium Sp.*, *Citrobacter freundii*, *Klebsiella pneumoniae*).

Más del 90 % de los microorganismos que integran el grupo de los coliformes termotolerantes corresponden a *Escherichia coli*. Los coliformes termotolerantes distintos de *Escherichia Coli* pueden proceder también de líquidos no cloacales, como por ejemplo, de algunos efluentes industriales. Por ello, la designación *coliformes termotolerantes* es más amplia que *coliformes fecales*, que se aplica con mayor frecuencia.

A nivel mundial, se tiende al uso creciente de los estreptococos fecales como indicadores bacteriológicos de calidad de aguas. A través de la relación entre estreptococos fecales y coliformes

termotolerantes se puede inferir si el origen de la contaminación es por excretas humanas o de otros animales.

Como *indicadores reales* que son, los coliformes termotolerantes **no** satisfacen **totalmente** los requisitos de los indicadores ideales; por ejemplo, su supervivencia en agua es muy inferior a la del *Vibrio Cholerae*, razón por la que cuando se desea analizar la presencia de este bacilo (o de otro patógeno que presente restricciones análogas para su detección a través del indicador escogido) debe buscársele directamente.

La presencia de coliformes termotolerantes se determina en laboratorio en un ensayo que tarda 24 horas y consiste en un cultivo en medio adecuado y a temperatura controlada. El resultado se expresa en Unidades Formadoras de Colonias cada 100 mL (ufc/100 mL). Históricamente se empleaba una determinación que insumía el doble de tiempo (48 horas), cuyo resultado se expresaba como Número Más Probable NMP/100 mL.

El hecho de estar buscando organismos en vez de una cierta característica física o química del agua confiere a los resultados una gran variabilidad, propia de todo lo vivo. Es por ello que la caracterización bacteriológica de un cuerpo de agua no suele inferirse a partir de una determinación puntual, sino del promedio de los resultados un conjunto de determinaciones. Esto está también previsto en los estándares nacionales de calidad de aguas, que en la mayor parte de los casos comparan sus valores contra los resultados de una serie de cinco muestras.

Para promediar datos de bacteriología no se emplea la media aritmética sino la **media geométrica**³, dado que la distribución de las poblaciones de microorganismos no se ajusta por una curva normal o gaussiana, sino por una curva log-normal (es decir, los logaritmos de los datos son normales, pero no lo son los propios datos; en consecuencia, la media geométrica se corresponde con la media aritmética de los logaritmos).

Conviene tener en cuenta que, a los efectos de caracterizar calidad de aguas, más que los valores numéricos de ufc/100 mL interesa el orden -la potencia de 10- a que corresponden esos valores. A título de ejemplo, una persona elimina no menos de 10^8 coliformes termotolerantes por día; en los líquidos residuales domésticos crudos la concentración de coliformes termotolerantes es del orden de 10^7 ufc/100mL. En nuestro país, la máxima concentración admitida en aguas para recreación por contacto directo es de 5×10^3 ufc/100mL, pero no como valor puntual sino como media geométrica de una serie de 5 muestras.

Para consumo humano, el agua potable debe estar totalmente exenta de la presencia de coliformes termotolerantes.

4.10.4. T_{90}

A los efectos de caracterizar un cuerpo de agua desde el punto de vista de la supervivencia de los microorganismos en él, la información que dan los indicadores bacteriológicos no es suficiente: se debe emplear un parámetro que describa el decaimiento de las poblaciones microbianas en el medio en función del tiempo.

³ Recordar que la media geométrica es la raíz n -ésima del producto de n valores.

Este parámetro se denomina T_{90} , y representa el tiempo que tarda la concentración de coliformes termotolerantes (o del indicador que se esté empleando) en reducirse en un orden, o sea, en reducirse en un 90 %.

Los valores de T_{90} son de determinación muy engorrosa por requerirse campañas de muestreo muy densas y prolongadas, pero son parámetros de diseño necesarios en algunos proyectos de ingeniería, como es el caso de emisarios subacuáticos. Los valores que se han obtenido para cuerpos de agua de nuestro país son muy variados (a modo de ejemplo, se tienen valores del orden de 10 a 12 horas en Montevideo, y de 2 a 3 horas en Punta del Este).

4.11. Nitrógeno y fósforo

Estos nutrientes interesan principalmente porque su abundancia advierte sobre los riesgos de aparición de procesos de eutroficación. Si bien no son los únicos nutrientes que necesitan los organismos productores acuáticos, son los que suelen actuar como factores limitantes para su crecimiento (otros factores limitantes habituales suelen ser la luz, la temperatura, el OD, etc.).

La presencia de nitrógeno puede cuantificarse como nitrógeno total o bien a través de cada una de las fracciones de interés (amonio NH_4^+ , nitritos NO_2^- , nitratos NO_3^- , nitrógeno orgánico). Es de hacer notar que el parámetro que se designa como *Nitrógeno Kjeldahl Total NKT* no incluye el contenido de nitratos:

$$\text{NKT} = \text{N}_{\text{org}} + \text{NH}_4^+$$

En lo referente a la presencia de fósforo, puede interesar el contenido de fósforo total o la presencia de determinadas especies químicas, como fósforo orgánico u ortofosfatos.

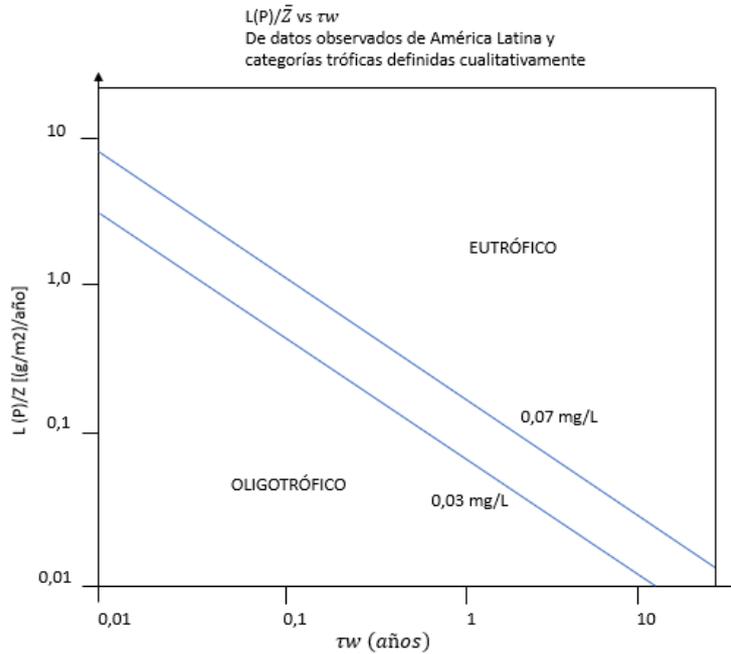
4.11.1. Estado trófico de un cuerpo de agua

La **contaminación eutrófica** se asocia fundamentalmente con elevado contenido de nutrientes en cuerpos de agua con poco recambio –los cuerpos *lénticos*, como lagos, lagunas, embalses-.

Para analizar el estado trófico de un cuerpo de agua léntico, se suelen emplear gráficos que relacionan los aportes de fósforo de la cuenca, el tiempo de residencia del lago y la concentración de fósforo en las aguas. Los gráficos inicialmente propuestos se deben a Vollenweider, pero en la década de los '80 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) publicó un juego de gráficos desarrollado por Henry Salas y Paloma Martino a partir del estudio de lagos de América Latina. Uno de ellos se presenta en la Figura 4-6. Allí se presentan valores de concentración de fósforo en agua y estado trófico de los lagos estudiados como función del tiempo de residencia T_w y de la carga entrante de fósforo $L_{(p)}$.

Los términos que se emplean para designar los diferentes estados tróficos, desde el que corresponde a menor actividad biológica al máximo en ese sentido son los siguientes: ultraoligotrófico; oligotrófico; mesotrófico; eutrófico; hipertrófico o hipereutrófico.

Habitualmente se maneja como cota superior de la concentración de fósforo en cuerpos de agua oligotróficos el valor de 0,03 mg/L, y el valor de 0,07 mg/L como cota inferior de la concentración de fósforo en cuerpos eutróficos.



Referencias

L(p) = carga anual de fósforo [(g/m²)/año]

Z = profundidad media del lago [m]

$T_{\omega} = \frac{V}{Q}$ = tiempo de residencia, tiempo medio que tarda en recambiarse la totalidad del agua en el lago, expresado en años, siendo V el volumen del cuerpo de agua y Q el flujo medio anual.

años, siendo V el volumen del cuerpo de agua y Q el flujo medio anual.

Figura 4-6. Concentración de fósforo en agua y niveles de eutroficación (redibujado de CEPIS)

4.11.2. Probabilidad de estado trófico

Como la concentración de fósforo en agua no impone por sí sola la condición trófica de un cuerpo de agua, Salas & Martino introducen un conjunto de gráficos a propósito de la **probabilidad de estado trófico** de un cuerpo de agua en función de la concentración de fósforo y de clorofila "a". Esto se fundamenta en que lagos con estado trófico diferente pueden tener, sin embargo, concentraciones similares de fósforo en sus aguas. Por lo general, cuando esto ocurre es porque el control del crecimiento del sistema está ejercido por un factor que no son los nutrientes (por ejemplo, luz, temperatura, etc.) o debido a características propias de los ecosistemas presentes.

En la Figura 4-7 se presenta un gráfico de probabilidad de estado trófico en función de la concentración de fósforo en agua. Dado un valor de concentración, una vertical que pase por ese punto cortará distintas curvas; los puntos de corte permiten leer en el eje de ordenadas la probabilidad de que el lago esté en el correspondiente estado trófico (por ejemplo, 66 % de probabilidad de estar en estado eutrófico, 31 % mesotrófico, 3 % probabilidad de estar hipertrófico).

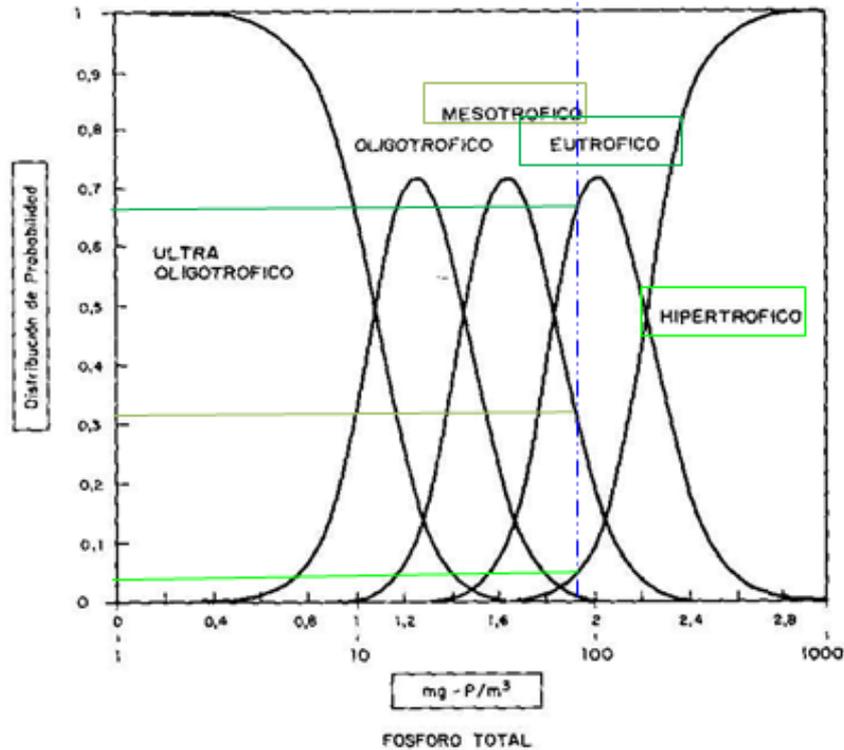


Figura 4-7 Probabilidad de estado trófico en un cuerpo de agua a partir de la concentración de fósforo total (tomado de CEPIS)

4.11.3. Desenlace de un episodio de crecimiento explosivo de algas

Cuando hay cantidad suficiente de nutrientes, hay algunos momentos en que un lago es más proclive a sufrir un episodio de crecimiento descontrolado de algas o *bloom* algal. Los blooms de algas son particularmente frecuentes en la entrada de la primavera. Esto se debe a que es frecuente que, durante parte del año, las aguas de lagos y embalses no demasiado profundos se estratifiquen (principalmente por diferencias de densidades relacionadas con la temperatura), generando muy poco intercambio dentro de la masa del cuerpo de agua.

Con la llegada de la primavera, ocurren fenómenos de mezcla en la masa de agua (Figura 4-8 y Figura 4-9), asociados y favorecidos por el ascenso de la temperatura ambiente. En este proceso de recirculación de las aguas del lago, parte del fósforo que se encontraba depositado en los sedimentos del fondo es resuspendido y vuelve a estar disponible, reduciendo las posibles restricciones al crecimiento de los organismos productores ante la mayor cantidad de nutrientes accesibles.

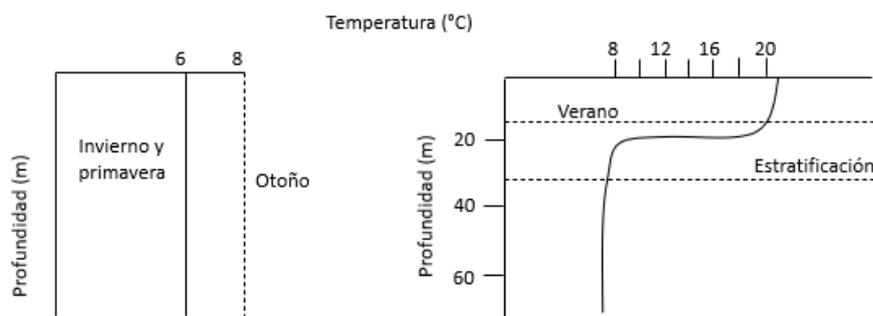


Figura 4-8. Perfil vertical de temperatura en un lago en diferentes periodos del año (redibujado de Tyler Miller, 1990)

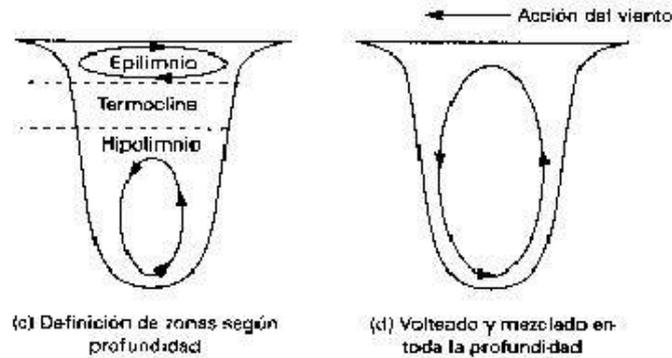


Figura 4-9 Estratificación estival (izq.). Mezcla del lago por efectos térmicos y mecánicos (der.) (Tomado de Tyler Miller, 1990)

4.11.4. Descripción de un evento de contaminación eutrófica

Genéricamente los procesos eutróficos se deben a la presencia de un exceso de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo) que favorecen la ocurrencia de floraciones algales y de macrofitas. Estas floraciones o blooms son crecimientos explosivos de organismos productores durante el período de exceso de nutrientes, que pueden colorear el agua y generar una disminución de la calidad de esta.

