UNED

Bases de la Ingeniería Ambiental



Vicenta Muñoz Andrés
Jesús Álvarez Rodríguez

Bases de la Ingeniería Ambiental

VICENTA MUÑOZ ANDRÉS
JESÚS ÁLVAREZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

BASES DE LA INGENIERÍA AMBIENTAL

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

© *Universidad Nacional de Educación a Distancia*
Madrid 2018

www.uned.es/publicaciones

© *Vicenta Muñoz Andrés y Jesús Álvarez Rodríguez*

ISBN electrónico: 978-84-362-7335-9

Edición digital: enero de 2019

V.M.A.

Buscad y hallaréis

Mt. 7,7

J.A.R. agradece a Elena M.ª

Por todos los tiempos,
para las cosas con prisa,
entre todos los hechos,
sobre todo, tu risa.

ÍNDICE

PREFACIO

TEMA 1
INTRODUCCIÓN, CONCEPTOS GENERALES E INDICADORES

TEMA 2
OPERACIONES BÁSICAS E INSTALACIONES DE INTERÉS AMBIENTAL

TEMA 3
BALANCES GLOBALES DE MATERIA Y ENERGÍA

TEMA 4
FENÓMENOS DE TRANSPORTE

TEMA 5
BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA APLICADO A
UNA CORRIENTE FLUIDA

TEMA 6
MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CALOR

TEMA 7
OPERACIONES DE SEDIMENTACIÓN

TEMA 8
OPERACIONES DE ABSORCIÓN

TEMA 9
OPERACIONES DE ADSORCIÓN

TEMA 10
REACTORES QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS. PROCESOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS DE DEPURACIÓN

SOLUCIONARIO

PREFACIO

Introducción

A partir del siglo XIX los avances alcanzados en la tecnología han conducido a una situación de mayor disponibilidad de medios que, sin duda, han devenido en un considerable aumento del bienestar socioeconómico, al menos de sociedades avanzadas industrialmente. Pero este progreso ha conllevado, desafortunadamente, una degradación alarmante del medioambiente. Por ello, hoy en día, se intenta encontrar la manera de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer a las generaciones siguientes y a sus necesidades futuras: esto es procurando avanzar hacia un desarrollo sostenible. Y para ello es necesario un uso cuidadoso, equilibrado y racional de los recursos disponibles.

En este contexto han surgido, y se han desarrollado, las llamadas Ciencias Ambientales y, como consecuencia, toda un área creciente de tecnologías con entidad propia y específica que se agrupan dentro de lo que se conoce como Ingeniería Ambiental (IA).

En ausencia de una definición ampliamente consensuada de IA, es posible hacerse con una idea del concepto revisando algunas de las más extendidas

— La IA es la aplicación de los principios científicos y técnicos a la mejora y protección del medio ambiente frente a la actividad humana.

- Es la división de la Ingeniería relacionada con la preservación del ambiente y de las fuentes naturales de recursos.
- IA engloba de modo integral los aspectos relacionados con la prevención y control de la contaminación. Con esta finalidad se dedica también a restauración de los ecosistemas y a desarrollo de tecnología menos contaminante.
- IA tiene como objeto la preservación del ambiente de los efectos adversos provocados por la actividad humana y a los humanos de los efectos adversos de un ambiente contaminado.
- IA debe ocuparse de mantener la calidad del medio ambiente y por tanto de la vida que en él se desarrolla y de prever desastres naturales y dar protección al entorno de la vida.

La Ingeniería medioambiental es una disciplina relativamente nueva que procede de su predecesora la Ingeniería Sanitaria, la cual se ocupa fundamentalmente de los problemas de captación, de preservación, y de depuración de agua, que hereda métodos de trabajo de la Ingeniería Química para el aislamiento y/o transformación de compuestos no deseados, a la vez que tiene un desarrollo paralelo a la Bioingeniería.

