LOS MÉTODOS NATURALES DE DEPURACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUALES DOMÉSTICOS.

Ing. Ramón Valdés Salgado[1], Dr. C. Juana Zoila Junco Horta[2].

1. EMPAI, Matanzas

2. Centro de Estudios de Medio Ambiente de Matanzas, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos Km 3 ½ Autopista a Varadero

Resumen
Se presenta información acerca del estudio de métodos naturales a emplear como tecnologías de tratamiento de las aguas residuales urbanas con la fundamentación técnica que ilustra la posibilidad de su implementación para sustituir las tecnologías convencionales de tratamiento, en la medida que de las posibilidades y limitaciones de las mismas. o los tratamientos *in situ* , muy comunes en las ciudades. Entre las tecnologías descritas, se encuentran las de aplicación directa al terreno y los métodos por sistemas acuáticos.

Palabras claves
Métodos naturales, tratamiento de residuales, EDAR, humedales, remoción, aguas residuales domésticas.

Introducción
El crecimiento poblacional y los avances tecnológicos han traído consigo grandes ventajas pero a su vez han dado origen al problema de contaminación generada por las aguas residuales domésticas o industriales que son vertidas a las fuentes de agua de manera inapropiada y sin ningún tipo de tratamiento generando impactos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente. En Cuba al igual que en otros países de la región, los cuerpos hídricos son receptores de todo tipo de vertimiento de aguas residuales por lo cual se afecta la calidad de los mismos, ponen en riesgo la salud de los habitantes, disminuyen la productividad y aumentan los costos de tratamiento del recurso hídrico.

Aunque se han desarrollado numerosas alternativas de tratamiento de aguas residuales para dar solución a este tipo de problema, la falta de información sobre el funcionamiento, operación y mantenimiento de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales tradicionales, la mala adaptación al medio, entre otras causas, conducen a la implementación de sistemas inoperantes y al abandono de los existentes. La búsqueda de soluciones sostenibles debe ser el resultado de la integración de aspectos tecnológicos, sociales y ambientales propios de cada población. En esta búsqueda se debe, en la medida de lo posible, hacer uso de la capacidad de depuración del medio natural y del potencial de reuso del agua residual.

Esta capacidad de depuración natural se presenta en los sistemas de tratamiento del agua residual por métodos naturales, donde la interacción entre sus componentes naturales: agua, suelo, plantas, microorganismos y atmósfera, es utilizada para alcanzar los objetivos del tratamiento. Los métodos naturales se presentan como una opción tecnológica sostenible para las pequeñas y medianas comunidades dada su alta eficiencia, bajos costos de operación y de mantenimiento y fácil construcción. Además, el aprovechamiento de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, no solo representa una fuente de agua, sino también una fuente potencial de entrada de nutrientes, con beneficios económicos y ambientales, convirtiéndose de este modo en una alternativa que toma fuerza a nivel mundial y que es conveniente considerar.

La gestión del agua
La gestión de los recursos hídricos se entiende como el proceso sustentado en un conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales,

bienes, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven y realizan acciones para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su entorno social, económico y ambiental. La gestión del agua requiere de:

- La medición de las variables del ciclo hidrológico y el conocimiento de sus características determinantes y sus respectivas consecuencias, para ampliar la base de conocimiento sobre los recursos hídricos, tanto para fines educativos y científicos, como para apoyar la toma de decisiones en los gobiernos y en las sociedades.
- La prevención y mitigación de desastres naturales asociados a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos.
- La construcción, mantenimiento y operación de las obras hidráulicas y la administración de los servicios asociados a ellas.
- El mantenimiento, operación y administración de sistemas de riego.
- La conservación cuantitativa y cualitativa del agua y del medio acuático, incluyendo ecosistemas frágiles.
- La satisfacción de las necesidades de agua de la población en cantidad y calidad apropiadas, y de las demandas derivadas de los procesos productivos y de servicios de la economía.
- La planificación hídrica participativa y corresponsable entre sociedad y gobiernos, incluyendo sus sistemas de verificación, cumplimiento de metas, evaluación, retroalimentación, reorientación, índices de gestión y rendición de cuentas. En la planificación hídrica es esencial la consistencia de estrategias, acciones y programas en términos cronológicos, en los espacios geográficos a todos los niveles, nacional, regional, estatal y por cuenca hidrológica o acuífero.
- El cumplimiento de la legislación y regulación de los usos y de los derechos de agua surgidos de los regímenes de dominio hídrico.
- La protección de las aguas superficiales y subterráneas.
- La prevención y control de la contaminación y el mejoramiento de la calidad del agua.

El ciclo hidrológico

Las aguas que se encuentran en la superficie de la corteza terrestre, sean dulces o saladas, están sometidas a la radiación solar, como consecuencia de ello una parte de las mismas experimentan un cambio de estado, pasando de agua líquida a vapor de agua. Este vapor de agua cuando llega a las altas capas de la atmósfera, donde la temperatura es más baja, se condensa formando diminutas gotitas, el conjunto de las cuales constituyen las nubes. Cuando estas gotas se hacen mayores, la atracción de la tierra aumenta y caen sobre ella en forma de lluvia, la cual una vez sobre la misma discurre una parte sobre su superficie lo que constituye las aguas de escorrentías**,** las que posteriormente constituirán los ríos que seguirán su curso hasta llegar al mar (Rodríguez Pérez, 2006). Otra parte se infiltra a través de la tierra (aguas de infiltración) para circular por el interior de la misma, constituyendo las aguas subterráneas**,** que luego aflorarán a la superficie en forma de manantiales o fuentes, o por medio de pozos. Unas y otras en su circular por la superficie o el interior de la tierra van a parar al mar. Los rayos solares van evaporando el agua, ya sea dulce o salada, que vuelve a la atmósfera en forma de vapor, completando el ciclo hidrológico. A lo largo de estos pasos, el agua experimenta transformaciones. Al pasar de líquido a vapor