La eutroficación puede ser natural (el pasaje de laguna a pantano y de pantano a pradera forma parte de las cadenas de sucesión naturales) o cultural (generada, favorecida o acelerada por procesos debidos a actividades humanas). Por lo general son los episodios asociados con eutroficación cultural los que generan mayor preocupación.

Hasta aquí, la mayor parte del problema parece asociarse fundamentalmente con el aspecto desagradable y la interferencia con usos del agua tales como el transporte, la recreación y la potabilización, que se ve perjudicada por problemas varios, principalmente en la etapa de filtración.

Pero esa cantidad anormal de biomasa generada se ve sometida a múltiples factores de estrés: violentas fluctuaciones de oxígeno disuelto (Figura 4-10) y pH, vinculadas a la alternancia de períodos en que los abundantes organismos productores presentes realizan fotosíntesis y respiración. Asimismo, el descontrolado crecimiento hace que se produzca una creciente escasez de nutrientes. Como consecuencia de todo esto, la biomasa comienza a morir. Los organismos muertos entonces entran en proceso de degradación y este proceso ejerce una fuerte demanda de oxígeno. En esta etapa puede llegar a agotarse el oxígeno disuelto, o generarse fluctuaciones tan grandes de concentración entre el día y la noche (horas de fotosíntesis y horas de respiración) –en general acompañadas por fluctuaciones de pH asociadas con la misma causa- que condicionen la supervivencia de muchos organismos e incluso causen su muerte y desaparición. A los anteriores conflictos se agregan entonces fenómenos de desoxigenación y liberación de toxinas por parte de las algas que mueren, que pueden perjudicar a las distintas formas de vida presentes en el cuerpo de agua. Si el agua se emplea para potabilizar, la muerte de las algas y la liberación de toxinas pueden conferir al agua olor y sabor desagradables; para eliminarlos, se pueden requerir operaciones adicionales durante el tratamiento, como el uso de carbón activado -como adsorbente- o de algún oxidante fuerte.

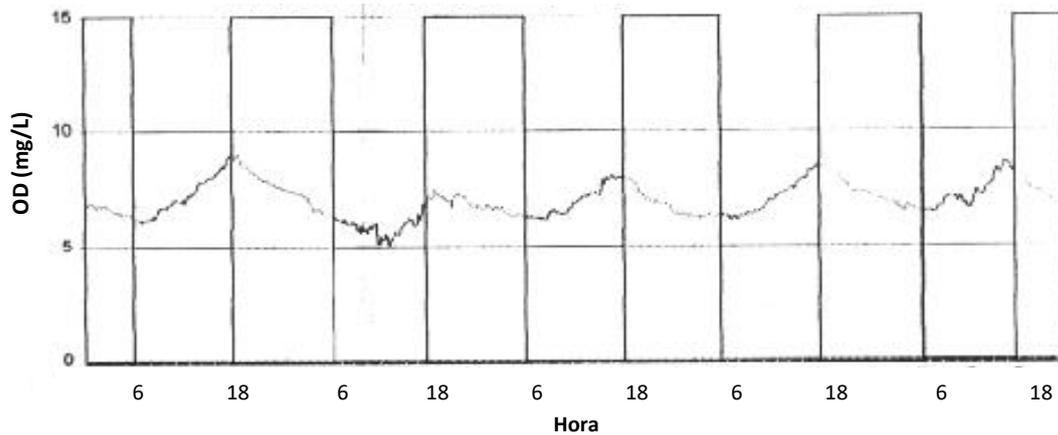
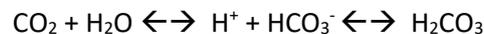


Figura 4-10 Fluctuaciones de OD superficial en un embalse en Brasil (nótense los ciclos diarios; los máximos ocurren a la tarde, en tanto los mínimos se dan a la salida del sol)

4.11.5. Fluctuaciones día-noche en un episodio de eutrofización

Durante los ciclos día – noche, los cuerpos de agua lénticos con una importante biomasa de organismos productores pueden sufrir fluctuaciones amplias en el pH debido a los ciclos de fijación – liberación de CO_2 que condicionan los desplazamientos de las reacciones de equilibrio de carbonatos y bicarbonatos (esto se presentó en las notas del Módulo Introductorio).

El CO_2 es mucho más soluble en agua que el oxígeno. Se genera en grandes cantidades como producto de la respiración, de procesos de degradación de materia orgánica, y otros. En general se puede plantear una ecuación de equilibrio entre el dióxido de carbono molecular y el ion bicarbonato en medio acuoso:



Durante el día los organismos fotosintéticos consumen CO_2 para cumplir sus funciones vitales, por lo que el equilibrio tiende a desplazarse hacia la izquierda para reponerlo. Por lo tanto, hay consumo de iones H^+ y en consecuencia, al bajar su concentración ocurre un incremento del pH del medio.

Inversamente, durante la noche los organismos fotosintéticos respiran liberando CO_2 al igual que los heterótrofos, y en esas condiciones el restablecimiento del equilibrio exige que la reacción se desplace hacia la derecha para consumir el exceso de CO_2 . En tales condiciones también se forma H^+ y en consecuencia el pH del medio tiende a decrecer.

Si bien el sistema carbonato–bicarbonato es muy importante en la capacidad buffer o amortiguadora del agua y ofrece resistencia a los cambios bruscos en el pH del medio, en determinadas condiciones –por ejemplo, en episodios de crecimiento explosivo de algas- las fluctuaciones en el pH y en el OD que se producen en el ciclo día-noche entre fotosíntesis y respiración pueden ser suficientemente violentas como para condicionar las posibilidades de supervivencia de muchos seres vivos.

4.12. Clorofila “a”

Vale la pena recordar que la clorofila es un pigmento propio de los organismos fotosintéticos.

Existen distintos tipos de clorofila. Entre ellas, la clorofila “a” tiene una relación directa con la productividad de los organismos fotosintéticos. La clorofila “a” está referida a la producción de algas

jóvenes, mientras que la productividad de las algas de mayor edad se estima mediante el valor de la clorofila "b". La clorofila "a" se emplea como un parámetro de calidad de aguas que aporta información sobre la presencia y multiplicación de organismos productores y complementa otros datos a la hora de interpretar información acerca del estado trófico de un cuerpo de agua.

Salas & Martino desarrollaron un gráfico de probabilidad de estado trófico de un lago a partir de las concentraciones de clorofila "a" (análogo al que se presenta en la Figura 4.4 para fósforo total).

4.13. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto OD indica la presencia de oxígeno molecular O₂ disuelto en la masa de agua y en consecuencia disponible para la respiración de los organismos aerobios. Se puede determinar tanto en campo (con una sonda adecuada) como en laboratorio.

Se ha visto ya que el valor que suele tomarse como límite mínimo para sostener la presencia de formas de vida medianamente complejas en un cuerpo de agua es de 5 mg/L de OD. Desde el punto de vista de las variables físicas del ambiente, la temperatura y la salinidad condicionan el valor del OD de saturación en el agua: a mayor temperatura o mayor salinidad, menor concentración de oxígeno disuelto de saturación.

Desde el punto de vista de la actividad biológica, la presencia de organismos fotosintéticos aporta OD durante las horas de luz solar. En contrapartida, estos mismos organismos consumen OD en horario nocturno. También la presencia de materia orgánica conduce a la ocurrencia de procesos que consumen OD, tanto en la masa de agua como en los lodos del fondo (demanda bentónica).

Otro proceso que tiende a incrementar el contenido de OD en las aguas es el intercambio superficial de gases, que se asocia con los fenómenos mecánicos de agitación debido al viento.

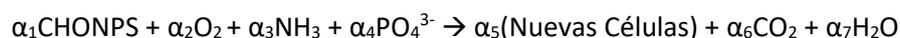
Es así que las *principales fuentes de OD* son la *fotosíntesis* y el *intercambio superficial*, en tanto los *consumos principales* vienen dados por los *organismos aerobios* y la *fauna bentónica*.

4.14. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación bioquímica de la materia orgánica contenida en una muestra de agua, durante un intervalo de tiempo específico y a una temperatura determinada.

La DBO aporta una medida indirecta de la materia orgánica presente en una muestra, que corresponde a la cantidad de oxígeno que se necesita para estabilizar (degradar, oxidar) *a través de procesos biológicos* la materia orgánica presente en dicha muestra.

La ecuación química que describe la DBO está dada por:



Donde en el primer miembro, el primer término es la materia orgánica, el segundo término el oxígeno disuelto demandado para la degradación de la materia orgánica, y el tercer y cuarto término son nutrientes requeridos por los microorganismos que realizan los procesos biológicos de degradación. Por otro lado, en el segundo miembro de la reacción se obtiene como productos

nuevas células de microorganismos, dióxido de carbono y agua. Los coeficientes α son estequiométricos.

Dado que se hace referencia a procesos biológicos, y como lo expresa la definición, es preciso indicar a qué temperatura y durante qué intervalo de tiempo se realiza el ensayo (ya se ha visto que la temperatura del medio condiciona la actividad metabólica de los seres vivos). Normalmente la DBO se determina por cultivo a una temperatura constante de 20 °C. La duración usual del ensayo es 5 días, por lo que suele hablarse de $DBO_{5,20^{\circ}C}$ o, simplemente, de DBO_5 . Se acepta que el valor de la $DBO_{5,20}$ es aproximadamente el 68 % de la DBO última, es decir, de la demanda de oxígeno que implicaría la degradación total por medios biológicos de la materia orgánica presente ($DBO_5 = 0,68 DBO_{\text{última}}$).

La determinación de laboratorio de la DBO_5 se realiza a partir de la diferencia en el contenido de OD de la muestra antes y después del cultivo.

La evolución de la demanda bioquímica de oxígeno en el tiempo se puede describir mediante una curva exponencial, siendo k_1 conocida como constante de desoxigenación (es un valor dependiente del tipo de líquido de que se trate y de la temperatura). Si L_0 representa el máximo consumo de oxígeno asociado con la materia orgánica presente en la muestra ($L_0 = DBO_{\text{última}}$), para cada instante t se pueden definir dos valores complementarios: el oxígeno consumido hasta el instante t (la *DBO ejercida* hasta ese instante) y el oxígeno que falta aún consumir para completar el valor de L_0 (es decir, la *DBO remanente* en ese instante t):

$$\text{DBO ejercida hasta } t: L_t = L_0 - L_0 e^{-k_1 t} = L_0 (1 - e^{-k_1 t})$$

$$\text{DBO remanente en } t: L_r = L_0 e^{-k_1 t}$$

En cada instante se verifica: $DBO \text{ ejercida} + DBO \text{ remanente} = L_0 = DBO_{\text{última}}$

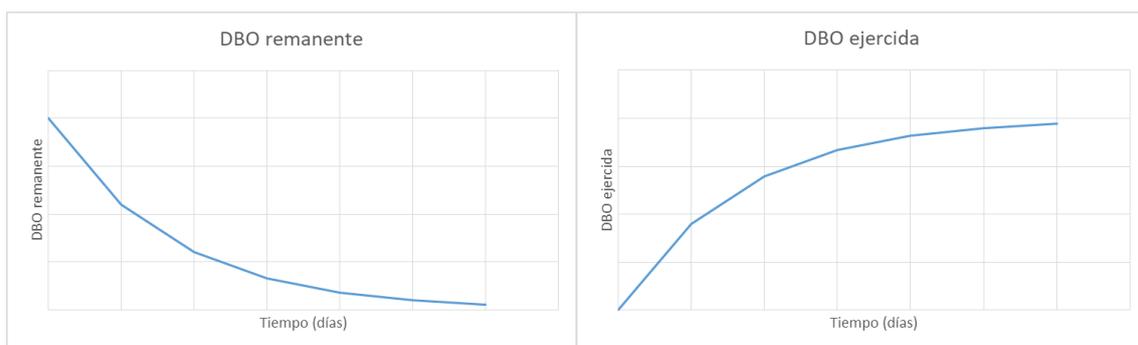


Figura 4-11. DBO en función del tiempo: DBO remanente (izq.) y DBO ejercida (der.) (Elaboración propia)

Si se vierte materia orgánica en un curso de agua, a continuación, se inician los procesos de biodegradación que conllevan el decaimiento del oxígeno disuelto del curso debido al consumo de los microorganismos para estabilizar dicha materia orgánica. Los tenores de OD en el curso de agua condicionan las formas de vida que están presentes en él, en función de sus límites de tolerancia (Figura 4-12).

Mientras existe OD en la masa de agua, se dan a la vez y en forma natural procesos de recuperación que se oponen a la desoxigenación impuesta por la degradación de la materia orgánica. Estos fenómenos se conocen como *fenómenos de reaireación*, y se asocian con el intercambio superficial

de gases. Esto hace que el tenor de OD descienda hasta un mínimo que ocurre a la llamada “distancia crítica” aguas abajo del vertido, en el denominado “punto crítico”. Tanto la ubicación del punto crítico como el valor de OD en él (el “OD crítico”) pueden calcularse en función de las características del curso de agua y del vertido (Figura 4-12 y Figura 4-13). A partir del punto crítico, los fenómenos de reaireación comienzan a primar sobre los de desoxigenación, por lo que concentración de OD tiende a recuperarse; en teoría, el OD aumentará asintóticamente hasta el valor de saturación correspondiente a las características del curso de agua (temperatura, salinidad, etc.).

En tanto el oxígeno crítico se mantenga por encima de cero, es de esperar que el curso de agua recupere sus niveles de oxígeno gracias a su **capacidad de autodepuración**. La autodepuración es posible en tanto el cuerpo de agua se mantenga siempre en condiciones aerobias.