Así se involucra en tópicos como Hidrología, Diseño de plantas para tratamientos de agua, Tecnología para descontaminación de efluentes, Procesos de fijación, separación o transformación. Además, su profundo impacto social ha dado lugar a su incorporación como exigencia sociocultural para evitar, o al menos disminuir, la contaminación. De ahí el amplio consenso en:

- La necesidad de REDUCIR, REUTILIZAR, RECICLAR Y REGENERAR en la actividad industrial y en la actividad cotidiana.
- Una especial preocupación por llegar a una producción sostenible.
- Minimizar el impacto ambiental de una actividad o una instalación.
- Reducir el aporte energético en la industria, el transporte o los hogares.
- Reducir el consumo de materias primas.

— Evitar, o al menor reducir, la producción de productos secundarios y residuos.

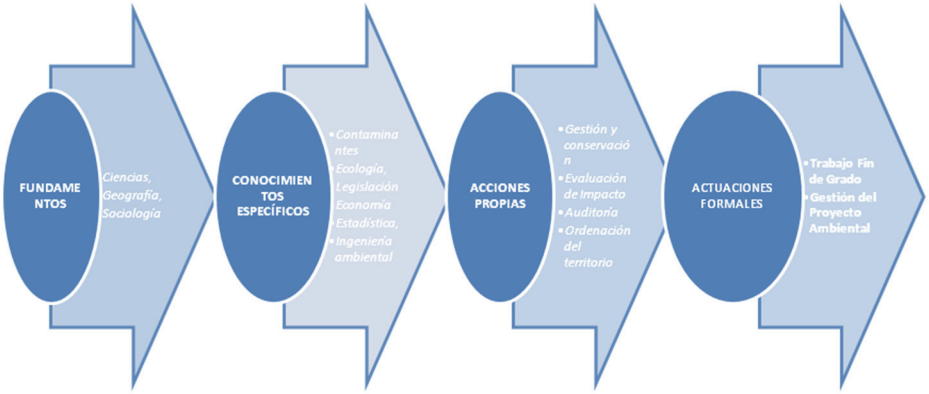
— Controlar la calidad de los efluentes de los procesos industriales y de la actividad urbana.

El campo de acción de la IA se enfoca hacia el tratamiento de la causa de estas preocupaciones, necesidades o imperativos.

Contextualización

La asignatura Bases de la Ingeniería Ambiental se incorpora en el segundo curso del Grado en Ciencias Ambientales. Tras un primer curso donde se han introducido asignaturas que proporcionan la información y formación básica del Grado, como son las asignaturas de Ciencias: Física, Química, Geología, Biología, Matemáticas, todas ellas disciplinas comunes a diversos Grados en Ciencias, junto con otros complementos formativos que marcan la pauta interdisciplinar del título, como la Información Geográfica, y en la metodología de estudio propia de las Ciencias Sociales.

En el segundo curso se presenta la formación básica específica del Grado en Ciencias Ambientales, con estudios de temas propios, como la Ecología, y una serie de disciplinas más o menos alejadas, Legislación o Economía, o más o menos próximas, Estadística, a estudios de Ciencias aplicadas a temas de medio ambiente. En este segmento se incluye Bases de la Ingeniería Ambiental, que recopila conceptos y métodos propios de la ingeniería aplicados a las tareas de un ambientalista.



Conocimientos previos

Con una visión más detallada de la asignatura, se puede decir que ha sentado sus bases sobre conocimientos de química, física y matemáticas, que la biología y la geología le permiten ampliar el campo de mira a hechos como la actividad microbiana o los materiales que puede encontrar en el suelo. Para el estudio de esta asignatura se requieren ciertas habilidades matemáticas y conocimientos elementales de mecánica, termodinámica, reactividad química, cálculo vectorial, cálculo integral y ecuaciones diferenciales. Los cuales ya han sido adquiridos en cuatrimestres anteriores del Grado.