ocurre una destilación y se libera de todas sus impurezas (tratamiento natural del agua). Esto le confiere, en muchos casos, unas características inapropiadas para ser usadas de diferentes maneras. Al licuarse el vapor en forma de gotas y caer a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo, esta agua disuelve diversas sustancias, que se encuentran en la atmósfera, tanto más cuanto más concentradas estas se encuentren. Luego ya en la superficie de la tierra, el agua sigue disolviendo las distintas sustancias que se encuentran en el terreno, de aquí que las aguas subterráneas se encuentren más concentradas que las aguas superficiales. Tanto unas como otras aguas van a parar al mar donde se encuentran las aguas superficiales más cargadas en sales (Rodríguez Pérez, 2006).
Además de este ciclo hidrológico del agua, existe un subciclo biológico mediante el cual anualmente se renuevan $6{,}5 \times 10^{11}$ toneladas de este compuesto, como resultado del proceso de fotosíntesis de las plantas y la respiración. De lo explicado en el ciclo hidrológico se comprende que las aguas superficiales forman los mares, océanos, lagos, ríos y arroyos. Las aguas subterráneas se encuentran en el interior de la tierra, circulando o estancadas y constituyen los acuíferos, los cuales pueden aflorar en la superficie de la tierra como manantiales y fuentes de de este recurso hídrico. Las aguas superficiales se suelen clasificar en dulces o saladas, según estén más o menos cargadas de sal. Las dulces constituyen las aguas de los ríos y lagos, y las saladas los mares y océanos, la mayor parte de las aguas dulces se encuentran en forma de hielo. Las aguas saladas contienen grandes cantidades de sales disueltas haciéndolas impropias para la mayoría de los usos a que las puede destinar el hombre. La distribución del agua dulce sobre la corteza de la tierra es muy irregular, ya que hay zonas donde abunda, por recibir mucha lluvia, mientras en otros lugares son escasas o nulas. Del análisis del ciclo hidrológico se aprecia que el agua es una sustancia que en el ambiente puede aparecer en los tres estados físicos de la materia (sólido, líquido y gaseoso) y que su composición varía. Por otra parte, la composición de las aguas naturales dependerá además, del lugar y la época del año, lo que hace más diversos los distintos tipos de agua. Basado en todo lo anterior (Rodríguez Pérez, 2006) se plantea que, el agua natural se puede expresar de la siguiente forma:

$H_2O + X$ (1)

Donde este conjunto X está formado por distintos compuestos orgánicos e inorgánicos y que pueden aparecer en suspensión, en dispersión coloidal y disueltos, definiendo de esta forma la composición de esta. Para conocer las características de un agua, es necesario identificar las sustancias que esta contiene, mediante análisis cualitativos y cuantitativos.

Relación entre aguas superficiales, aguas subterráneas y contaminación
Cuando se trata de obtener recursos del ciclo hidrológico, las mejores oportunidades nacen de la consideración del conjunto de recursos de agua (superficiales, subterráneas, residuales tratadas, desalinizadas), en sus circunstancias naturales o modificados por obras hidráulicas, para asignar objetivos de puesta a disposición de agua en cantidad y calidad, en su lugar y tiempo, respetando restricciones técnicas, económicas y legales, y también políticas y culturales, y salvaguardando el medio ambiente. Es lo que se denomina *uso conjunto*, que está muy relacionado con los conceptos de *utilización racional* y *gestión* de los recursos de agua, y con la adecuación de la demanda de agua (Custodio, *et al*, 2003). Como ya se ha comentado, la explotación de las aguas subterráneas contrasta con la frecuente propensión de los organismos públicos hacia las grandes obras hidráulicas para la

gestión de las aguas superficiales , cuando realmente las aguas subterráneas poseen características que las hacen especialmente atractivas, asequibles, evaluables y merecedoras de conservación, protección y restauración. Estas características, (Custodio, *et al*, 2003) son las siguientes:

- Considerable almacenamiento, que hace que su cantidad y calidad estén menos afectadas por la variabilidad de la pluviometría, y sean reservas de gran valor estratégico en sequías y situaciones de emergencia
- Regularidad de su composición química, radioquímica, biológica y de temperatura, así como ausencia de turbidez si las captaciones están bien construidas
- Mayor protección temporal frente a procesos contaminantes accidentales, lo que proporciona la posibilidad de continuar disponiendo de agua adecuada durante un periodo extendido de tiempo, mientras se adoptan las medidas paliativas y correctoras necesarias
- Frecuente disponibilidad en el lugar o cerca de donde se produce la demanda, con elementos de captación y transporte que suponen inversiones normalmente moderadas y graduales frente a las de las grandes obras de regulación, captación y tratamiento de aguas superficiales
- Menor dependencia en cuanto a calidad y cantidad de acciones exteriores de carácter catastrófico o provocadas intencionadamente o a causa de un conflicto
- Menor dependencia de procesos tecnológicos complejos, que están sujetos a fallos de funcionamiento y diseño, y a errores humanos de operación
- Reconocimiento, evaluación y control con frecuencia más seguros y sencillos, y que requieren menor longitud de series de datos de base, aunque para llegar a propuestas preliminares aparentemente se requiera un mayor tiempo y esfuerzo de estudio, personal experto y superar un conjunto de deformaciones y prejuicios en el conocimiento popular, que alcanza con frecuencia a las personas con responsabilidades en las administraciones y órganos de gestión
- Relativa fácil predicción del comportamiento ante escenarios diversos de acciones futuras, dado el gran almacén asociado; para las aguas superficiales esa predicción tiene mayor incertidumbre al ser muy sensibles y no conocerse previamente la aportación pluviométrica futura
- Gestión más local, sin las restricciones y conflictos de organización e institucionales frecuentes en las grandes entidades

Naturalmente, la utilización de las aguas subterráneas como fuente de suministro también tiene inconvenientes, aún cuando frecuentemente no se trata de efectos negativos propiamente dichos sino que son consecuencias conocidas y previsibles asociadas a la naturaleza de los acuíferos y de la propia explotación. A menudo, estos efectos desfavorables son el resultado de expectativas, previsiones o evaluaciones incorrectas y sesgadas derivadas del desconocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas o de indebidas extrapolaciones de lo que se observa en los sistemas de aguas superficiales (Custodio, *et al*, 2003). . Entre estas desventajas se pueden mencionar las relacionadas con descensos de niveles debidos a fuertes explotaciones, singularmente importantes en los acuíferos costeros con riesgo de salinización, debido al fenómeno de intrusión salina, con cambios en la calidad y en la salinidad del agua, con problemas asociados a la gestión y administración de los recursos, incluyendo aspectos económicos y legislativos, e incluso con problemas de carácter social y cultural. Frente a estos problemas se hace necesario