La presencia de materia orgánica en un curso de agua puede ocasionar fenómenos de desoxigenación en él, a causa de los consumos de oxígeno disuelto originados por la actividad de los microorganismos para degradar y estabilizar la materia orgánica.

Diferentes sustancias requieren distintas cantidades de oxígeno para su degradación biológica, o lo que se puede decir de otra manera, tienen diferente DBO. Los líquidos residuales domésticos, que incluyen la totalidad de los desagües de una vivienda, tienen una DBO de entre 200 mg/L y 300 mg/L. Esto quiere decir que se necesitan entre 200 mg y 300 mg de oxígeno molecular por cada litro de líquido residual doméstico para estabilizar biológicamente la materia orgánica allí presente.

Pero si el OD se agotara, el proceso dejaría de ser reversible y el curso ya no se recuperaría por mecanismos propios. Cuando un cuerpo de agua llega a estado anaerobio, se pierden además muchas de las características que lo pueden hacer un elemento agradable en el entorno.

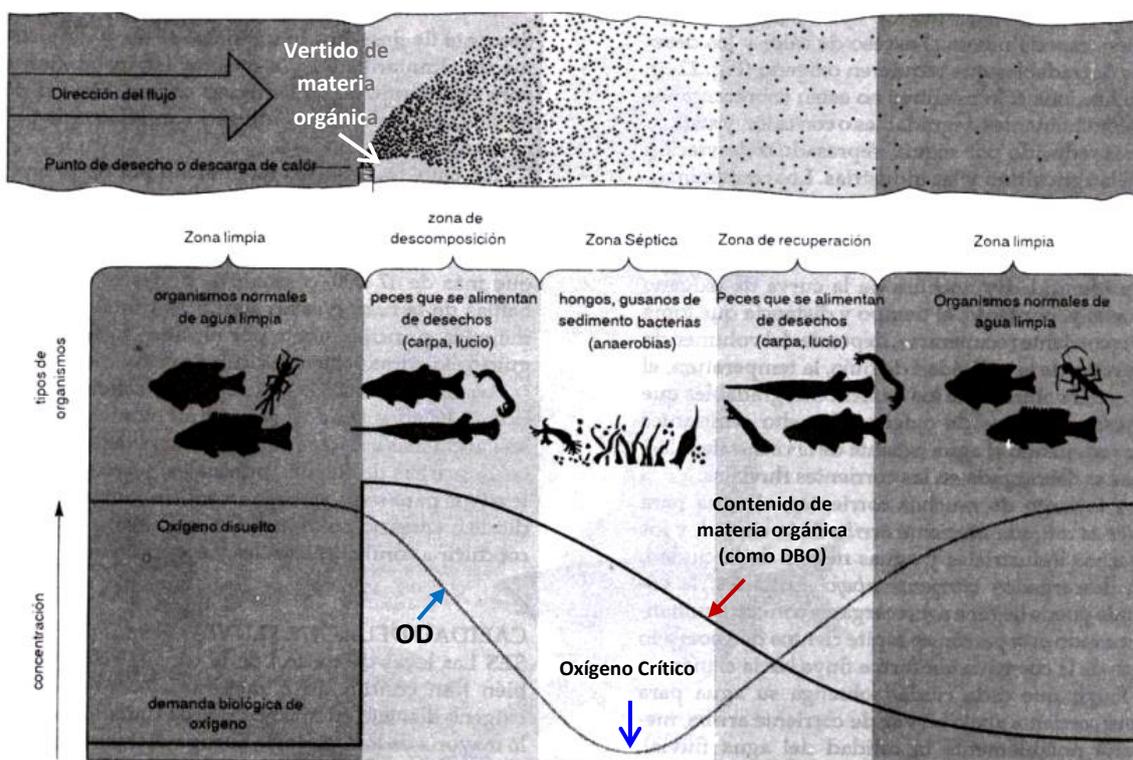


Figura 4-12 Desoxigenación y autorrecuperación en un cuerpo de agua lótico (tomada de Tyler Miller, 1990)

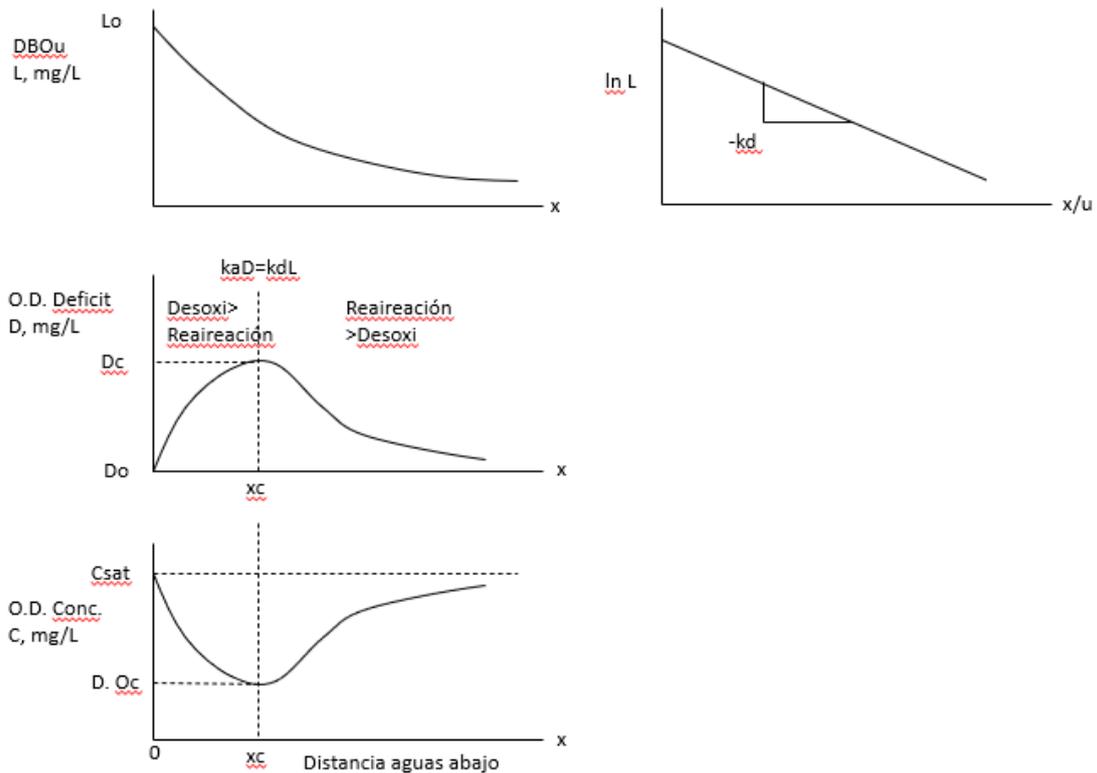


Figura 4-13. Concentración de OD aguas abajo de un vertido (x_c es el punto crítico) (elaboración propia)

Visualmente, en la superficie de las aguas sépticas –que suelen tener color oscuro- puede llegar a observarse el desprendimiento de burbujas de gas originadas en la degradación de la materia orgánica, y la aparición de olores ofensivos promueve una sensación de rechazo e incomodidad.

El análisis de la evolución del OD en un cuerpo de agua que admite ser considerado como unidimensional a estos efectos, suele realizarse empleando el modelo de Streeter & Phelps. Si bien es un modelo sencillo, de resolución explícita y que data de hace varias décadas, sus resultados son aproximaciones confiables en cuanto a los valores de OD esperables y a la ubicación del punto crítico.

Este modelo se basa en el cálculo del Déficit de Oxígeno (D) en el cuerpo de agua, entendiendo por tal la diferencia entre el OD de saturación y el OD real que se tiene en un cierto instante. A título informativo, sea:

- $D = OD_{sat} - OD_{real}$
- k_1 = constante de desoxigenación
- k_2 = constante de reaireación
- L_0 = DBO del vertimiento que ocurre en $t = 0$ y $x = 0$

Luego:

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D$$

En el instante t el déficit de oxígeno se calcula como:

$$D_{(t)} = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_{(t=0)} e^{-k_2 t}$$

En el punto crítico, el déficit crítico (déficit máximo) es:

$$D_{crit} = \frac{k_1}{k_2} L_0 e^{-k_1 t}$$

Y el mínimo valor de OD en el cuerpo de agua es entonces:

$$OD_{min} = OD_{sat} - OD_{crit}$$

A su vez, asignando una velocidad al flujo del agua, se puede llevar el valor de t_{crit} a una posición x_{crit} , que es lo que suele tener mayor interés a efectos prácticos.

El tiempo crítico para el que ocurre el valor del déficit crítico se calcula como:

$$t_{crit} = \frac{1}{k_2 - k_1} \text{Log}_e \left[\frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{D_{(t=0)}(k_2 - k_1)}{k_1 L_0} \right) \right]$$

A título informativo, en las tablas 4.2 y 4.3 se presentan algunos valores de las constantes k_1 y k_2 .

Tabla 4-2. Algunos valores de la constante de desoxigenación k_1 (varias fuentes)

	k_1 (día ⁻¹)
Agua residual no tratada	0,35 – 0,7
Agua residual tratada	0,10 – 0,25
Curso de agua que recibe un efluente no tratado concentrado	0,35 – 0,45
Curso de agua que recibe un efluente con tratamiento primario	0,30 – 0,40
Curso de agua que recibe un efluente con tratamiento secundario	0,12 – 0,24
Curso de agua no contaminado	0,08 – 0,20

Tabla 4-3. Algunos valores de la constante de reaireación k_2 (tomado de Kiely, 1999)

	k_2 a 20 °C (día ⁻¹)
Pequeñas lagunas	0,1 – 0,23
Ríos de aguas muy lentas, grandes lagos	0,23 – 0,35
Ríos de velocidad lenta	0,35 – 0,46
Ríos de velocidad media	0,46 – 0,69
Ríos rápidos	0,69 – 1,15
Rápidos, torrentes	> 1,15

4.15. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno que se consume al oxidar químicamente la totalidad del material oxidable presente en una muestra, por acción de un oxidante fuerte en condiciones controladas de temperatura y tiempo. La determinación de la DQO es mucho más rápida que la de la DBO₅ (2 horas en vez de 5 días) pero no aporta la misma información que ésta; en particular, no da información acerca de la biodegradabilidad del líquido en cuestión.

El valor de la DQO es necesariamente mayor que el de la DBO, puesto que en este caso se está oxidando más material que el que es biológicamente oxidable.

La relación DQO/DBO suele proporcionar información útil:

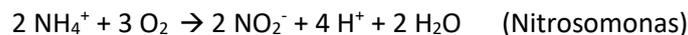
- En líquidos cloacales, su valor es aproximadamente 2 (DQO = 2 · DBO₅).
- En líquidos conteniendo materia orgánica no rápidamente biodegradable, la relación suele dar más de 3.

- Valores mayores que 5 (aproximadamente) advierten que puede haber algún agente en la muestra que inhiba el crecimiento de los microorganismos (por ejemplo, tóxicos).

4.16. Demanda Nitrogenada de Oxígeno (DNO)

Una vez que se agota el oxígeno disuelto y por ende los organismos aerobios estrictos desaparecen, se inician procesos anóxicos en los que se consume oxígeno combinado. La demanda nitrogenada de oxígeno es la *demanda de oxígeno combinado que ocurre en el proceso de nitrificación*, es decir, en la oxidación de amoníaco a nitrato mediante la acción de las bacterias nitrificantes: las *nitrosomonas* se ocupan del pasaje de amonio a nitrito y las *nitrobacter* realizan la oxidación de nitrito a nitrato.

Las ecuaciones químicas que describen el proceso de nitrificación son las siguientes:



Para que las bacterias nitrificantes se desarrollen y ejerzan una demanda de oxígeno medible, es necesario un período entre 6 y 10 días, debido a la baja velocidad de crecimiento de las mismas.

La DNO se puede calcular a partir del valor de NKT, el Nitrógeno Kjeldahl Total, que es la suma del contenido de nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) más el nitrógeno orgánico:

$$\text{NKT} = \text{NH}_4^+ + \text{N}_{\text{org}}$$

A partir de las ecuaciones que representan el proceso de nitrificación, se puede hacer el cálculo estequiométrico de cuánto oxígeno es requerido para oxidar el amonio presente en el agua. Se obtiene así:

$$\text{DNO} = 4,57 \cdot (\text{NKT})$$

Esta ecuación significa que para convertir un gramo de nitrógeno NKT en nitrato (NO_3^-) se requieren 4,57 gramos de oxígeno molecular.

4.17. Aceites y Grasas

Las grasas animales y los aceites son cuantitativamente el tercer componente de los alimentos. Son compuestos (ésteres) de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Los ésteres de ácidos grasos que son líquidos a temperatura ambiente se designan como aceites y los que son sólidos, como grasas. Químicamente son muy semejantes (compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno en diversas proporciones). Las grasas están entre los compuestos orgánicos más estables y no son fácilmente degradables por acción bacteriana.

Las grasas y aceites son sustancias no miscibles con el agua que, al ser más livianas que ella, flotan en su superficie. Por esta razón, introducen la posibilidad de aparición de zonas con dificultades de intercambio de gases en la superficie del cuerpo de agua, interfiriendo con las condiciones para el desarrollo de la vida.

El contenido de grasas y aceites se expresa en mg/L. Como puede ser determinado por diferentes técnicas de laboratorio, es conveniente conocer la que se ha empleado para obtener un resultado,

puesto que puede haber variaciones en función de qué materiales son los efectivamente cuantificados en el ensayo.

4.18. Tóxicos

Los agentes tóxicos presentes en el agua pueden ser muy diversos tanto en naturaleza como en origen y, por supuesto, también en cantidades. Entre los tóxicos de mayor interés desde el punto de vista de contaminación de aguas se encuentran muchos biocidas y metales pesados. En la Tabla 4-4 y Tabla 4-5 se presenta una somera información sobre dichos tóxicos.

Tabla 4-4. Principales familias de plaguicidas

Plaguicidas	Organoclorados	Son contaminantes orgánicos persistentes, cuyo uso está prohibido en buena parte del mundo.
	Organofosforados	Compuestos orgánicos degradables que contienen fósforo
	Carbamatos	Compuestos derivados de aminas, es decir, contienen N. Son poco tóxicos.
	Piretroides	Insecticidas sintéticos, no persistentes y con bajo efecto residual. Se emplean especialmente contra mosquitos. No tienen casi efectos adversos sobre otras especies.
	Organometálicos	Plaguicidas sintéticos derivados del tributilestano (TBE) y del metilmercurio.