Objetivos generales

La disciplina ofrece tres enfoques: un aspecto informativo y descriptivo, un aspecto conceptual, y un aspecto tecnológico:

— Una fase de introducción en conceptos genéricos a la ingeniería y específicos al estudio para el diagnóstico ambiental. Una presentación somera de los tratamientos físicos, químicos y biológicos dirigidos a mantener unos estándares de calidad de aire, agua y suelo de la calidad adecuadas.

— La exposición de los fenómenos físicos en los que se basan la tecnología de uso: transporte de fluidos, transferencia de calor, transferencia de materia

- Estudio de operaciones propias de ingeniería ambiental, su fundamento, y su diseño:
    - Sedimentación de los sólidos arrastrados en corrientes de agua naturales o residuales.
    - Absorción de un componente de una fase gas en una fase líquida.
    - Adsorción de un componente de una fase fluida en un sólido poroso.
    - Procesos biológicos de recuperación de aguas urbanas.

Se pretende con ello que el estudiante, además de alcanzar una "cultura ambiental profunda", adquiera una serie de hábitos o habilidades que le lleven, ante cualquier suceso con repercusiones ambientales, a plantearse cuestiones como:

¿Qué mejoras es necesario en un proceso, acción, ecosistema …?

¿Qué tecnología exige un procedimiento determinado?

¿Cuánta materia está puesta en juego?

¿Qué caudal de agua se consume en una operación?

¿Qué requerimiento energético es propio de un tratamiento?

¿Qué subproductos se originan en un tratamiento?

Además de acceder a un lenguaje que permita comprender e interpretar documentación científica, técnica y ambientalista, se pretende que adquiera más recursos no tanto para abordar su formación en las disciplinas de cursos posteriores como para conseguir el objetivo primordial del Grado en Ciencias Ambientales: que el estudiante adquiera criterios atinados en el enfoque, evaluación, respuesta y control a situaciones medioambientales que lo requieran. Teniendo en cuenta estos principios se ha diseñado el programa de la asignatura que se propone en tres Unidades Didácticas, que se desarrollan en diez temas según los descriptores que para esta materia se hallan en la memoria del grado.

Organización del texto

La primera Unidad Didáctica pretende introducir la mínima información necesaria sobre lenguaje, conceptos y métodos habituales en Ingeniería Ambiental.

Son parte de ella los dos primeros temas que se enfrentan al modo de contar, estimar y medir algunas variables ambientales. Para ello, es necesario fijar unas normas que describan, interpreten y definan el concepto "contaminado" aplicado al mundo físico: aire, agua, suelo. Fijando la atención en sus componentes y en especial en el conjunto. Ello lleva a la necesidad de utilizar unos indicadores, que aún con suma dificultad, evalúen algo tan subjetivo como el concepto de "hábitat limpio". Los índices de calidad del medio permiten dimensionar en una escala comprensible el grado de conservación o deterioro del ambiente y lo alejado, o no, que está nuestro entorno de este arquetipo así como de llegar al llamado desarrollo sostenible. Además, se describen las principales operaciones unitarias cuya implementación adecuada permite la recuperación de corrientes contaminadas. Ante la imposibilidad de un planteamiento pormenorizado, se presenta un breve compendio de las operaciones que se realizan para la remediación de aire, agua y suelo.

En la segunda unidad didáctica se discutirán las herramientas de análisis y estudio necesarias para la mejor comprensión de cada proceso. Para tratar cuantitativamente una situación, instalación, complejo industrial, agrónomo e incluso un hábitat urbano, es necesario realizar un balance sobre la materia y la energía implicadas en la actividad. Por ello se dedican los primeros temas para introducir, siquiera someramente, en esta contabilidad de materiales que circulan, se consumen, se degradan, se regeneran, así como la energía puesto en juego. Sólo a partir de esta contabilidad se pueden comparar procesos buscando aquél que requiera menor consumo de materia y energía. Nos es absolutamente familiar este intercambio de materia y energía, algo menos la variación de cantidad de movimiento que se da en un buen número de procesos provocados y su estudio ordenado conduce a unos conceptos abstractos que se denominan fenómenos de transporte molecular, objeto de la Unidad Didáctica segunda. Estos fenómenos están implicados en las manipulaciones más diversas: así en la energía puesta en juego para el transporte de fluidos, en el transporte de energía como calor en su variedad de conducción, convección y radiación. Su conocimiento está conectado a la posibilidad de aprovechamiento, de ahorro energético. El transporte de un componente no deseado de una corriente a otra permite regenerar dicha corriente, si bien ello implica el traslado del contaminante a otro medio donde deberá recibir un tratamiento sencillo para aislarlo o transformarlo, finalidad de ciertas operaciones unitarias basadas, entre otros, en los llamados fenómenos de