profundizar en el conocimiento de las aguas subterráneas para alcanzar modelos sostenibles de explotación, que permitan establecer mecanismos de protección y control. La calidad natural de las aguas subterráneas, entendiendo como tal su composición original, es producto de la interacción del agua de infiltración y los materiales con los que entra en contacto durante el ciclo hidrológico. Determinados factores externos, principalmente de origen antrópico, pueden provocar alteraciones en dicha composición al introducir sustancias ajenas susceptibles de modificar su naturaleza original (Custodio, *et al*, 2003).
Los mecanismos por los que un agente contaminante puede alcanzar un acuífero y propasarse en él son múltiples y en ocasiones muy complejos. La contaminación de un acuífero desde la superficie del terreno se puede deber a los residuos sólidos o líquidos vertidos en cauces secos, a la existencia de vertederos incontrolados o a la acumulación de sustancias contaminantes en superficie. Si los residuos acumulados contienen material soluble, éste será lixiviado por el agua de lluvia y se infiltrará hasta la zona saturada, siendo incorporada al flujo subterráneo hasta llegar, eventualmente, a las captaciones de aguas.
Los acuíferos de aguas subterráneas pueden clasificarse como acuíferos confinados (o artesianos) o acuíferos no confinados (o nivel de agua freática). La distinción es importante en función de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación producida por el hombre. Un acuífero confinado es aquel donde el agua está limitada por una capa superior e inferior de material impermeable llamado acuícludo. La arcilla o acuícludo es el material impermeable más común y forma una barrera natural cuando el agua migra hacia arriba o abajo de las aguas subterráneas. Esta barrera limita el movimiento descendente de contaminantes desde la superficie al acuífero confinado y protege los pozos y manantiales. El acuícludo también restringe la migración de contaminantes de otros acuíferos por encima o por debajo del acuífero confinado. La protección de los acuíferos confinados hace que una fuente de agua sea relativamente invulnerable a la contaminación. El acuífero no confinado está limitado solo por una capa de confinamiento inferior o acuícludo. Como resultado, la percolación de la precipitación e infiltración de agua proveniente de los arroyos, lagos y reservorios portan contaminantes de la superficie al acuífero. Por ende, los acuíferos no confinados se consideran vulnerables a la contaminación.
Los mecanismos por los que un agente contaminante puede alcanzar un acuífero y propagarse en él son múltiples y en ocasiones muy complejos. La contaminación de un acuífero desde la superficie del terreno se puede deber a los residuos sólidos o líquidos vertidos en cauces secos, a la existencia de vertederos incontrolados o a la acumulación de sustancias contaminantes en superficie. Si los residuos acumulados contienen material soluble, éste será lixiviado por el agua de lluvia y se infiltrará hasta la zona saturada, incorporándose al flujo subterráneo y pudiendo llegar, eventualmente, a las captaciones de aguas. La contaminación por actividades agrícolas se produce por la infiltración de aguas (lluvia o riego) que disuelven y arrastran abonos y pesticidas. Las aguas residuales domésticas pueden contaminar los acuíferos en los casos de utilización de fosas sépticas, reciclado de efluentes y, en general, de sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan la capacidad depuradora del terreno de manera incorrecta, casi siempre por saturación de la misma. A pesar de los procesos de adsorción en el suelo y de atenuación de la contaminación que se producen en la zona no saturada, la infiltración de ciertas sustancias hasta el nivel freático puede constituir una amenaza real para las captaciones.
El embolsamiento superficial y la acumulación de residuos líquidos de diversa procedencia (balsas de evaporación o de concentración, balsas de infiltración de industrias o de estabulaciones ganaderas) depositados en excavaciones naturales o artificiales, incluso los

vertederos poco o nada controlados, pueden provocar la contaminación de las aguas subterráneas. La progresión de la intrusión salina por alteración del régimen de flujo como consecuencia del bombeo excesivo en acuíferos costeros conectados hidráulicamente con el mar, o la ubicación inadecuada de las captaciones de bombeo en este tipo de acuíferos, provoca el avance de una cuña de agua salada, tierra adentro, al disminuir el flujo de agua dulce hacia el mar, lo que provoca graves problemas de contaminación en numerosas unidades hidrogeológicas costeras.

Aguas Residuales. Definición y origen

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos, en actividades domésticas, industriales y sociales, siendo recogida por la red de alcantarillado que las conducirá hasta un destino apropiado (Mara, 1976). Según su origen, las mismas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua, que proviene de las residencias oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y actividades agrícolas, así como de las aguas pluviales (Rolim , 2000) y se clasifican en:

- *Domésticas***:** son aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas), consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado, a través de las descargas sanitarias de las instalaciones, son por lo general perennes, su composición es esencialmente orgánica y su flujo es relativamente constante.
- *Industriales***:** son aquellos residuos líquidos generados en los procesos industriales, poseen características específicas, según el tipo de industria, generalmente son intermitentes, con la existencia de máximos y mínimos en sus flujos.
- *Infiltración y caudal por percolación***:** son las que penetran al sistema de alcantarillado, a través de las uniones de las tuberías, roturas, registros sanitarios destapados, son en extremo variables, en dependencia fundamentalmente del tipo de suelo.
- *Pluviales***:** son aportadas por las precipitaciones y el escurrimiento superficial, se consideran intermitentes y estacionales.

Características cualitativas

La temperatura de las aguas residuales es en general, algo superior a la temperatura de las aguas de abastecimiento, así como también a la del aire, su mal olor característico está dado por los procesos anaeróbicos que en ella se desarrollan. Su apariencia es desagradable, desde tonalidades grisáceas hasta el negro, aunque la presencia de sustancias específicas la pueden dotar de coloraciones variadas, fundamentalmente en residuos industriales.

Las aguas residuales domésticas están constituidas esencialmente por agua (cerca del 99% en peso) y apenas un 0.1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, siendo esta pequeña fracción de sólidos la que presenta las mayores dificultades de transporte, tratamiento y disposición. De forma general constituye una mezcla de residuos alimenticios, heces, materia vegetal, sales minerales, sustancias orgánicas y materiales diversos, como grasas y detergentes. En la tabla 1 se puede observar la composición típica del agua residual doméstica.

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN			
	UM	Fuerte	Media	Diluida
Sólidos Totales	mg/L	1200	720	350
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	850	500	250
Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	525	300	145
Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	325	200	105
Sólidos Suspendidos	mg/L	350	220	100
Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	75	55	20
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	275	165	80
Sólidos Sedimentables	mg/L	20	10	5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	400	220	110
Carbono Orgánico Total	mg/L	290	160	80
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1000	500	250
Nitrógeno Total	mg/L	85	40	20
Nitrógeno Orgánico	mg/L	35	15	8
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	50	25	12
Nitrito	mg/L	0	0	0
Nitrato	mg/L	0	0	0
Fósforo Total	mg/L	15	8	4
Fósforo Orgánico	mg/L	5	3	1
Fósforo Inorgánico	mg/L	10	5	3
Cloruro	mg/L	100	50	30
Sulfato	mg/L	50	30	20
Alcalinidad	mg/L	200	100	50
Aceites y grasas	mg/L	150	100	50
Coliformes totales	NPM/100 mL	$10^7 - 10^9$	$10^7 - 10^8$	$10^6 - 10^7$
Compuestos Orgánicos Volátiles	µg/L	>400	100-400	<100

Fuente: Mettcalf & Eddy, 2000

Características cuantitativas

El aporte de las aguas residuales domésticas depende fundamentalmente del sistema de suministro utilizado, el agua rechazada de las actividades sociales se transporta a través de emisarios hacia las redes de alcantarillado, existiendo una relación estrecha entre el consumo per cápita de agua o dotación y el aporte sanitario. Este consumo per cápita es un parámetro variable en grado sumo y depende de diferentes factores.