Tabla 4-5. Principales aplicaciones y efectos de algunos metales y agentes inorgánicos

	Usos	Efectos
Arsénico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Como preservante de la madera. ▪ En pigmentos ▪ Insecticidas (arseniato de plomo) y herbicidas (arsenito de sodio). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveles crónicos de toxicidad en humanos causan lesiones en piel tales como queratosis, hiperqueratosis, hiperpigmentación y lesiones vasculares en sistema nervioso e hígado. ▪ Las afecciones agudas aparecen por exposición a dosis elevadas y pueden ser letales. Sus primeros efectos suelen ser fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia.
Cadmio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En galvanoplastia, como recubrimiento. ▪ En pigmentos en la fabricación de pinturas. ▪ En la fabricación de baterías. ▪ En soldaduras y aleaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Con niveles crónicos de exposición se observa anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, pérdida de peso y apetito, cáncer de próstata y pulmón. ▪ Ante exposiciones agudas se puede producir neumonitis y edema pulmonar, gastroenteritis, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, fallo renal, y finalmente puede ocurrir aberraciones cromosómicas, efectos teratogénicos y congénitos.
Plomo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cubierta para cables. ▪ En pigmentos sintéticos o artificiales. ▪ Para la fabricación de esmaltes de vidrio y de cerámica. ▪ Como detonante para algunos explosivos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produce retraso del desarrollo mental e intelectual de los niños. Causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en adultos. ▪ Los efectos agudos en el sistema nervioso central (SNC) consisten en parestesia, dolor y debilidad muscular, crisis hemolítica-anemia grave y hemoglobinuria.
Mercurio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Como detonante. ▪ Como purgante, antihelmíntico y diurético ▪ En instrumental científico, aparatos eléctricos, ortodoncia, etc. ▪ Como agente bacteriostático 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las consecuencias de una intoxicación crónica por mercurio pueden ser temblores, hipertrofia de tiroides, taquicardia, gingivitis, cambios en la personalidad, eretismo, pérdida de memoria, depresión severa, delirios y alucinaciones.
Cromo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En metalurgia, para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante. ▪ En aleaciones para materiales inoxidables (se requiere al menos 5 % de concentración) ▪ En procesos de cromado por electrodeposición ▪ En pinturas cromadas como tratamiento antioxidante ▪ En el curtido del cuero ("curtido al cromo") ▪ Como preservante de la madera 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los efectos incluyen irritación del revestimiento del interior de la nariz, secreción nasal, y problemas para respirar (asma, tos, falta de aliento, respiración jadeante). También se pueden desarrollar alergias a compuestos de cromo, lo que puede producir dificultad para respirar y sarpullido en la piel. ▪ Los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humanos.

	Usos	Efectos
Zinc	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En galvanizado. ▪ Baterías para computadoras portátiles. ▪ En piezas de fundición inyectada ▪ En fabricación de pinturas al óleo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El zinc es un nutriente esencial para la vida. Forma parte de numerosas enzimas en el cuerpo humano, pudiendo tener un rol catalítico, estructural o regulador.
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En conductores y materiales eléctricos. ▪ En tuberías. ▪ En monedas. ▪ Como abono ▪ Como biocida ▪ En pigmentos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La exposición aguda por ingestión de sulfato de cobre puede producir necrosis hepática y muerte. ▪ La exposición crónica por alimentos conservados en recipientes de cobre genera lesiones hepáticas en niños.
Cianuros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En la producción de papel, pinturas, textiles y plásticos. ▪ En galvanoplastia. ▪ Como plaguicida (rodenticida, insecticida) en barcos, edificios y otros lugares. ▪ En hidrometalurgia, para extraer y recuperar metales como oro y plata por lixiviación. ▪ En algunas industrias de la alimentación como la vitivinícola 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Su acción biológica lo caracteriza como un inhibidor enzimático no específico. ▪ El SNC es su órgano blanco primario, pero también la tiroides y el riñón. ▪ Efectos: deterioro mental, trastornos visuales, alteraciones tiroideas, dermatitis de características variables, aunque siempre con el fondo de una piel color rojo cereza, debido al incremento de la saturación de la hemoglobina en sangre venosa. En algunos casos puede ocurrir cianosis.
Asbestos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Como material de construcción en tejas, baldosas, azulejos, cemento. ▪ En la fabricación y reparación de automóviles, camiones y tractores (embragues, frenos, juntas o componentes de la transmisión). ▪ En la construcción naval, reparación y desguace de barcos. ▪ En el sector eléctrico (centrales térmicas) ▪ En protección ignífuga de estructuras metálicas y trajes de bomberos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La exposición ocupacional puede desarrollar lentamente lesiones que parecen cicatrices en el pulmón y la membrana que rodea a los pulmones. Este tejido necrosado no se expande o contrae como un tejido normal, por lo que se hace difícil respirar. También puede disminuir el flujo de sangre a los pulmones, y esto hace que el corazón se dilate. Esta enfermedad se llama asbestosis. ▪ Cáncer pulmonar y mesotelioma.

Para cada agente en particular se puede determinar su concentración en laboratorio e informar un valor en mg/L o similar ($\mu\text{g/L}$, ng/L , etc.). Estos análisis requieren equipamiento sofisticado, por lo que no son todos los laboratorios que los realizan. Vale aclarar que la contaminación tóxica puede tener origen natural o antropogénico. Aunque por lo general el foco suele estar sobre las acciones del hombre, hay casos de contaminación tóxica natural como la debida a elevado contenido de arsénico en acuíferos, un problema que ha conducido a desarrollar técnicas de control de este contaminante cuando el agua subterránea debe usarse como fuente para el abastecimiento público.

Cuando se desea comparar diferentes sustancias desde el punto de vista de su potencial afectación a un sistema biótico, se suelen emplear las Unidades de Toxicidad (UT). De este modo se pueden comparar los efectos de diferentes tóxicos sobre una misma especie; de un tóxico sobre una especie de acuerdo con la vía de exposición; de un tóxico sobre distintas especies; etc. Cuanto mayor es el valor en UT, más peligroso resulta ser el agente dado que esto implica que su DL_{50} es menor.

4.19. Detergentes y agentes tensoactivos

Los agentes tensoactivos son aquellos capaces de reducir la tensión superficial del agua. En consecuencia, promueven la formación de espumas. La presencia de éstas en el agua es una causa relevante de reducción de las superficies de intercambio de gases del cuerpo de agua. La formación de espumas puede verse además favorecida por otras características del líquido, como por ejemplo su temperatura.

Los detergentes pueden revestir interés ambiental además desde otros puntos de vista y no sólo como agentes espumígenos (por ejemplo, por su composición química: detergentes ricos en fósforo, biodegradables o no, etc.).

5. Contaminación de aguas subterráneas

5.1. Principales contaminantes en aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen un recurso no renovable en una escala de tiempo humana, por lo que su protección y preservación libre de contaminantes deberían ser prioritarias. Sin embargo, inevitablemente están sujetas a problemas de calidad, algunos vinculados a características hidrogeológicas propias del sitio de explotación y otros, derivados de la presencia de contaminantes naturales o no naturales como resultado de intervenciones antrópicas.

Los principales **contaminantes naturales** presentes en aguas subterráneas son **compuestos de calcio y magnesio** que provocan dureza elevada, presencia de **hierro, manganeso y nitratos**. Por cierto, la concentración de estos contaminantes puede verse magnificada a causa de actividades antrópicas.

Hay algunas áreas naturalmente comprometidas, como por ejemplo la zona de Mendoza en Argentina, que tiene un subsuelo rico en **arsénico**; las aguas subterráneas que se destinan para consumo humano en esa zona deben tratarse para evitar problemas de hidroarcanicismo. En el caso de Uruguay, el arsénico también tiene origen natural, en la disolución de vidrio volcánico. Es un tema de gran importancia porque en zonas rurales una gran parte de la población es abastecida con agua subterránea, principalmente en la zona del litoral. Si se considera únicamente la población abastecida por los acuíferos Mercedes y Raigón, actualmente hay más de 113.000 personas que reciben agua desde la red pública que no cumple con la normativa vigente (Valor Máximo Permitido para Arsénico 10 µg/L, actualizado en 2011 a las recomendaciones de OMS).

Diferentes procesos antrópicos pueden contaminar las aguas subterráneas. Los principales **contaminantes naturales** asociados con procesos antrópicos son los siguientes:

- **Agentes bacteriológicos** -en general provenientes de la infiltración de depósitos sanitarios fijos filtrantes (pozos negros filtrantes)-, susceptibles de cerrar el ciclo fecal – oral cuando las aguas subterráneas se emplean para consumo humano o para riego.
- **Nitratos**, como producto de degradación de materia orgánica, que pueden producir metahemoglobinemia (enfermedad de los niños azules) en niños pequeños.
- **Salinidad**, que puede ocurrir en zonas costeras por sobreexplotación de la napa de agua dulce que permite al agua salada penetrar formando una cuña salina, cuyos efectos pueden irse ampliando con el paso del tiempo y comprometiendo la calidad del agua para consumo humano, riego, etc. Este proceso se designa como **intrusión salina** (Figura 5-1).

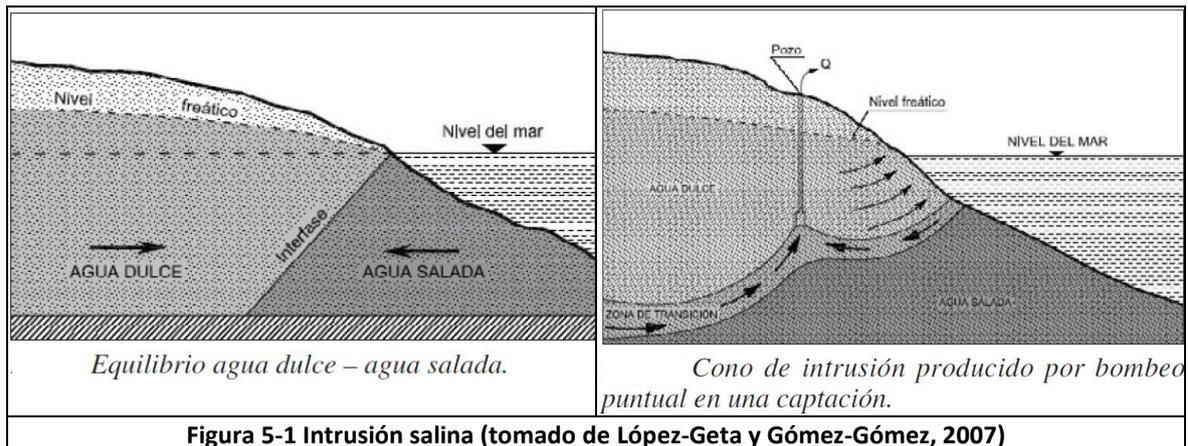


Figura 5-1 Intrusión salina (tomado de López-Geta y Gómez-Gómez, 2007)

Entre los **contaminantes xenobióticos** que suelen presentarse en aguas subterráneas, cabe indicar:

- **Biocidas:** susceptibles de contaminar las aguas subterráneas a partir de usos agropecuarios y no agropecuarios. Entre los usos no agropecuarios, se puede mencionar el control de taludes en carreteras; desmalezado de líneas de ferrocarril; campos de juego; polígonos industriales; baños desparasitadores de ganado; usos domésticos. En general, actualmente los usos agropecuarios de biocidas preocupan más desde el punto de vista de las aguas superficiales que de las aguas subterráneas.
- **Disolventes industriales,** en particular los disolventes clorados como percloroetileno, tricloroetileno, cloruro de metileno, entre otros. Son contaminantes orgánicos persistentes. Se usan como desengrasantes en varias industrias (metales, electrónica, química, textil, papel, cuero), y en el laboratorio de mezclas asfálticas.
- **Aceites minerales refinados,** incluyendo combustibles, gasolinas, etc. Producen olor y sabor en el agua subterránea, además de conferirle sus características tóxicas propias. Pueden provenir de fugas en depósitos subterráneos o de derrames durante el transporte.

5.2. Principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas pueden ser puntuales o difusas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

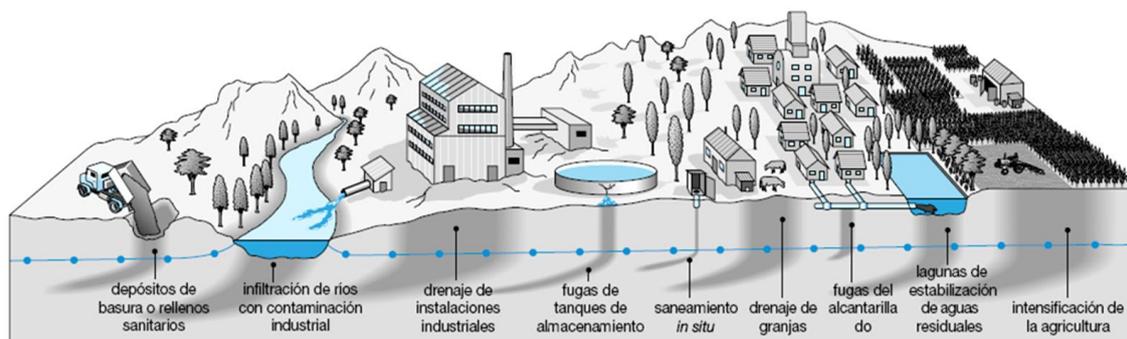


Figura 5-2 Fuentes puntuales y difusas de contaminación de aguas subterráneas. Tomado de RALCEA (2014)

En el caso de las **fuentes puntuales**, se puede identificar el punto de descarga de contaminantes o de ingreso a las aguas subterráneas. Las principales son:

- Filtraciones desde instalaciones enterradas (depósitos de combustible o de productos químicos).
- Filtraciones desde depósitos sanitarios fijos permeables.
- Filtraciones desde lagunas de estabilización con impermeabilización defectuosa.
- Efluentes o residuos en condiciones o cantidades inconvenientes para ser dispuestos por infiltración al terreno.
- Vaciado de baños de ganado (plaguicidas).
- Inyección de contaminantes en pozos profundos.

Cuando se habla de **fuentes difusas** se trata de fuentes por lo general de área, extensas, de límites imprecisos, que hacen llegar contaminantes a las aguas subterráneas por lo general por lixiviación (disolución). Entre las fuentes difusas cabe mencionar:

- Lixiviados agrícolas (nutrientes y plaguicidas).
- Lixiviados desde vertederos de residuos sólidos con impermeabilización defectuosa (o inexistente).
- Escurrimientos pluviales de áreas urbanas.