transporte de energía, de materia e incluso de cantidad de movimiento y que es obligado presentar en el temario.

La tercera Unidad Didáctica recoge, con cierta profundidad, un estudio detallado de algunas operaciones básicas: la sedimentación, la absorción y la adsorción así como el tratamiento elemental del comportamiento de los reactores biológicos. En la sedimentación interesa especialmente la separación de sólidos suspendidos en corrientes de agua. La absorción tiene por fin eliminar compuestos indeseados en corrientes gaseosas por transporte a una corriente líquida. Mientras que la adsorción está destinada a retener sustancias de corrientes gaseosas y/o líquidas en sólidos porosos. Aunque con ellas no se eliminan los productos contaminantes, sí que permiten su concentración o fijación en una fase que facilite su posterior destrucción. En el último tema hay una revisión sucinta del empleo de reactores biológicos para el tratamiento y remediación de aguas residuales. Hoy en día no se concibe la idea de permitir el vertido de aguas que provienen de una explotación, como una industria alimentaria, una explotación agrícola o de una conducción urbana, sin un tratamiento adecuado que no redunde en un deterioro del medio. Estos tratamientos, que son necesariamente prolongados en el tiempo, se realizan en reactores biológicos aerobios cuya gestión es crítica para el mejor funcionamiento del proceso.

La planificación de la asignatura tan sólo pretende introducir al estudio, dado que no permite una mayor extensión en temas de la disciplina. Sin embargo, inculcará una mentalidad más objetiva sobre la necesidad y posibilidad de cuantificación de los fenómenos, las necesidades, los problemas, el costo de las soluciones, teniendo presente la necesidad de “ingenio”, de “inventiva”, para aportar soluciones teniendo presente que el conocimiento profundo de lo aportado por las soluciones puestas ya en práctica, son una fuente de inspiración para nuevas transformaciones.

El texto se presenta en forma autosuficiente, si bien, en cada tema se incorporan algunas citas bibliográficas que pueden servir como fuente de consulta. También en cada capítulo se incorporan una serie de ejercicios que permiten al estudiante adquirir una destreza, tanto en el enfoque de situaciones reales sencillas, como en el método de llegar a una solución de las mismas. Estos

ejercicios están diseñados para que sean realmente una autoevaluación para el estudiante.

Tema 1

Introducción, conceptos generales e indicadores

1.1. PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

1.2. CONCEPTOS BÁSICOS

- 1.2.1. Operación Unitaria
- 1.2.2. Fases, transporte y estados
- 1.2.3. Conceptos termodinámicos
- 1.2.4. Conceptos cinéticos
- 1.2.5. Biodiversidad y Ambientalismo

1.3. MAGNITUDES Y SISTEMAS DE UNIDADES

1.4. MAGNITUDES Y SOSTENIBILIDAD

- 1.4.1. Indicadores
- 1.4.2. Marcos de análisis y clasificación de los indicadores
  - 1.4.2.1. Marco de referencia PER
  - 1.4.2.2. Marco de referencia FPEIR
- 1.4.3. Índices de calidad

1.5. BIBLIOGRAFÍA

1.6. EJERCICIOS DE AUTOCOMPROBACIÓN

OBJETIVOS DIDÁCTICOS ESPECÍFICOS

- Definir ingeniería ambiental
- Comprensión y asimilación de algunos conceptos generales
- Revisión de conceptos termodinámicos y cinéticos
- Magnitudes fundamentales y las magnitudes derivadas
- Diferencia entre Indicadores e Índices