Los flujos de agua residual, se calculan en función de los flujos de abastecimiento de agua necesarios, estableciéndose una relación *agua residual/agua***,** que define el volumen del aporte sanitario y la capacidad de los órganos de tratamiento, siempre teniendo en cuenta que una parte del agua servida, no entra a los sistemas sanitarios. Para obtener el caudal de diseño se puede emplear la ecuación 2:

$Q_{dis}=C(P.q.K_1.K_2)/86400$ (2)

Q_{dis} = caudal de diseño, L/s
C = coeficiente de retorno, adim. (0.8-0.9)
P = población a servir, hab.
q = dotación, L/hab./día
K_1 = coeficiente máximo caudal diario, adim.
K_2 = coeficiente de máximo caudal horario, adim.

Las tablas 2 y 3 brindan información acerca de la demanda de agua potable por número de población.

Tabla 2.Demanda per cápita en poblaciones

POBLACIÓN MILES HAB.	**DISTRIBUCIÓN DEMANDA L/PERSONA/DÍA**					
	Consumo doméstico	**Consumo comercial**	**Consumo público**	**Consumo industrial**	**Propio del sist.**	**Demanda total**
> 2.0	145	87	44	15	9	300
2.0-10.0	160	96	48	16	10	330
10.0-25.5	175	105	51	18	11	360
25.0-50.0	190	112	57	19	12	390
50.0-100.0	200	116	59	20	15	410
100.0-250.0	215	125	62	22	16	440
250.0-500.0	220	132	66	23	19	460
<500.00	225	135	68	23	19	470

Fuente: NC 53-91.Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones

Tabla 3.Coeficiente de irregularidad de consumo

POBLACIÓN MILES HAB.	**IRREGULARIDAD DIARIA K_1**	**IRREGULARIDAD HORARIA K_2**
> 2.0	1.5	2.00
2.0-10.0	1.5	1.95
10.0-25.5	1.5	1.85
25.0-50.0	1.5	1.80
50.0-100.0	1.4	1.75

100.0-250.0	1.3	1.70
250.0-500.0	1.2	1.65
<500.00	1.1	1.60

Fuente: NC 53-91.Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones

Aunque existe una diferencia notable entre las aguas residuales municipales o domésticas y los efluentes líquidos de la industria, la situación es similar ya que en ambos se hace necesario reducir a límites bien determinados el contenido de materia orgánica de las dos corrientes, antes de que esos líquidos puedan ser vertidos a un cuerpo de agua. Los efluentes industriales líquidos difieren de las aguas residuales domésticas en que en general contienen muy pocos microorganismos y un número limitado de sustratos, o a veces uno solo. Las diferencias de poder contaminante entre un efluente industrial y una agua albañal, están relacionadas principalmente con el contenido de materia orgánica la cual se expresa en valores de demanda biológica de oxígeno (DBO_5) o demanda química de oxígeno (DQO), además de la presencia de sustancia de otra naturaleza, por lo que su estudio y tratamiento es muy específico de cada proceso tecnológico que los generan. La tabla 4 brinda una información acerca de los valores de los parámetros DQO y DBO más comunes de algunas industrias.

Tabla 4. DBO_5 y DQO

TIPO DE INDUSTRIA	**DBO_5**	**DQO**
Matadero bovinos	1300 mg/L	2500 mg/L
Matadero aves	200 mg/L	450 mg/L
Fábrica de queso	3160 mg/L	5600 mg/L
Laminación metales	8 mg/L	36 mg/L
Lácteos	1400 mg/L	3290 mg/L
Lavanderías industriales	700 mg/L	2400 mg/L
Industria farmacéutica	270 mg/L	390 mg/L
Fábrica helados	910 mg/L	1830 mg/L

Fuente: Hammer y Hammer Jr ,2006

Contaminación

Según la Real Academia Española (RAE, 1992) la contaminación es *la alteración intensa y dañina del agua o del aire , producida por residuos de procesos industriales o biológicos*.(Carvalho,1981) define contaminación como cualquier interferencia dañina en los procesos de transmisión de energía de un ecosistema. La contaminación proveniente de residuales domésticos o municipales, a pesar de ser generalmente menos dañina para el medio ambiente que la contaminación industrial, puede causar grandes daños a los ecosistemas, pues posee en su composición materia orgánica y agentes patógenos. Hay básicamente dos formas como fuente de contaminación de un cuerpo de agua: *la contaminación puntual y la contaminación difusa.* En la primera los contaminantes afectan el cuerpo de agua de forma concentrada en el espacio, constituyendo un ejemplo clásico de este fenómeno, la descarga de residuos de un asentamiento poblacional a un río. En la contaminación difusa los contaminantes se distribuyen a lo largo de la extensión del

cuerpo de agua en cuestión, como sucede con la incorporación del drenaje pluvial a cualquier reservorio acuático (Rolim, 2000).

Tratamiento de residuales domésticos por tecnologías convencionales

El grado y la eficiencia del tratamiento de residuales domésticos necesario depende del cuerpo de agua receptor, de las características del uso del agua, de las características de las aguas abajo del punto de vertimiento, de la capacidad de autodepuración y dilución del cuerpo receptor, de la legislación ambiental vigente y de las consecuencias del vertimiento de las aguas residuales.

Una Estación Depuradora de Aguas Residuales convencional para residuales domésticos (EDAR), es aquella que combina procesos físicos y biológicos para remover la materia orgánica (Hammer y Hammer Jr, 2006). Las principales etapas en el proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas son: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y superior.

Los tratamientos preliminares se encargan de remover los sólidos suspendidos gruesos ,grava y sílice, mediante la utilización de limpieza manual, reja de barras, , trituradores, coladores y desarenadores.

Los tratamientos primarios se implementan para remover sólidos sedimentables y parte de materia orgánica, mediante operaciones unitarias que pueden incluir la sedimentación y flotación.

Los tratamientos secundarios se destinan a degradar materia orgánica íntegramente, descomponiéndose carbohidratos, aceites, grasas y proteínas en sustancias más simples como dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3),

metano (CH_4), sulfuro de hidrógeno (H_2S), agua (H_2O),en dependencia del tipo de proceso dominante, aumentando la población bacteriana y el volumen de lodo, que es proporcional a la materia orgánica degradada.

Los tratamientos terciarios o superior tienen como finalidad, remover nutrientes (nitrógeno y fósforo), los cuales son causantes del fenómeno de eutrofización en cuerpos de agua, al encontrarse en concentraciones suficientes para ello, además de servir para la desinfección, la eliminación de sustancias tóxicas, de contaminantes específicos, metales pesados, coloides y sólidos suspendidos remanentes. También son utilizadas con efectividad, sobre todo en latitudes tropicales, las lagunas de estabilización. La figura 1 ilustra las etapas que contempla una estación depuradora de aguas residuales (EDAR).