5.3. Vulnerabilidad de acuíferos

El concepto de **vulnerabilidad** se refiere a las **características** geológicas e hidrogeológicas **intrínsecas** que determinan la **facilidad** con la que el agua subterránea puede **contaminarse** a consecuencia de las actividades humanas. La contaminación de las aguas subterráneas se vincula con el tiempo de viaje del agua en la napa, con la cantidad relativa de contaminante que es capaz de alcanzar el agua subterránea y con la capacidad de atenuación - retención de contaminantes que tengan los materiales geológicos. Por lo tanto, la vulnerabilidad de un acuífero está condicionada por cuatro factores principales:

- **El tipo de recarga (puntual o difusa):** la conexión con la superficie terrestre es muy importante a los efectos de la vulnerabilidad; cuando la conexión es más fácil y rápida, el agua subterránea resulta ser más vulnerable que cuando recibe su recarga más lentamente y en menores cantidades.
- **El tipo y espesor de suelo y de subsuelo que están por encima de la zona saturada,** en tanto su capacidad de actuar como protección física, química y biológica. Un subsuelo más arcilloso evitará el movimiento vertical de los contaminantes y facilitará su adsorción, el intercambio iónico y la precipitación. Las arcillas actúan reteniendo bacterias, virus y contaminantes químicos. En cambio, las arenas y gravas tienen la propiedad de permitir el fácil acceso de los contaminantes a la napa freática, debido a su permeabilidad.
- **La profundidad de la zona no saturada hasta alcanzar la zona saturada:** el flujo en la zona no saturada facilita el tiempo y las oportunidades para la interacción entre el contaminante y los granos del suelo, retrasando la entrada del contaminante al agua subterránea. Además, los

procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en la zona no saturada, puestos en medio del “viaje” del agua desde la superficie hasta la zona saturada reducen la probabilidad de contaminación. A mayor espesor de la zona no saturada, mayor protección de las aguas subterráneas.

- **La conductividad hidráulica:** las zonas en las que el flujo se da por fisuras de las rocas son más vulnerables que aquellas en las que el flujo ocurre en medio poroso.

Los mapas de vulnerabilidad aportan una herramienta confiable y útil a los efectos de la planificación territorial en materia de instalación de nuevos emprendimientos y gestión de los existentes. En la Tabla 5.1 se presentan algunas características de zonas de alta y baja vulnerabilidad.

Tabla 5-1. Algunas características que inciden en la vulnerabilidad de un acuífero

	Baja vulnerabilidad	Alta vulnerabilidad
Tipo de recarga	Difusa	Puntual
Contenido orgánico/de arcillas en suelo/subsuelo	Alto	Bajo
Permeabilidad del subsuelo	Baja (por ejemplo, arcilla)	Alta (por ejemplo, grava)
Profundidad de la zona no saturada	Profunda	Poco profunda
Tipo de flujo	Intergranular	A través de fisuras

6. Contaminación de mares y océanos

Los sistemas marinos tienen algunas características que los diferencian de los sistemas de aguas continentales.

- Su temperatura es bastante más uniforme que en las aguas continentales y, por cierto, muchísimo más que en los sistemas terrestres.
- La salinidad en mar abierto es del orden de 35 a 40 por mil.
- El OD no suele ser limitante, salvo en casos puntuales, debido a la gran mezcla que ocurre a escala global.
- El pH es bastante estable y ligeramente básico, variando entre 7,5 y 8,4.

La productividad de las aguas marinas es muy variable en función de la latitud: las aguas tropicales tienen baja productividad, debido a que la estratificación térmica es casi permanente y los nutrientes quedan depositados en el fondo; en cambio, en las zonas frías las aguas están continuamente mezcladas, lo que produce un permanente reciclaje de nutrientes y confiere a estas zonas una alta productividad. Las aguas templadas actúan estacionalmente como sistemas de aguas cálidas o frías. Sin desmedro de ello, hoy en día no hay dudas de que los mares no podrían afrontar el sustento de la alimentación mundial, como se pensó hace algunas décadas.

6.1. Zonas costeras

Buena parte de la población mundial habita en zonas costeras. Esto hace que se viertan importantes cantidades de efluentes domésticos, industriales y urbanos –con diferente grado de tratamiento- a lo largo y ancho del planeta. En general, estos vertimientos son causa de problemas puntuales o a lo sumo alcance espacial acotado; los casos de mayor alcance geográfico están constituidos por las

descargas a través de emisarios subacuáticos, pero no dejan de ser problemas de contaminación en la plataforma continental o en aguas someras.

Un emisario subacuático bien diseñado, mantenido y operado, resulta una alternativa eficaz, confiable y económica para la disposición final de las aguas servidas en las grandes urbanizaciones costeras. El diseño apropiado de un emisario subacuático debe lograr diluciones suficientes de la descarga de aguas residuales como para reducir las concentraciones de contaminantes a niveles admitidos por las normas de calidad de agua. Para la descarga de aguas residuales, el mecanismo de mayor importancia para el diseño es el decaimiento de indicadores bacteriológicos, como son los coliformes fecales. Un parámetro que es estudiado para el diseño de estas obras es el T_{90} .

En el diseño conceptual de un emisario submarino se establecen sus dimensiones: longitud, diámetro, ubicación y profundidad de descarga. Para el diseño final estructural, se definen los materiales de la tubería, las técnicas de construcción y los requerimientos para sostener la tubería en el fondo del mar. Todo esto es posible una vez que se conoce el caudal que debe conducir el emisario y su composición, o sea, el tipo de efluente. También se debe contar con un estudio detallado sobre el oleaje y las corrientes dominantes del área de estudio, así como con estudios meteorológicos, batimétricos, geológicos, entre otros. Se recomienda instalar correntógrafos con registros incorporados para medir continuamente la velocidad y dirección de las corrientes a distintas profundidades y en distintas ubicaciones de interés. Además, es muy importante conocer el uso que se le da a las playas más próximas al vertido del emisario; los estudios de calidad del agua de ellas a modo de línea de base, permite evaluar la eficiencia del emisario una vez que se haya iniciado su operación.

6.2. Mar abierto

Los mares han sido usados largamente como vertederos de residuos sólidos y sitio de eliminación de desechos peligrosos como PCBs, residuos radiactivos, residuos de toxicidad elevada que ofrecían dificultades de tratamiento y disposición final. Estos vertimientos, de los que en su mayoría se carece de registros que cuantifiquen y califiquen los materiales dispuestos, han aportado contaminantes de diferente grado de peligrosidad a los ecosistemas acuáticos. Entre ellos, han sido vertidas muchas sustancias susceptibles de bioconcentrarse, bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica.

6.2.1. Derrames de hidrocarburos

A nivel superficial, los derrames de hidrocarburos provenientes de embarcaciones petroleras vienen desde hace varias décadas ocupando el interés mundial y en particular de las organizaciones no gubernamentales ecologistas y de protección de la fauna, con particular fuerza a partir del derrame del buque Exxon Valdez en el año 1989, recordado como uno de los primeros accidentes graves de este género.

El Convenio Internacional de 1990 sobre Cooperación, Preparación y Lucha Contra la Contaminación por Hidrocarburos OPRC proporciona el marco de cooperación internacional para combatir los incidentes importantes de contaminación por hidrocarburos. Su primer objetivo es actuar con prontitud y eficacia a fin de reducir a su mínima expresión los daños que puedan derivarse de un suceso de contaminación por hidrocarburos, en el entendimiento de que la acción temprana y

efectiva es esencial para minimizar el daño que pueda resultar de estos incidentes. El convenio reconoce y resalta especialmente el importante papel de las industrias petroleras y navieras en el tema. Este Convenio fue ratificado por nuestro país en agosto de 1994, a través de la Ley 16.521.

Las consecuencias de un derrame pueden oscilar desde efectos mínimos sobre la comunidad biológica a la muerte de todos los organismos de una zona; desde una afectación muy efímera a una zona de valor turístico a daños de reparación costosa y prolongada en el tiempo (International Petroleum Industry Environmental and Conservation Association IPIECA, 1999).

El más importante accidente que vivió nuestro país en lo relativo a derrames ocurrió en febrero de 1997, cuando el buque tanque "San Jorge" varó a una distancia de 20 millas marinas de la costa uruguaya y se produjo el derrame de unos 5.000 m³ de hidrocarburos. A lo inusual de este tipo de accidentes se sumó el hecho de que se produjera frente a una de las principales zonas turísticas del país y en pleno desarrollo de la temporada, así como en las inmediaciones de la reserva de fauna de la Isla de Lobos. En diciembre de 2018 ocurrió un vertido, de volumen mucho menor que el recién mencionado, debido a una rotura en un manguerón de la Boya Petrolera de José Ignacio.

En lo que respecta a historia reciente a nivel internacional, el 20 de abril de 2010 se produjo otro accidente mayor vinculado a hidrocarburos: la explosión e incendio de la plataforma petrolífera Deepwater Horizon, que se hundió 2 días después provocando un derrame de petróleo incontrolado en el golfo de México. Causó daños muy importantes, de complicada y lenta reparación.

6.2.2. Islas de plástico

Otro fenómeno de contaminación en mar abierto es el de las islas de plástico. Tanto en el Océano Atlántico como en el Océano Pacífico se conoce de la ocurrencia de gran afluencia de materiales en su mayoría flotantes, -literalmente varios cientos de toneladas de plástico- que se acumulan para formar "islas" de este material. Esos plásticos provienen del arrastre de residuos desde cuerpos de aguas superficiales en zonas urbanas, pero son también la consecuencia de décadas de vertido de residuos sólidos a los mares para "resolver" el problema de la disposición final. La existencia de las manchas de basura del este fue enunciada hace unos 30 años, en 1988, en una edición publicada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos. Sin embargo, en estas cuatro décadas el problema no ha hecho sino empeorar. En la Figura 6-1 se muestran los puntos en que ocurre la acumulación de residuos flotantes, junto con las principales corrientes oceánicas.

Al existir grandes ciudades en zonas costeras en todos los continentes y no haber como contraparte un sistema de infraestructura suficientemente robusto para la gestión de residuos sólidos, principalmente en los países subdesarrollados, muchos de sus residuos alcanzan a llegar al océano. Una vez allí, se da la tendencia a acumularse en regiones específicas de los océanos. Las corrientes marinas; la hidrodinámica de los océanos en la columna de agua, en particular la Espiral de Ekman; los vientos; la temperatura y densidad del agua; la rotación de la tierra que genera el Efecto Coriolis; y la existencia de los continentes, son quizá los principales condicionantes para el transporte de los residuos. Como combinación de las condiciones anteriores se generan en el hemisferio norte y en el hemisferio sur los "giros oceánicos", que son circuitos cerrados que existen entre las corrientes de los océanos, que "atrapan" los residuos que encuentran en su camino; así se generan estas masas concentradas de residuos en los océanos.

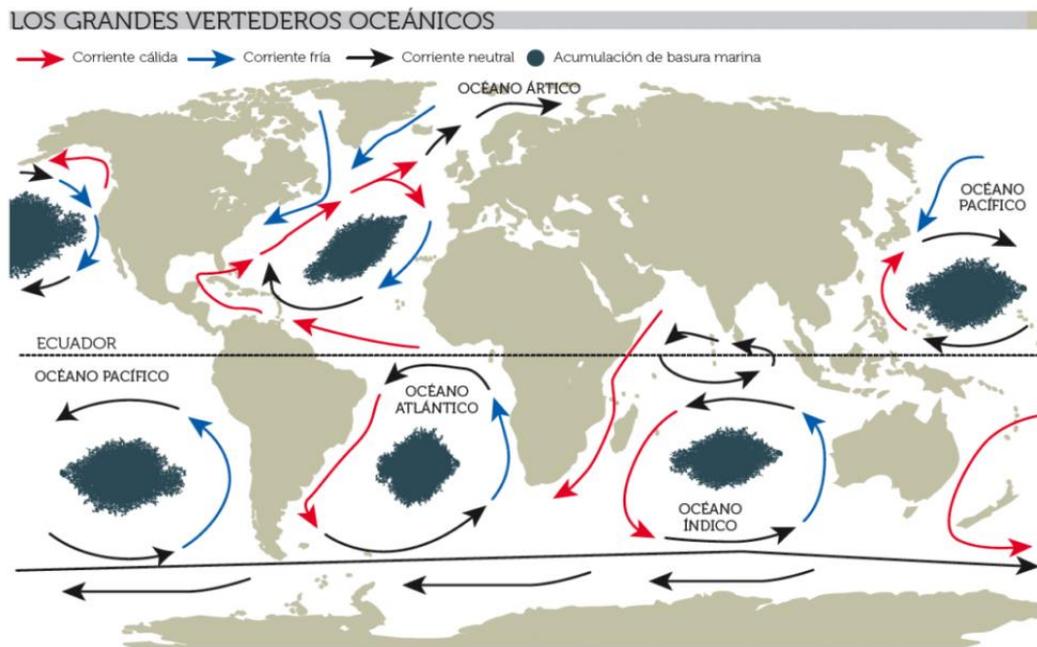


Figura 6-1. Ubicación de las principales islas de plástico en los océanos (tomado de BBC News)

En el Pacífico existe una mancha en el hemisferio norte y otra en el hemisferio sur; en el Atlántico también existen dos, una en cada hemisferio; y en el Océano Índico, existe una. Esas son las principales “islas de plástico” en el planeta; sin embargo, existen otras menores en el Mar Mediterráneo, debido a la gran población que hay en sus costas y la gran actividad marítima, turística y pesquera de la zona.

El plástico se degrada muy lentamente y puede permanecer flotando durante años. Más del 75 % de los residuos que se encuentran en estas islas tienen dimensiones de 5 cm o más. De 50 residuos recuperados en 2017 en la Gran Isla de Plástico del Océano Pacífico (ubicada entre Hawaii y Japón), uno era de 1977, siete de los años 80, 17 estaban fechados en los 90, 24 correspondían a la década de 2000 y uno era de 2010. Lebreton et al. (2018) estiman que la masa media de plástico en las islas flotantes de los océanos es del orden de 80.000 toneladas, aunque estimaciones de máxima sugieren que el valor podría alcanzar las 130.000 toneladas. En cuanto a superficie, se estima que la Gran Isla de Plástico del Pacífico se extiende por 1.600.000 km².

Muchos animales ingieren materiales plásticos y sufren consecuencias que por lo general se asocian con su muerte o, eventualmente, con la de sus predadores. Por otra parte, como consecuencia de su degradación, es posible encontrar derivados de polietileno y otros componentes en la matriz de las muestras de agua, por lo que los plásticos resultan ser predecesores de algunos contaminantes químicos en el cuerpo receptor. En la medida de que alguna porción de plástico resulta sedimentable, puede a su vez contaminar el lecho marino.

En la actualidad se dedican importantes esfuerzos para limpiar estas islas artificiales, con la expectativa de que desaparezcan. El holandés Boyan Slat realizó un diseño que opera desde hace algunos años, a cargo de la ONG “The Ocean Cleanup”; se presenta brevemente en la sección 6.3.1.

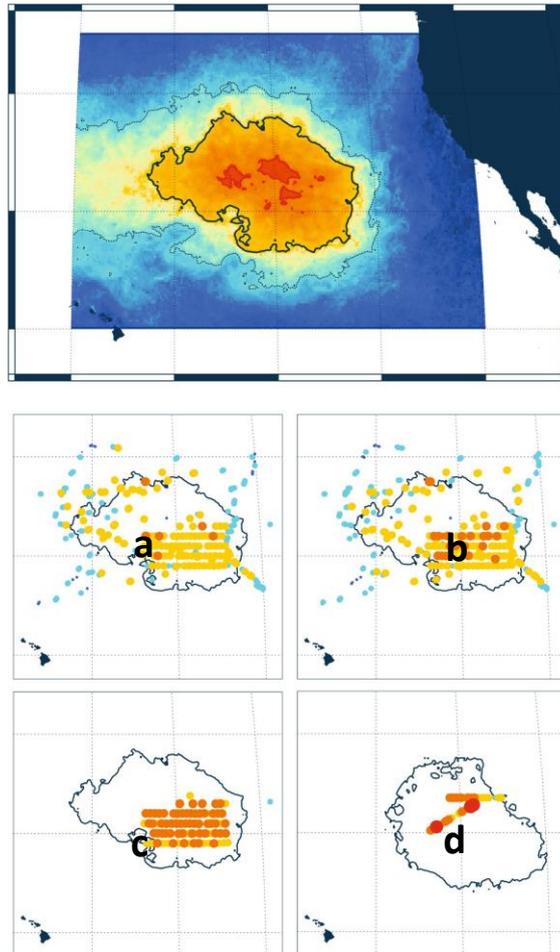


Figura 6-2. Concentración de residuos en la Gran Isla de Plástico del Pacífico, estimada por modelación (arriba). Valores medidos en 2015 de concentración de masa de residuos a partir de técnicas fotogramétricas (abajo): microplásticos (0.05–0.5 cm) (fig. a), mesoplásticos (0.5–5 cm) (fig. b); macroplásticos (5–50 cm) (fig. c); megaplásticos (>50 cm) (fig. d). (Tomado de Lebreton et al., 2018)

6.3. Retención de plásticos en cuerpos de agua

En esta sección se mostrarán de forma breve algunos dispositivos creados con el fin de retener plásticos en cuerpos de agua. Hay dispositivos utilizados en todo el mundo, de distintas escalas, ideados para distintos ambientes del medio acuático y con distintos niveles de complejidad.

6.3.1. The Ocean Cleanup

The Ocean Cleanup es una compañía sin fines de lucro, fundada en 2012 por Boyan Slat, con el fin de reducir los residuos plásticos existentes en los océanos inicialmente, luego también de los ríos.

Para reducir las manchas de plásticos del océano esta compañía ha ido mejorando el sistema de recolección de plásticos a lo largo de los años. Este consiste de una estructura flotante de hasta 2 kilómetros de longitud en forma de U que es arrastrada desde los extremos por dos embarcaciones a una velocidad relativa algo superior que la de las partículas que están en el agua. De esta forma, los plásticos se van aglomerando contra esta barrera que en el centro de la U tiene una red de gran capacidad de almacenamiento. Una vez que la red está llena, se carga su contenido sobre la cubierta de embarcaciones para ser transportada a tierra donde se busca que se recicle el plástico extraído del océano. En la Figura 6-3 se muestra el sistema.



Figura 6-3. Sistema 03 en la isla del Pacífico en agosto de 2023. Tomado de: <https://theoceancleanup.com/>

Sin embargo, tiempo después se vio que solo reduciendo el volumen de residuos plásticos en el océano no se terminaba el problema. Estos residuos alcanzan a llegar a donde se encuentran las islas de plástico debido a la hidrodinámica de los océanos, pero inicialmente alcanzan el mar abierto a través de los ríos. Es por esto que otra de las creaciones de The Ocean Cleanup es el Interceptor. Este dispositivo es una gran embarcación con un sistema de cintas mecánicas y compartimentos para almacenar los residuos interceptados en los cursos de agua tales como ríos o arroyos. Esta embarcación tiene un brazo extenso posicionado en diagonal a la embarcación, sobre la superficie del agua. De esta forma intercepta los residuos y los conduce a la entrada de la embarcación, como se ve en la Figura 6-4. Cualquiera de los sistemas creados por esta compañía tiene una gran robustez; su principal ventaja es poder retener un gran volumen de residuos.

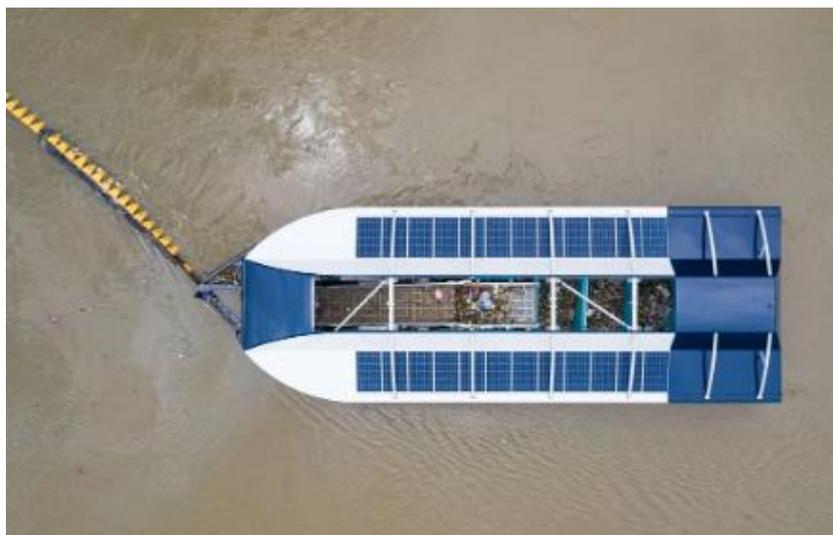


Figura 6-4. Foto aérea del Interceptor en un río de Malasia. Tomado de: <https://theoceancleanup.com/>

6.3.2. The Great Bubble Barrier

Como su nombre lo indica, este dispositivo inventado en Ámsterdam en 2017 retiene residuos en un curso de agua a través de la liberación de burbujas de aire. Para lograr esto se emplea una tubería

perforada en su dimensión longitudinal, la cual es dispuesta en el fondo del cauce, en diagonal, de forma que los residuos sean conducidos hacia una de las márgenes del cuerpo de agua. Necesita un sistema de aireación a presión (un compresor). La ventaja de este sistema es que es de poca complejidad de elaboración y a un costo no tan elevado, permite retener residuos en toda la columna de agua debido a que la barrera de burbujas se eleva desde el fondo del cauce; además, adiciona oxígeno el cuerpo de agua.

Este sistema ha sido analizado en el IMFIA para su uso en cursos de agua de Montevideo.



Figura 6-5. Prototipo de barrera de burbujas elaborado y ensayado por estudiantes de ingeniería mecánica en el laboratorio del IMFIA para su proyecto de grado en 2023. Tomado de: R. Carissimi, M. Izquierdo, N. Sabjan (2023)

6.3.3. Biobardas

Esta es una barrera, de tipo muy artesanal, creada en 2016 en Guatemala para reducir el volumen de residuos que alcanzaban las costas oceánicas donde se desarrolla el turismo del país. Consiste en una red de nylon que envuelve secciones de botellas de mismo volumen dispuestas alternadamente tocando fondo con fondo y pico con pico en toda su longitud. Las botellas van cerradas y sin compactar de manera que la barrera pueda flotar, a menos de una en cada sección, que debe ir cargada con arena o agua para darle peso y robustez. La barrera es amarrada en cada margen del curso de agua y se deja instalada en diagonal para que los residuos se aglomeren contra una de las márgenes y puedan ser sacados sin mayor problema.

Su utilización se ha ido extendiendo por toda Latinoamérica en los últimos años, llegando a Uruguay en 2022, donde se trabajó desde el DIA – IMFIA en la elaboración de estas e instalación en un curso

de agua en Punta Rieles. Luego del trabajo realizado entre 2022 y 2023 desde la IM se han realizado capacitaciones y se han instalado muchas biobardas más en otros puntos de Montevideo.



Figura 6-6. Biobarda instalada por equipo DIA-IMFIA en Arroyo Chacarita en 2023

Bibliografía básica, referencias

- Arroyo, Y. (2020) Análisis y estudio de las islas de basura oceánicas. Grado en náutica y transporte marítimo. Universitat Politècnica de Catalunya.
- ATSDR (2001) Resúmenes de Salud Pública - Asbesto (Amianto) (Asbestos)
- ATSDR (2012). Resumen de salud pública, CROMO.
- Bühl, V; Collazo, P; Mañay, N; Pamoukaghlián, K; Pizzorno, P (2020) Arsénico en agua subterránea de Uruguay y riesgo a la salud asociado (Proyecto AsURU): resultados preliminares
- R. Carissimi, M. Izquierdo, N. Sabjan (2023) Barrera de burbujas
- Castillo, C; Diazgranados, D; López de Romaña (2010). EL ZINC EN LA SALUD HUMANA -1. Rev Chil Nutr Vol. 37, N°2, Junio 2010, pp. 234-239. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182010000200013>
- CEPIS Evaluación de eutroficación en lagos tropicales.
- CEPIS Emisarios submarinos, Enfoque general.
- Derisio, José Carlos (1993) Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. CETESB.
- DINAGUA (2019). Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Vigentes 2019, https://catalogodatos.gub.uy/dataset/ambiente-dinagua-aprovechamientos-de-los-recursos-hidricos-vigentes-2019/resource/1e98da44-8038-4b6f-9f20-9bd54ec7d1da?inner_span=True
- García, A; Melogno, A; Montano, A; Pastorino, Pereira, M.L; H; Pérez, W; Pinchak, C; Pérez, C; Píriz, C (2005) Diarrea aguda infantil. Admisión hospitalaria en menores de tres años.

- Gómez, Ximena; Inthamoussu, Agustín (2019). Huella Hídrica en Uruguay. Potencial impacto en los sectores agro-industriales exportadores. Informe de Consultoría. Elaborado para: Uruguay XXI – CTAguá. 94 pp. Uruguay, mayo 2019.
- Hoekstra, Arjen Y.; Chapagain, Ashok K.; Aldaya, Maite M.; Mekonnen, Mesfin M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Water Footprint Networks, Earthscan Ltd., United Kingdom, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.
- Kiely, Gerard (1999). Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., 1331 pp., Madrid, España, 1999.
- Lebreton, L.; Slat, B.; Ferrari, F.; Sainte-Rose, B.; Aitken, J.; Marthouse, R.; Hajbane, S.; Cunsolo, S.; Schwarz, A.; Levivier, A.; Noble, K.; Debeljak, P.; Maral, H.; Schoeneich-Argent, R.; Brambini, R.; Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* (2018) 8:4666, DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w 2.
- Londoño, L. F; Londoño, P; Muñoz, G (2016) Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Vol 14 No. 2 (145-153). DOI:10.18684/BSAA(14)145-153
- López-Geta, Juan Antonio; Gómez-Gómez, Juan de Dios (2007). La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2007. (15.3) pp. 266-273.
- Maldonado, C. J. (2014) Sistemas de vertimiento de aguas residuales a través de emisarios submarinos. Ejemplo de aplicación: emisario submarino de Cartagena.
- Metcalf & Eddy Ingeniería de Aguas Residuales. Ed. McGraw-Hill
- Metcalf & Eddy (2016) Tratamiento de efluentes e recuperación de recursos – 5ª Edición 2016.
- Mieres Gómez, Gustavo (1995) El sector salud: 75 años de un mismo diagnóstico. Sindicato Médico del Uruguay, Premio Dr. Augusto Turenne, edición 1995. Montevideo, Uruguay.
- <http://news.nationalgeographic.com/>
- RALCEA, Red de Centros de Excelencia en Agua en América Latina (2014). Herramientas para Contribuir a la Gestión Sustentable del Agua en Latinoamérica. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, © European Union, 2014, doi: 10.2788/824991
- Ramírez, A. (2010) Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. *An Fac med.* 2010;71(1):54-61
- Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (S/A). Capítulo 20 Indicadores de Contaminación Fecal en Aguas En: “Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas”. CYTED, pp. 224-229.
- <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2996/BVE17068913e.pdf?sequence=1>
- República Oriental del Uruguay, Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). Plan Nacional de Aguas. Propuesta. 250 p. Agosto 2016.
- República Oriental del Uruguay, Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). Plan Nacional de Aguas. Diálogo 2016/2017. 3º Plan de Acción Nacional de Gobierno Abierto. 1ª Mesa de Seguimiento de Compromisos. Julio 2017 Tyler Miller Jr., G. Ecología y Medio Ambiente. Grupo Editorial Iberoamericana
- <https://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) 2014. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. Paris, UNESCO. ePub ISBN 978-92-3-904259-3

Sitios web consultados:

<https://www.braeuner.com/el-mito-del-color-del-agua/>

<https://www.britannica.com/>

[https://cardiosalud.org/informemortalidad2022/#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202022%20se,6%2C6%25%20\(2.](https://cardiosalud.org/informemortalidad2022/#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202022%20se,6%2C6%25%20(2.)

https://cidta.usal.es/contamin_agua/www1/www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/170AgSub.htm

https://www.depuradoras.es/blog/71_eliminar-la-dureza-del-agua-la-descalcificaci

<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/1020UY.pdf>

<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/planes/plan-nacional-aguas>

<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/plan-nacional-aguas-pluviales-urbanas-para-uruguay>

<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/planes/plan-nacional-saneamientohttp://www.mtop.gub.uy/>

<http://www.ose.com.uy/>

<https://theoceancleanup.com/>

<http://webworld.unesco.org/>

Anexo: DECRETO 253/79

DECRETO 253/79

(Con las modificaciones de los Decretos 232/88, 698/89 y 195/91 incluidas)

SE APRUEBAN NORMAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACION AMBIENTAL MEDIANTE EL CONTROL DE LAS AGUAS.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS.