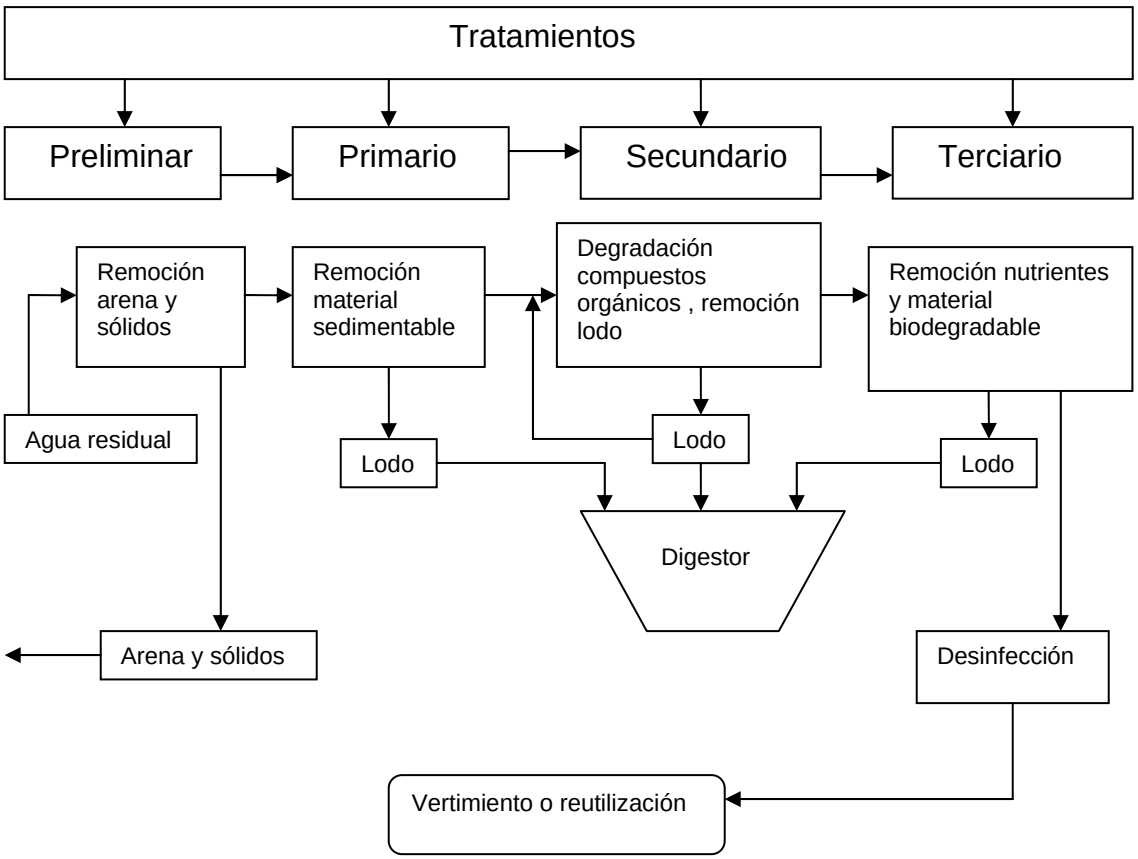

Figura1.Esquema de principios de una EDAR convencional para residual doméstico

Fuente: Propia del autor

Tratamiento de residuales por métodos naturales o tecnologías *blandas*

Bajo la denominación de sistema natural de depuración se engloban aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se produce por componentes del medio natural. Habitualmente se reconocen dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: *los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno, y los sistemas acuáticos*. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, del suelo y de los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores. Hasta los años cincuenta la principal finalidad de estos métodos era la eliminación de efluentes, mediante un sistema barato y técnicamente simple, o el aprovechamiento de estos para regadío. Posteriormente, se comenzó a aplicar esta técnica como sistema alternativo de depuración, como un mecanismo eficaz de regulación de los recursos hídricos en zonas altamente deficitarias e incluso, en determinados casos, como Sistema de Barreras Múltiples Selectivas (SBMS), para proteger acuíferos o tratar aguas con posibilidad de reuso posterior y para combatir la intrusión marina (Mantecón *et al*, 2001). Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente los siguientes tipos:

- Filtro verde.

- Infiltración rápida
- Escorrentía superficial
- Lechos de turba

El rasgo común a todos ellos es que la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta–suelo–agua. El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios científicos de diseño y operación para estos sistemas de depuración.
Entre los métodos considerados como sistemas acuáticos están:

- Lagunas de estabilización
- Humedales
- Cultivos acuáticos

Tratamiento mediante aplicación directa al terreno
En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones: por un lado es el medio receptor de las aguas residuales evitando de esta manera el vertido a otros medios, por otro lado, es el agente activo pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de depuración eliminando nutrientes, materia orgánica, microorganismos y otros componentes como metales pesados o micro contaminantes orgánicos.

Filtro verde
Debido a sus elevados requerimientos de espacio disponible el filtro verde generalmente se utiliza en poblaciones inferiores a 25 000 habitantes. Consiste básicamente en la aplicación de un caudal controlado de agua residual sobre la superficie del terreno, donde previamente se ha instalado una masa forestal o un cultivo. Con ello se consigue, además de la depuración del efluente, el crecimiento de especies vegetales, generalmente arbóreas maderables, y la recarga artificial del acuífero. La depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitación y co-precipitación, fenómenos de óxido-reducción) y biológica (degradación de la materia orgánica); tiene lugar en los horizontes superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológica activa. Tras su infiltración, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo. La cubierta vegetal juega un papel importante en el proceso de tratamiento. Su selección y cuidado dependen principalmente del grado de tratamiento perseguido y de las características de los suelos. El filtro verde tiene uno de los mayores potenciales de tratamiento de todos los sistemas de depuración en el terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre el suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

Para la instalación de un filtro verde se requieren una serie de condiciones relacionadas con el terreno y el agua residual (Metcalf y Eddy, 2000):

- Terrenos con características de permeabilidad y granulometría determinadas. Los idóneos son los terrenos franco-arcillosos y franco-arenosos.
- Nivel piezométrico o manto freático a más de 1,5 m de la superficie (aunque generalmente este valor debe ser aumentado al doble o triple)
- Superficie del orden de 1 ha por cada 250 habitantes, lo que es igual a 40 m^2/hab. , que variará de (10 a 90) m^2/hab dependiendo de la climatología

- El efluente no debe contener sustancias nocivas para los cultivos

Infiltración rápida

El tratamiento mediante infiltración rápida se define como la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta (con una capacidad de infiltración que oscila entre 10 cm/día y 60 cm/día).Este sistema de depuración se aplica principalmente en poblaciones menores de 5000 habitantes equivalentes (Mantecón *et al*, 2001).El agua residual se aplica al terreno en tasas elevadas, bien por extensión en lagunas o bien por aspersión, alternando periodos de inundación con periodos de secado. La aplicación se realiza de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento. La depuración se produce mediante los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar al atravesar el agua residual urbana la zona no saturada. Por medio de este sistema se consigue la recarga artificial de acuíferos, y la posibilidad de reutilizar el agua tratada, recuperándola a través de zanjas o pozos. Se alcanzan reducciones medias de DBO_5 y de sólidos en suspensión alrededor del 90% y una elevada eliminación de patógenos, entre el 70% y el 95%.La evolución del efluente en el suelo y subsuelo es similar a la de los sistemas de filtro verde. No obstante, por tratarse caudales superiores, el suelo y formaciones infrayacentes han de tener mejores características hidráulicas.