MINISTERIO DEL INTERIOR.

MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL.

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA.

MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA.

MINISTERIO DE VIVIENDA ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y MEDIO AMBIENTE.

Montevideo, 9 de mayo de 1979.

VISTO: La ley Nº 14.859 del 15 de diciembre de 1978 que aprobó el Código de Aguas y el informe producido por la Comisión designada por el Decreto Nº 324/978 de 8 de junio de 1978.

RESULTANDO: I) Que el Código de Aguas establece en su Título V - Capítulo 1º, "Normas relativas a la defensa de las aguas, álveos y zonas aledañas", en las que se incluye facultades al Ministerio Competente para dictar providencias y aplicar medidas que impidan el deterioro de los recursos hídricos, así como para sancionar las infracciones de dichas normas.

II) Que la citada Comisión indicó en su informe las medidas a adoptar, para prevenir la contaminación de los cursos de agua, las que se refieren a clasificación de cuerpos receptores según sus usos preponderantes, límites

de los parámetros de contaminación, normas para vertimiento de efluentes y sanciones derivadas de la aplicación de dichas medidas.

III) Que de acuerdo con lo dispuesto por la Ley Nº 16.112 del 30 de mayo de 1990 y los artículos 456 y 457 de la Ley Nº 16.170 del 28 de diciembre de 1990 el Ministerio Competente será el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.

CONSIDERANDO: I) Que constituye una especial preocupación del Poder Ejecutivo facilitar los medios para la estricta aplicación del Código de Aguas, en particular en lo que concierne a los aspectos de conservación y preservación de los recursos hídricos, habida cuenta de los peligros de deterioro, pérdida o mengua de los mismos provocados por la acción del hombre.

II) Que es necesario definir y poner en práctica las normas para prevenir la contaminación de los cursos de agua.

ATENCIÓN: A lo establecido en los artículos 2º, 3º, 4º, 6º, 144 a 148, 201 y concordantes del Código de Aguas.

EL PRESIDENTE DE LA REPUBLICA DECRETA:

ARTICULO 1º- Apruébanse las siguientes normas que tienen por objeto prevenir la contaminación ambiental mediante el control de la contaminación de aguas.

ARTICULO 2º- Las presentes disposiciones son de aplicación en todos los cursos de agua de la República Oriental del Uruguay, sin perjuicio de lo que resulte de las normas de Derecho Internacional y de las disposiciones contenidas en leyes especiales.

ARTÍCULO 3º- Los cursos o cuerpos de agua del País se clasificarán según sus usos preponderantes actuales o potenciales en cuatro clases de acuerdo a lo siguiente:

CLASE 1

Aguas destinadas o que puedan ser destinadas al abastecimiento de agua potable a poblaciones con tratamiento convencional.

CLASE 2

a) Aguas destinadas al riego de hortalizas o plantas frutícolas u otros cultivos destinados al consumo humano en su forma natural, cuando éstas son usadas a través de sistemas de riego que provocan el mojado del producto.

b) Aguas destinadas a recreación por contacto directo con el cuerpo humano.

CLASE 3

Aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyo producto no se consume en forma natural o en aquellos casos que siendo consumidos en forma natural se apliquen sistemas de riego que no provocan el mojado del producto.

CLASE 4

Aguas correspondientes a los cursos o tramos de cursos que atraviesan zonas urbanas o suburbanas que deban mantener una armonía con el medio, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyos productos no son destinados al consumo humano en ninguna forma.

ARTICULO 4:- Quedan excluidos de esta clasificación los cuerpos de aguas destinados al tratamiento o transporte de aguas residuales.

ARTÍCULO 5: Las características de los cursos o cuerpos de agua del país serán, de acuerdo a su clasificación, las siguientes:

a) CLASE 1

PARAMETRO	ESTANDAR
- OLOR	No perceptible
- MATERIALES FLOTANTES Y ESPUMAS NO NATURALES	Ausentes
- COLOR NO NATURAL	Ausente
- TURBIEDAD Máximo	50 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad)
- pH	Entre 6,5 y 8,5
- OD (Oxígeno disuelto)	Mín. 5 mg/L
- DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	Máx 5 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Virtualmente ausentes
- DETERGENTES (medidos como sustancias activas al azul de metileno)	Máx 0,5 mg/L en LAS
- SUSTANCIAS FENOLICAS	Máx 0,001 mg/L en C6H5OH
- AMONIACO LIBRE	Máx 0,02 mg/L en N
- NITRATOS	Máx 10 mg/L en N
- FOSFORO TOTAL	Máx 0,025 mg/L en P
- COLIFORMES FECALES	No se deberá exceder el límite de 2000 CF/100 mL en ninguna de al menos 5 muestras, debiendo la media geométrica de las mismas estar por debajo de 1000 CF/100 mL
- CIANURO	Máx 0,005 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,005 mg/L
- CADMIO	Máx 0,001 mg/L
- COBRE	Máx 0,2 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 0,05 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,0002 mg/L
- NIQUEL	Máx 0,02 mg/L
- PLOMO	Máx 0,03 mg/L
- ZINC	Máx 0,03 mg/L

b) CLASE 2 a

PARAMETRO	ESTANDAR
- OLOR	No perceptible
- MATERIALES FLOTANTES Y ESPUMAS NO NATURALES	No perceptibles
- COLOR NO NATURAL	Ausente
- TURBIEDAD	Máx 50 UNT
- pH	Entre 6,5 y 9,0
- OD	Máx 5 mg/L
- DBO5	Máx 10 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Virtualmente ausentes
- DETERGENTES	Máx 1 mg/L en LAS
- SUSTANCIAS FENOLICAS	Máx 0,2 mg/L en C6H5OH
- AMONIACO LIBRE	Máx 0,02 mg/L en N
- NITRATOS	Máx 10 mg/L en N
- FOSFORO TOTAL	Máx 0,025 mg/L en P
- SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	Máx 700 mg/L
- RELACION DE ABSORCION DE SODIO (RAS)	Máx 10
- COLIFORMES FECALES	No se deberá exceder el límite de 2000 CF/100 mL en ninguna de al menos 5 muestras, debiendo la media geométrica de las de las mismas estar por debajo de 1000 CF/100 mL
- CIANUROS	Máx 0,005 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,05 mg/L
- BORO	Máx 0,5 mg/L

- CADMIO	Máx 0,001 mg/L
- COBRE	Máx 0,2 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 0,005 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,0002 mg/L
- NIQUEL	Máx 0,002 mg/L
- PLOMO	Máx 0,03 mg/L
- ZINC	Máx 0,03 mg/L

c) CLASE 2 b

PARAMETRO	ESTANDAR
- OLOR	No perceptible
- MATERIALES FLOTANTES ESPUMAS NO NATURALES	Ausentes
- COLOR NO NATURALES	Ausentes
- TURBIEDAD	50 UNT
- pH	Entre 6,5 y 8,5
- OD	Mín 5 mg/L
- DBO5	Máx 10 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Virtualmente ausentes
- DETERGENTES	Máx 1 mg/L
- SUSTANCIAS FENOLICAS	Máx 0,2 mg/L en C6H5OH
- AMONIACO LIBRE	Máx 0,02 mg/L
- NITRATOS	Máx 10 mg/L en N
- FOSFORO TOTAL	Máx 0,025 mg/L en P
- COLIFORMES FECALES	No se deberá exceder el límite de 1000 CF/100 mL en ninguna de al menos 5 muestras, debiendo la media geométrica de las mismas estar por debajo de 500 CF/100 mL
- CIANURO	Máx 0,005 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,005 mg/L
- CADMIO	Máx 0,005 mg/L
- COBRE	Máx 0,2 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 0,05 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,0002 mg/L
- NIQUEL	Máx 0,02 mg/L
- PLOMO	Máx 0,03 mg/L
- ZINC	Máx 0,03 mg/L

d) CLASE 3

PARAMETRO	ESTANDAR
- OLOR	No perceptible
- MATERIALES FLOTANTES Y ESPUMAS NO NATURALES	Ausentes
- COLOR NO NATURAL	Ausente
- TURBIEDAD	Máx 50 UNT
- pH	Entre 6,5 y 8,5
- OD	Mín 5 mg/L
- DBO5	Máx 10 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Virtualmente ausentes
- DETERGENTES	Máx 1 mg/L en LAS
- SUSTANCIAS FENOLICAS	Máx 0,2 mg/L en C6H5OH
- AMONIACO LIBRE	Máx 0,02 mg/L
- NITRATOS	Máx 10 mg/L en N
- FOSFORO TOTAL	Máx 0,025 mg/L en P

Elementos de Ingeniería Ambiental

- COLIFORMES FECALES	No se deberá exceder el límite de 2000 CF/100 mL en ninguna de al menos 5 muestras, debiendo la media geométrica de las mismas estar por debajo de 1000 CF/100 mL
- CIANURO	Máx 0,005 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,005 mg/L
- CADMIO	Máx 0,001 mg/L
- COBRE	Máx 0,2 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 0,05 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,0002 mg/L
- NIQUEL	Máx 0,02 mg/L
- PLOMO	Máx 0,03 mg/L
- ZINC	Máx 0,03 mg/L

e) CLASE 4

PARAMETRO	ESTANDAR
- OLOR	No objetable
- MATERIAL FLOTANTE Y ESPUMAS NO NATURALES	Virtualmente ausentes
- COLOR NO NATURAL	Virtualmente ausentes
- TURBIEDAD	Máx 100 UNT
- pH	Entre 6,0 y 9,0
- OD	Mín 2,5 mg/L
- DBO5	Máx 15 mg/L
- ACEITES T GRASAS	Máx 10 mg/L
- DETERGENTES	Máx 2 mg/L
- COLIFORMES FECALES	No se deberá exceder el límite de 5000 CF/100 mL en al menos el 80% de por lo menos 5 muestras.
- CIANUROS	Máx 0,05 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,1 mg/L
- CADMIO	Máx 0,01 mg/L
- COBRE	Máx 1 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 0,5 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,002 mg/L
- NIQUEL	Máx 0,2 mg/L
- PLOMO	Máx 0,05 mg/L
- ZINC	Máx 0,3 mg/L

Para las clases 1, 2a, 2b, y 3 se deberán además cumplir los siguientes estándares en cuanto a los tóxicos orgánicos.

PARAMETROS	ESTÁNDAR
- ALDRIN más DIELDRIN	Máx 0,004 µg/L
- CLORDANO	Máx 0,01 µg/L
- DDT	Máx 0,001 µg/L
- ENDOSULFAN	Máx 0,02 µµg/L
- ENDRIN	Máx 0,004 µg/L
- HEPTACLORO más HEPTACLORO EPXI	Máx 0,01 µg/L
- LINDANO	Máx 0,01 µg/L
- METOXICLORO	Máx 0,03 µg/L
- MIREX	Máx 0,001 µg/L
- 2,4 D	Máx 4 µg/L
- 2,4,5 T	Máx 10 µg/L
- 2,4,5 TP	Máx 2 µg/L
- PARATION	Máx 0,04 µg/L
- COMP. POLIAROMATICOS (BPS)	Máx 0,04 µg/L

Para la clase 4 se administran hasta el máximo de 10 (diez) veces los anteriores estándares.-

La lista de tóxicos orgánicos, así como sus estándares, podrá ser modificada por el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, de acuerdo al uso que los mismos tengan .-

ARTICULO 6º- La clasificación de los cursos o cuerpos de agua o parte de los mismos y la determinación de aquellas indicadas en el Artículo 4º, será efectuada por el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente previa "coordinación " con O.S.E para los cursos de agua de la CLASE 1, INAPE y la correspondiente Intendencia Municipal en los demás casos.-

ARTICULO 7º- Los estándares de los parámetros establecidos en el artículo 3º deberán ser revisados periódicamente por el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente con el fin de su actualización técnica cuando corresponda.-

ARTICULO 8º- En los cursos de CLASE 1, no se permite lanzamientos de efluentes sin la previa autorización de OSE, organismo que en su caso, establecerá las características que debe tener el cuerpo receptor en la toma de agua respectiva y la distancia mínima desde dicha toma en que deben mantenerse estas condiciones, dando cuenta de esto al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.-

ARTICULO 9º- En los cursos de agua de las demás clases se permitirán lanzamiento de efluentes siempre que, además de cumplir con lo establecido en el artículo 11 de estas normas, los vertidos no pudieran perjudicar la calidad de las aguas del cuerpo receptor.-

A esos efectos se supondrá que éstas cumplen con los parámetros establecidos en su clasificación.

En cada caso particular, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, determinará la distancia desde el lugar de vertido en que se efectuará el control de la calidad de las aguas del cuerpo receptor, atendiendo a la mejor utilización del curso de agua por todos los interesados.-

ARTICULO 10º- Cuando algún cuerpo de agua no cumpla las condiciones establecidas para la clase en que fuera clasificado, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente deberá establecer los programas de recuperación de dicho cuerpo de agua, tendientes a que se alcancen las condiciones adoptadas.-

ARTICULO 11º- Ningún efluente podrá ser vertido si no cumple como mínimo con los siguientes estándares, sin perjuicio de otros requerimientos que surjan de estas normas:

1 - Desagües a colector del alcantarillado público

PARAMETRO	ESTANDAR
- MATERIAL FLOTANTE	Ausente
- TEMPERATURA	Máx 35º C
- pH	Entre 5,5 7 9,5
- DBO5	Máx 700 mg/L
- SOLIDOS SEDIMENTABLES	Hasta 10 mL/L determinados en cono Imhoff en una hora
- ACEITES Y GRASAS	Máx 200 mg/L
- SULFUROS	Máx 5 mg/L en S
- CAUDAL	El caudal máximo en cualquier instante no podrá exceder 2,5 al caudal medio del período de actividad.
- CIANUROS	Máx 1 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,5 mg/L
- CADMIO	Máx 0,05 mg/L
- COBRE	Máx 1 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 3 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,005 mg/L
- NIQUEL	Máx 2 mg/L
- PLOMO	Máx 0,3 mg/L
- ZINC	Máx 0,3 mg/L

Las concentraciones de los tóxicos orgánicos no podrán exceder en 500 (quinientas) veces los valores previstos por el artículo 5 para la CLASE 3.

2- Desagües directos a cursos de agua

PARAMETRO	ESTANDAR
- MATERIAL FLOTANTE	Ausente
- TEMPERATURA	Máx 30°C, pero no podrá elevar la temperatura del cuerpo receptor más de 2°C.
- pH	Entre 6,0 y 9,0
- DBO5	Máx 60 mg/L
- SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	Máx 150 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Máx 50 mg/L
- SULFUROS	Máx 1 mg/L
- DETERGENTES	Máx 4 mg/L en LAS
- SUSTANCIAS FENOLICAS	Máx 0,5 mg/L en C6H5OH
- CAUDAL	El caudal máximo en cualquier instante no podrá exceder 1,5 al caudal medio del período de actividad.
- AMONIACO	Máx 5 mg/L en N
- FOSFORO TOTAL	Máx 5 mg/L en P
- COLIFORMES FECALES	Máx 5000 CF 100 mL
- CIANURO	Máx 1 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,5 mg/L
- CADMIO	Máx 0,05 mg/L
- COBRE	Máx 1 mg/L
- CROMO	Máx 1 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,005 mg/L
- NIQUEL	Máx 2 mg/L
- PLOMO	Máx 0,3 mg/L
- ZINC	Máx 0,3 mg/L

Las concentraciones de los tóxicos orgánicos no podrán exceder en más de 100 (cien) veces los valores previstos por el artículo 5 para la CLASE 3.-

3 - Desagües que se disponen por infiltración al terreno

CONDICIONES

- a- Sólo podrá permitirse en zonas rurales.
- b- Distancia mínima a cursos de agua o pozos manantiales: 50 m.
- c- Distancia mínima a medianeras: 10 m.

Además deberán cumplir los siguientes estándares:

PARAMETRO	ESTANDAR
- MATERIAL FLOTANTE	Ausente
- TEMPERATURA	Máx 35°C
- pH	Entre 5,5 y 9,0
- SOLIDOS SEDIMENTABLES	Hasta 10 mL/L determinados en cono Imhoff en una hora.
- SOLIDOS TOTALES	Máx 700 mg/L
- ACEITES Y GRASAS	Máx 200 mg/L
- CIANUROS	Máx 1 mg/L
- ARSENICO	Máx 0,5 mg/L
- CADMIO	Máx 0,05 mg/L
- COBRE	Máx 1 mg/L
- CROMO TOTAL	Máx 3 mg/L
- MERCURIO	Máx 0,05 mg/L

- NIQUEL	Máx 2 mg/L
- PLOMO	Máx 0,3 mg/L
- ZINC	Máx 0,3 mg/L

Las concentraciones de los tóxicos orgánicos no podrán exceder en más de 100 (cien) veces los valores previstos por el artículo 5 para la clase 3.-

Las determinaciones de los parámetros, exceptuando coliformes fecales, temperatura, pH y sulfuros, se harán sobre muestras compuestas, en un período de 4 horas, por muestras horarias en volúmenes proporcionales al caudal efluente en ese momento.

En ningún caso será permitida la dilución de efluentes con aguas no contaminadas.-

ARTICULO 12º- En todos los casos no se admitirá vertimiento cuando:

- a) Puedan producir o dejar en libertad gases tóxicos, inflamables o explosivos.
- b) Contengan elementos gruesos eliminables por rejillas de 15 mm de separación entre barras para el desagüe a cursos de agua o, 10 mm. de separación entre barras para el desagüe a cursos de agua.
- c) Contengan elementos como ser lana, pelo, lana, paja, estopa, tejidos, etc.
- d) Sean residuos provenientes de la depuración de líquidos residuales cuya disposición final deberá ser estudiada en los proyectos respectivos de manera que no cause perjuicios.
- e) Contengan toda otra sustancia o elemento que pueda producir directa o indirectamente inconvenientes de cualquier naturaleza en las redes de alcantarillado, en su conservación o en los lugares de desagüe.-

ARTICULO 13º- Los parámetros a que se refieren estas normas, serán determinadas por los métodos analíticos que establezca el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.-

ARTICULO 14º- El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente podrá agregar nuevos parámetros o hacer más exigentes los establecidos por estas normas, debiendo realizar una revisión periódica de estos a fin de su adecuación técnica.-

ARTICULO 15º- En casos particulares, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente podrá disminuir las exigencias establecidas para los vertimientos, si a su criterio el interesado demuestra que las descargas a realizar no provocarán inconvenientes.-

ARTICULO 16º- En todos los casos de desagüe a colector, las autorizaciones están condicionadas a que puedan recibirse en las instalaciones públicas los caudales correspondientes, pudiendo establecerse condiciones que regulen el caudal de descarga.

Cuando el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente lo considere conveniente podrá exigir la construcción de las instalaciones necesarias para el control del caudal de vertimiento.-

ARTICULO 17º- En todos los casos, cuando las instalaciones autorizadas resultaran insuficientes para conseguir los fines perseguidos, podrá exigirse nuevas instalaciones o procesos complementarios.-

ARTICULO 18º- No obstante las aprobaciones que puedan otorgarse referente a desagües industriales y el cumplimiento de los mencionados desagües con las condiciones exigidas, el propietario del establecimiento industrial será siempre responsable de los perjuicios que sus desagües puedan causar.-

ARTICULO 19º- Todos los vertidos que se realicen en forma directa o indirecta a algún cuerpo de agua y que no estén comprendidos en los Artículos 22 y 23, deberán dar cumplimiento al Artículo 11. El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente podrá requerir las autorizaciones que correspondan cuando constate que dichos vertidos afecten la calidad de los cuerpos de agua.-

ARTICULO 20º- Las industrias que al 1º de enero de 1990 posean Autorización de Desagüe Industrial otorgada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas dispondrán de un plazo de 6 años a partir de esa fecha para

presentar su nueva Solicitud de Autorización de Desagüe Industrial, pero que hubieran pre-sentado ya la Solicitud con el proyecto respectivo, aún cuando el mismo hubiera sido aprobado, podrán obtener la Autorización por el plazo de 6 años, siempre que el Proyecto se considere suficiente para cumplir con las normas anteriores y se verifique la construcción y el funcionamiento de la planta de tratamiento.-

ARTICULO 21º- Mientras no se efectúe la clasificación de cursos o cuerpos de agua establecida en el Artículo 3º de estas normas, los vertimientos se admitirán transitoriamente siempre que cumplan con lo estipulado en el Artículo 11. Una vez determinada la clasificación mencionada, los vertimientos industriales deberán cumplir con todas las condiciones establecidas en estas normas para lo cual el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente otorgará plazos entre tres y seis años en las condiciones del Artículo 20.-

ARTICULO 22º- Los organismos públicos que efectúen vertimientos a cuerpos de agua deberán proceder a la ejecución de las obras necesarias para que sus efluentes, además de cumplir con el Artículo 11 no afecten la clasificación de los cuerpos de agua. El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente realizará las intimaciones correspondientes determinando las condiciones que deberán cumplir los efluentes. Las obras en cuestión se ejecutarán dentro de los plazos que los mismos acuerden con el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.-

ARTICULO 23º- Todas las industrias de cuyo proceso industrial se deriven aguas residuales de cualquier naturaleza, deberán contar con la Autorización de Desagüe expedida en la forma establecida en el artículo 29.-

ARTICULO 24º- La Autorización de Desagüe Industrial cuando se otorgue, lo será siempre con carácter precario y revocable, y tendrá un plazo máximo de 8 años de duración.-

ARTICULO 25º- La Solicitud de Autorización de Desagüe Industrial conjuntamente con el proyecto de planta de tratamiento se presentará por el interesado en la forma establecida en el Artículo 29. Se requerirá la previa autorización de O.S.E. cuando se trate de desagües a cursos de agua de la clase 1 o a colectores de redes de saneamiento que dependan de ese organismo.-

ARTICULO 26º- Los proyectos de plantas de depuración de líquidos residuales industriales serán ejecutados y dirigidos en su construcción por profesional competente. En el caso de que se trate de instalaciones de tratamiento muy simples y de escasa importancia, el interesado podrá solicitar al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente que se admita la intervención de un instalador sanitario debidamente autorizado. Dicho Ministerio, resolverá el punto a su solo juicio. Se entiende por profesional competente a los Ingenieros Civiles que hayan cursado Ingeniería Sanitaria, a los Ingenieros Civiles con especialización en esa materia y los Ingenieros Químicos o Químicos Industriales cuando las plantas de tratamiento se basen principalmente en procesos químicos. El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente llevará un registro de los profesionales y consultoras habilitadas, documentando toda información sobre estos, de acuerdo a lo que el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente reglamente.-

ARTICULO 27º- Las plantas de tratamiento deberán ser mantenidas en operación en todo momento bajo la responsabilidad de un Profesional Competente, pudiendo ser el proyectista. En caso de renuncia la firma estará obligada a nombrar un sustituto dentro de un plazo máximo de 30 días. Durante la operación de la planta, el Profesional Competente deberá remitir al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, informes periódicos sobre el funcionamiento de la misma.-

ARTICULO 28º- La aprobación de los proyectos de plantas de tratamiento y la Autorización de Desagüe que se otorgue, no liberan al industrial de tener que efectuar todas las obras de cualquier índole que resulten necesarias, en caso de que la planta construida no sea suficiente para cumplir su cometido.

ARTICULO 29º- Los interesados presentarán la Solicitud de Desagüe Industrial directamente ante el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, la que deberá venir acompañada por la información que se indique en la reglamentación correspondiente, conjuntamente con un cronograma de obras donde se establezcan la fecha de ejecución de las mismas. Una vez presentada la Solicitud, el Ministerio de Vivienda,

Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente dispondrá de 90 días calendario para realizar las observaciones que hubiere, las que deberán ser salvadas por los interesados a conformidad del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Vencido este plazo, de no haberse presentado observaciones, el proyecto se considerará aprobado, debiendo la empresa proceder a la construcción de las obras en estricto cumplimiento al cronograma presentado, quedando sujeto a los controles que pueda realizar el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de las mismas. Una vez que las obras se encuentren finalizadas de acuerdo con el proyecto, y que se verifique su correcto funcionamiento, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente procederá a otorgar la Autorización de Desagüe Industrial, la que tendrá un plazo de validez de 8 años a partir de la notificación por la Intendencia Municipal respectiva.-

ARTICULO 30º- Los industriales que tengan desagües de líquidos residuales del proceso industrial están obligados a permitir la inspección y facilitar las operaciones de control que realicen los funcionarios del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, de las respectivas Intendencia o de O.S.E.; debidamente autorizados.-

ARTICULO 31º- El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente ejercerá el control general de la aplicación de estas normas pudiendo requerir de las Intendencias Municipales y de O.S.E. las acciones necesarias, en función de lo dispuesto por esta normativa.-

ARTICULO 32º - Las infracciones a las presentes normas serán sancionadas, de conformidad con el artículo 147 del Decreto - Ley Nº 14.859 del 15 de diciembre de 1978, en la redacción dada por el artículo 194 de la Ley Nº 15.903 del 10 de noviembre de 1987, de acuerdo a los siguientes criterios:

A)- Multas a ser aplicadas ante el incumplimiento de:

1.- Intimación a presentar Solicitud de Desagüe Industrial (Art. 23):

1ra. vez 100 UR - 500 UR

2da. vez 150 UR - 700 UR

3ra. vez y siguientes 200 UR - 1500 UR

2.- Intimación a presentar información complementaria:

1ra. vez..... 100 UR - 400 UR

2da. vez 150 UR - 600 UR

3ra. vez y siguiente 200 UR - 1000 UR

3.- Los plazos otorgados para la construcción de la Planta de Tratamiento:

1ra. vez 100 UR - 1000 UR

2da. vez 200 UR - 2000 UR

3ra. vez y siguientes 300 UR - 5000 UR

4.- Intimación a cesar los vertidos a un cuerpo receptor determinado:

1ra.- vez 100 UR - 800 UR

2da.- vez 200 UR - 2500 UR

B) - También se considera infracciones a las presentes normas las siguientes; siendo las mismas multadas como se especifica.

1 - Industria en funcionamiento sin haber iniciado el trámite previsto en el artículo 23:

100 UR - 1000 UR

2 - Realizar vertidos sin tratamiento a un cuerpo receptor teniendo planta de tratamiento construida y aprobada:

Sin antecedentes 200 UR - 3000 UR

Con antecedentes 500 UR - 5000 UR

3 - Tener planta de tratamiento construida y en funcionamiento sin el aval de un profesional competente (Arts. 26 y 27):

Sin antecedentes 200 UR - 750 UR

Con antecedentes 500 UR - 1000 UR

4 - Tener planta de tratamiento sin un adecuado mantenimiento:

1ra.- vez 100 UR - 1000 UR

2da.- vez 150 UR - 1500 UR

3ra.- vez y siguientes .. 200 UR - 2500 UR

5 - Tener planta de tratamiento funcionando fuera de las condiciones de aprobación:

Sin antecedentes 100 UR - 1000 UR

Con antecedentes 250 UR - 3000 UR

6- Presentar información falsa u obstaculizar la labor de los funcionarios encargados del control:

Sin antecedentes 100 UR - 500 UR

Con antecedentes 150 UR - 1000 UR

ARTICULO 33º- Comuníquese, etc.--

REDACCION DEL ARTÍCULO 194 DE LA LEY 15.903 DEL 18 DE NOVIEMBRE DE 1987

"Sustitúyese el Artículo 147 del Decreto - Ley Nº 14.859 del 15 de diciembre de 1978, por el siguiente:

ARTICULO 147.- Las infracciones a lo dispuesto por el Art. 144 serán sancionadas por el Ministerio competente del modo siguiente:

1) Con una multa graduada entre 100 UR (cien unidades reajustables) y 5.000 UR (cinco mil unidades reajustables), según la gravedad de la infracción, de conformidad con la reglamentación que dictará el Poder Ejecutivo.

2) Con la caducidad del permiso o concesión de uso de aguas que hubiera otorgado al infractor. Las sanciones mencionadas podrán imponerse conjuntamente y se entenderán sin perjuicio de la sanción penal que correspondiere, cuando el hecho constituyere delito.

No se podrán iniciar obras o construcción de plantas industriales cuyo funcionamiento implique vertimientos de efluentes industriales, sin haber obtenido la aprobación del proyecto de planta de tratamiento de los referidos efluentes, por parte del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.

El incumplimiento de lo dispuesto precedentemente será sancionado por dicho Ministerio de la siguiente manera:

1) Con la multa prevista en el numeral 1) de este artículo.

2) Con la suspensión de las obras y clausura del establecimiento, hasta tanto se obtenga la aprobación mencionada."