Escorrentía superficial

La escorrentía superficial (Murillo *et al*, 1999) es un sistema de depuración relativamente nuevo. El ámbito óptimo de aplicación se encuentra en poblaciones pequeñas, con menos de 500 habitantes. La técnica consiste en forzar la escorrentía del agua residual, mediante riego por circulación superficial en láminas, sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y con vegetación no arbórea), donde se alternan periodos de riego con periodos de secado; la duración de cada fase depende de los objetivos de tratamiento. La aplicación del agua residual suele realizarse en ciclos de varias horas, durante (5 a 7) días a la semana, tras un escaso pretratamiento consistente en la separación de las fracciones sólidas de mayor tamaño. La distribución del agua se puede llevar a cabo mediante aspersores de baja carga, rociadores de baja presión o métodos superficiales como tuberías provistas de orificios. El agua se depura por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, al discurrir por bancales con suelos o estratos superficiales relativamente impermeables, aunque el proceso se ha adaptado a un amplio intervalo de permeabilidades ya que el terreno tiene tendencia a impermeabilizarse con el paso del tiempo.

Lechos de Turba

El ámbito óptimo de aplicación de los lechos de turba se encuentra en poblaciones no muy grandes, en general menores de 2 000 habitantes. Este método de depuración de aguas residuales requiere superficies entre 0.6 m^2/hab y 1 m^2/hab, sin superar la superficie total de cada lecho los 200 m^2.El sistema está formado por lechos de turba a través de los cuales circula el agua residual. Cada lecho descansa sobre una delgada capa de arena, soportada, a su vez, por una capa de grava. El efluente se recoge a través de un dispositivo de drenaje situado en la base del sistema. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de las aguas subterráneas, en caso contrario hay que recurrir a la impermeabilización. Para la depuración de aguas residuales se aprovechan las propiedades de absorción y adsorción de la turba, así como la actividad bacteriana que se

desarrolla en su superficie. Se producen, por tanto, procesos físicos, químicos y biológicos en los que se elimina alrededor del 80% de DBO_5 y el 90% de sólidos en suspensión.

Tratamiento mediante métodos acuáticos
En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a la largo de todo el año, y dependen fundamentalmente del clima, y con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son: lagunajes, humedales y cultivos acuáticos.

Lagunaje
Las lagunas se aplican a núcleos de población superiores a los 200 habitantes, siempre que se disponga de una superficie de terreno de al menos 6,5 m2/hab. La depuración por lagunas de aguas residuales consiste en el almacenamiento de estas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos que se producen tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación. En función de los tipos de microorganismos, que dependen, a su vez, de la presencia de oxígeno disuelto, las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaerobias, facultativas, de maduración y aerobias.

- *Lagunas anaerobias*

El proceso de depuración en este tipo de lagunas tiene lugar mediante una fermentación anaerobia. En estos procesos, en los cuales se puede llegar hasta la formación de metano, participan cuatro grupos microbianos: las bacterias hidrolíticas *(Clostridium, Streptococos, Lactobacillus, Peptococcus) las bacterias acidogénicas (Acetovibrio, Butyrivibrio, Lactobacillus) bacterias acetogénicas (Acetogenicum, Syntrophobacter, Acetobacterium .) y las bacterias metanogénicas (Methanobacterium, Methanococcus, Methanospirillum)* todos ellos complementarios e imprescindibles para el proceso.
Este proceso se divide en dos grandes etapas. En la primera, un grupo de bacterias facultativas formadoras de ácidos descomponen las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos grasos, aldehídos y alcoholes. En la segunda etapa, otro grupo de bacterias estrictamente anaerobias, formadoras de metano, transforman los productos intermedios en gas metano, amoníaco y anhídrido carbónico e hidrógeno. El proceso anaerobio, lo mismo que el aerobio transforma carbono, nitrógeno y fósforo en protoplasma celular. Debido a la elevada carga orgánica, a la profundidad de las aguas que deberá ser superior a 2 m, y al corto periodo de retención del agua residual, que será de (2 a 5) días , el contenido en oxígeno disuelto se mantiene bajo o nulo en toda la laguna. La misión principal de estas lagunas de estabilización es la sedimentación de la mayor parte de los sólidos en suspensión y la eliminación de parte de la materia orgánica por medio de las bacterias presentes, pudiendo alcanzar reducciones en torno al 70% de DBO_5 y sólidos en suspensión. En el peor de los casos una laguna anaerobia funciona igual que un decantador primario, y alcanza rendimientos del 30% y 60% en DBO_5 y sólidos en suspensión

respectivamente. Normalmente estas lagunas son las primeras de una serie, correspondiendo al tratamiento primario en el proceso de depuración. Por otra parte, pueden constituir, por sí solas un sistema de depuración para poblaciones inferiores a 2 000 habitantes que requieran exclusivamente tratamiento primario (Rolim, 2000).

- *Lagunas facultativas*

En estas lagunas se distingue una zona aerobia próxima a la superficie, una zona anaerobia en el fondo, donde se dan procesos de fermentación, y una zona intermedia que contiene bacterias facultativas y es la que da el nombre a las lagunas. El proceso aerobio de la materia orgánica hace que el carbono se utilice como fuente de energía para los microorganismos que al ser oxidados producen anhídrido carbónico. Los microorganismos que participan son fundamentalmente bacterias, pero también hay hongos y protozoos. Estos microorganismos utilizan el carbono restante, así como el fósforo y el nitrógeno para formar nuevas células. El oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica proviene de la re-aireación que se produce en la superficie y de la fotosíntesis que se lleva a cabo por medio de las algas presentes en la zona aerobia. En esta zona, las bacterias, utilizan el oxígeno producido por las algas y desprenden CO_2 que, a su vez, es utilizado por estas, y así se cierra el ciclo. Las lagunas facultativas pueden ser las primeras de una serie o seguir a las lagunas anaerobias, en función de tratamiento secundario. Su finalidad última es la degradación de la materia orgánica. La variación de temperatura en las diferentes estaciones del año, puede obligar a hacer más profundos los estanques. Esta profundidad puede variar entre 1m y 2 m. (Rolim, 2000).

- *Lagunas de maduración*

Tienen la finalidad de reducir los coliformes fecales, contenidos en los desechos de las aguas residuales. Se construyen siempre después del tratamiento completo por medio de una laguna facultativa primaria o secundaria, o de una planta de tratamiento convencional. Con adecuado dimensionamiento logran remoción de coliformes fecales superior al 99.99%, tiene profundidades de 0.6 m a 1.5 m y el área máxima de su nivel no debe sobrepasar 2 ha (Rolim, 2000).

- *Lagunas aerobias*

Son poco profundas, por lo general de 0.3 m a 0.5 m, su principal aplicación es la producción y cosecha de algas, se diseñan para el tratamiento de aguas residuales decantadas. (Rolim, 2000).

Humedales

La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. En el período carbonífero, hace 350 millones de años, cuando predominaban los ambientes pantanosos, los humedales produjeron y conservaron muchos combustibles fósiles (carbón y petróleo) de los que hoy se depende. El progreso del conocimiento científico de los humedales ha puesto en evidencia unos bienes y servicios más sutiles y han sido descritos a la vez como los riñones del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos, y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica.

Los humedales son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. Los mismos se consideran *ecotonos*. El agua que se

mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en disolución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. Dos procesos críticos dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales: la dinámica microbiana y la hidrodinámica. Los procesos microbianos son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales. Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es la que se emplea como mecanismo para simular un humedal natural en los humedales artificiales, con el propósito de tratar las aguas residuales. Los humedales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera. Los mismos operan casi a velocidades de flujo y caudal constantes y están sujetos a cambios drásticos en la remoción de DBO, debido a los cambios en la temperatura del agua. Por esta razón en zonas templadas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año. En zonas cálidas y tropicales, los parámetros climatológicos: temperatura, radiación solar y evapotranspiración varían en un intervalo menor que en zonas templadas. Los efectos de la evapotranspiración no son notorios sobre una base diaria, pero pueden medirse en reducciones en el flujo de salida y un incremento en la concentración de DBO en el curso de una estación. No obstante, estos impactos hidrológicos parecen menores en comparación con los efectos de las temperaturas estacionales sobre la concentración de DBO a la salida.

- Humedales naturales

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que agrupan ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie. Los humedales ocupan el espacio que hay entre los medios húmedos y los medios, generalmente secos y que poseen características de ambos, por lo que no pueden ser clasificados categóricamente como acuáticos ni terrestres (Hammer y Bastian, 1989). Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna, hasta el punto de que el suelo no actúa como en los hábitat acuáticos o terrestres. Las profundidades típicas de estas extensiones de tierras son menores a 0,60 m donde crecen plantas emergentes como juncos, *typha* (totora), *duck weed* (lenteja de agua) que contribuye a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación.

- Humedales artificiales .Sus funciones

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contado con los procesos naturales para tratar el agua residual. Los humedales construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar. Si hay suficiente tierra barata disponible cerca de la instalación de los humedales de cultivo acuático, puede ser una alternativa de costo efectivo, además proporcionan el hábitat para la vida silvestre, y son, estéticamente, agradables a la vista.

- Proceso de remoción físico

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con partículas. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de ellos, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que en los humedales el flujo es con frecuencia, laminar. Las esteras de plantas pueden servir como trampas de sedimentos, pero su *rol* primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material de pequeño tamaño. La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de las partículas y la longitud del humedal. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, que trae como resultado la acumulación de sólidos y contaminantes asociados, sobre la superficie del suelo del humedal. Sin embargo, la resuspensión de los sedimentos, puede resultar a causa de la exportación de los sólidos suspendidos y reducir la eficiencia de remoción. Algo de resuspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo altas en el humedal. Con mayor frecuencia la resuspensión es el resultado de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas. El desprendimiento de gas resulta a partir de gases como el oxígeno, a partir de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica (Benefield, L.D. and C.W. Randall, 2004).

- *Proceso de remoción biológico*

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales. Extensamente reconocido para la remoción de contaminantes en los humedales es la captación de la planta. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. Sin embargo, muchas especies de plantas del mismo son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo. La velocidad de remoción de contaminantes por las plantas, varía extensamente, en dependencia de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en el tejido de la planta. Las plantas leñosas, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento de contaminantes a largo plazo, comparado con las plantas herbáceas. Las algas pueden también proporcionar una cantidad significativa de nutrientes captados, pero son más susceptibles a los efectos tóxicos de los metales pesados. El almacenaje de alimentos en las algas es relativamente a corto plazo, debido al rápido ciclo de rotación (corto ciclo de vida) de las algas. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo, y algunos otros contaminantes.

En los humedales, el material de la planta muerta, conocido como detritus o basura, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes, metales u otros elementos eliminados previamente del agua por captación de la planta son pérdidas del detritus de la planta por la lixiviación y descomposición, y reciclados nuevamente dentro del agua y del suelo. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de la planta, mientras que una pérdida más gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros

organismos. En la mayoría de los humedales, hay una acumulación significativa del detritus de la planta, porque la velocidad de descomposición disminuye substancialmente bajo condiciones anaerobias que prevalecen, generalmente, en el suelo del humedal**.** Si, sobre un período extenso de tiempo, la velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de deposición de la materia orgánica en el suelo, la formación de turba ocurre en el humedal. De esta manera, algunos de los contaminantes captados originalmente por las plantas se pueden atrapar y almacenar como turba. La turba se puede acumular a grandes profundidades en los humedales, y puede proporcionar el almacenamiento de larga duración para los contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el humedal se drena. Cuando sucede eso, los contaminantes incorporados en la turba se pueden liberar y/o reciclar o limpiar con abundante agua del humedal, aunque los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminantes captados y almacenados en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos. Los descompuestos microbianos, sobre todo las bacterias del suelo, utilizan el carbono de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de dióxido de carbono (CO_2) o metano (CH_4). Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos, incluyendo esos encontrados en aguas residuales municipales, aguas residuales de procesamiento de alimentos, plaguicidas y productos del petróleo. La eficiencia y la velocidad de degradación de carbono orgánico por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos. El metabolismo microbiano también produce la remoción de nitrógeno inorgánico, nitrato y amonio, en los humedales. Bacterias especializadas (*pseudomonas sp.)* transforman por mecanismos metabólicos el nitrato en gas nitrógeno (N_2), un proceso conocido como desnitrificación. El N_2 se pierde posteriormente a la atmósfera (Benefield, L.D. and C.W. Randall, 2004).

- *Proceso de remoción químico*

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del humedal es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la disolución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química**,** por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo. Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, incluyendo el amonio (NH_4^+) y la mayoría de las trazas de metales, tales como el ión cúprico (Cu^{+2}). La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico (CEC), aumenta generalmente con el aumento del contenido de la arcilla y de la materia orgánica. La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. Un número de metales y de compuestos orgánicos se puede inmovilizar en el suelo vía la absorción química de las arcillas, y los óxidos de hierro (Fe) y

aluminio (Al), y materia orgánica. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, así se produce el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del humedal es la formación de sulfuros de metales. Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en humedales. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto desde el agua en la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los humedales. La volatilización del amoníaco (NH_3) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno, si el pH del agua es alto (mayor que 8,5). Sin embargo, a pH más bajo cerca de 8,5, el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), que no es volátil. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles, y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los humedales y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes. (Benefield, L.D. & C.W. Randall, 2004).

- *Tipo de humedales artificiales*

*Sistema de agua superficial libre (SASL)**:*** estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1m a 0,6 m) que atraviesa la unidad. La profundidad baja del agua, la velocidad baja del flujo, y la presencia de tallos de planta y basura regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pretratada a estos sistemas, y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente.

Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS): estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes y se usa el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal. Dentro del lecho los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, y así se conectan de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio (Kadlec *et al.*, 1993).

Estos sistemas de flujo bajo superficie son diseñados con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios, son llamados *la zona de raíces* o *filtros de piedras de junco y caña.*

Las ventajas principales de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de olores y mosquitos y la prevención de que las personas entren en contacto con el agua residual. En contraste, la superficie del agua en los sistemas de agua superficial libre (SASL), (*free water surface wetlands*) está expuesta a la atmósfera.

Se considera que las reacciones biológicas en humedales se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En el caso de los humedales SASL esos sustratos son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales y la capa béntica del suelo. En humedales SFBS el sustrato

sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio y la superficie misma del suelo. Dado que el área del sustrato en un humedal SFBS puede sobrepasar el área del sustrato disponible en humedales SASL, las tasas de reacción microbiana suelen ser mayores en los primeros para muchos contaminantes. Como resultado, un humedal SFBS puede tener una menor superficie que un humedal SASL para los mismos caudales y parámetros de calidad del agua.

Cultivos acuáticos

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son básicamente una variante de los humedales artificiales FWS, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen substrato responsable de una parte importante del tratamiento. Las profundidades de agua suelen ser mayores que en los sistemas de humedales, y varían entre 0,5 m y 1,8 m. Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes se han empleado sistemas complementarios de aireación. El uso de jacintos de agua (*Eichornia sp.*) y lentejas de agua (*Lemna sp.*) evita la entrada de luz solar al estanque. Comunmente se utilizan para la eliminación de algas de los efluentes de lagunas y estanques de estabilización. Los sistemas de jacintos de agua además están diseñados también para proporcionar niveles de tratamientos secundarios y terciarios. Estos sistemas han sido utilizados también como medios de producción de proteínas o biomasa, en cuyo caso la depuración de agua constituye un objetivo secundario del proyecto. Las cargas hidráulicas anuales y las necesidades específicas de superficie de los sistemas de plantas flotantes son similares a las de los sistemas de humedales. El clima es un factor limitante en su rendimiento, ya que las plantas sólo crecen a determinadas temperaturas. Estos cultivos acuáticos suelen utilizarse como sistema de afino incorporados a otra cadena de procesos, empleándose generalmente como tratamiento terciario. En operaciones bien controladas, en las que las plantas se cosechan periódicamente, se pueden alcanzar rendimientos altos en la depuración. La carga orgánica admitida por estos procesos es del orden de 30 kg/ha/día a 50 kg/ha/día, lo que para aguas de moderada carga contaminante (DBO_5< 240 mg/L), significa una carga hidráulica del orden de 6 m/año. La tabla 5 resume las funciones de las plantas en los sistemas de tratamiento.

Tabla 5. Funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuático

Raíces y/o tallos en la columna de agua.	1. Superficies sobre la cual las bacterias crecen.
	2. Medio de filtración y adsorción de sólidos.
Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua.	1. Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de algas.
	2. Reducen los efectos del viento en el agua (transferencia de gases entre la atmósfera y el agua).

Fuente: Kadlec *et al.,* 1993

Estos métodos descritos se han puesto de actualidad con la aparición y divulgación del concepto vertido de contaminación cero o vertido cero.

Conclusiones

Los métodos naturales de depuración constituyen una alternativa favorable para el tratamiento de residuales domésticos debido a la capacidad de interacción entre sus componentes naturales: agua, suelo, plantas, microorganismos y atmósfera. Son métodos especialmente útiles en zonas ambientalmente sensibles o donde se proyecte reutilizar las aguas residuales. Poseen economía de funcionamiento, debido a que emplean formaciones naturales o suelos aportados como sustrato depurador. Demuestran remoción eficaz de patógenos, lo que permite preservar la calidad sanitaria de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. La disponibilidad de área es una variable determinante en la factibilidad de su selección para su implementación ya que la construcción de cualquier sistema de depuración de aguas residuales puede ocasionar pequeños problemas a la población cercana si las instalaciones no están suficientemente alejadas de núcleo urbano, al igual que cualquier tecnología de tratamiento de residuales.

Referencias

1. Benefield, L.D. & C.W. Randall (2004). *Biological process desing for wastewater treatment.* Pretice -Hall,Inc. Englewood Cliffs, N.J

2. Carvalho,B.(1981).*Glossário de Saneamento e Ecologia*.ABES.Río deJaneiro,Brasil.
3. Custodio, E. y Llamas, M.R. (2003). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. 2 vol.Barcelona.

4. Hammer, D.A. & R. K. Bastian (1989).*Wetlands ecosystems: natural water purifiers*, Chapter 2 in *Constructed wetland for wastewater treatment*, ed by D. A. Hammer, Lewis Publishers, Chelsea, MI.

5. Hammer,M.J y Hammer Jr.,M.J (2006).*Water and Wastewater Technology*.3ra Edición.Prentice-Hall.USA

6. Kadlec, R. H. W. Bastiacens, & D. T. Urban (1993). *Hidrological design of free water surface Constructed wetlands for water quality improvement;* Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp. 77-86.

7. Mantecón Gómez R, Martín Machuca M y Cantos Robles R.(2001). *Depuración de aguas residuales de origen urbano mediante técnicas de infiltración rápida en el suelo. III Simposio del Agua en Andalucía.* vol. II. 391-401.Córdoba 2001.

8. Mara,D,D(1976).*Sewage Treatment in Hot* Climates ,Jhon Wiley & Sons, Londres.

9. Mettcalf & Eddy. *Ingeniería de aguas residuales // Tratamiento, vertido y reutilización.* 3ra Edición. Mc Graw. Hill Interamerica de España. S.A, 2000.

10. Murillo et al (1999). *Recarga Artificial de Acuíferos*.157 p.p.

11. NC-53:91. Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones, Oficina Nacional de Normalización, 1983.

12. Rodríguez Pérez de Agreda, C. (2006).*Calidad del Agua* .Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE).Ciudad de La Habana, Cuba.

13. Rolim, M. S. *Sistemas de lagunas de estabilización (Cómo utilizar las aguas residuales tratadas en sistemas de regadío)*. Editorial NOMOS S.A., 2000. 958-41-0090-0.