PALABRAS CLAVE

corrientes; dimensiones; equilibrio; escala; estacionario; estándares; fase; flujo laminar; flujo pistón; flujo turbulento; FPEIR; indicador; índice; ingeniería; interfase; mezcla total; PER; PM10; propiedad extensiva; propiedad intensiva; sistema abierto; sistema aislado; sistema cerrado; sostenibilidad

1.1. PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

Durante miles de años la actividad humana tuvo un reducido impacto sobre el medioambiente ya que sus efectos eran contrarrestados con relativa facilidad por la capacidad de autogestión de la Naturaleza, de forma que la actividad antropogénica no diera lugar a cambios irreparables en el medio ambiente. Sin embargo, a medida que se suceden civilizaciones cada vez más desarrolladas tecnológicamente su impacto en el medio natural es cada vez mayor, ya que las necesidades creadas por el aumento y la concentración demográfica, tanto en obtención de recursos como en eliminación de desechos, han obligado a que se desarrollen tecnologías cada vez más potentes para satisfacer la creciente demanda en recursos y en procesos, cuya eficacia y valorización principal tiene por fin la producción.

Podemos decir que el delicado balance entre la actividad antropogénica y la inercia de la Naturaleza ha sido mayoritariamente favorable a esta última, pese a

que un escalado progresivo ha obligado a acciones cada vez más amplias por cada uno de los actores, al igual que en la trayectoria de un péndulo la amplitud a un lado del punto de equilibrio es mayor cuanto mayor lo es en el sentido opuesto. Además, se hace necesario parametrizar estos cambios en dimensiones temporales, puesto que las velocidades de "regeneración" y consumo de recursos pueden ser muy dispares.

Para comprender mejor cómo esta escalada nos conduce a situaciones cada vez más extremas nos serviremos de un análisis simplista de una sencilla explotación tradicional, como puede ser una granja. Al inicio de la actividad, una familia compra una pareja de animales para cuyo cuidado se sirve inicialmente de la producción vegetal de sus tierras. Durante un tiempo las necesidades alimentarias de las bestias son cubiertas por el terreno circundante, mientras que los desechos generados se acumulan en una pequeña porción de sus tierras. Digamos que la amplitud en el lado recursos/desechos ha multiplicado por diez el trabajo de recuperación natural, lo que se consume en 1 año puede ser recuperado por la naturaleza en 10 años. Pasado un tiempo, la explotación cuenta con 50 bestias y no dispone de recursos propios para alimentarlos ni tiene capacidad para consumir lo que produce. Para sobrevivir, es necesario entrar en comercio con otras explotaciones que cubren sus necesidades a cambio de parte de su producción. También será necesario diversificar los productos, con otros tipos de animales o con otras técnicas de procesado, para poder obtener más recursos que permitan mantener el comercio. Sin embargo, la acumulación de residuos será cada vez mayor hasta que su tiempo de procesado sea un factor limitante para su reutilización y obligará a aislar cantidades cada vez mayores, y más tóxicas, de desecho en espacios reducidos, para no mermar la productividad de la explotación. O bien, a deshacerse de ellos por dispersión en terrenos ajenos o vertidos en corrientes que los alejen de la granja. En la actualidad estamos en una situación que puede ser de 100 a 1, y así crece sucesiva pero no indefinidamente.

Sucesivos hitos han obligado a la humanidad a trabajar por la recuperación del entorno, aunque usualmente con fines más económicos que filantrópicos. En este sentido, la retirada de residuos urbanos de la ciudad de Roma con la construcción de las cloacas, el sistema de canales de irrigación de grandes superficies en Egipto, la repoblación forestal y la recuperación de aguas de ríos son sólo algunos de los ejemplos de actuaciones antropogénicas que podríamos llamar inicialmente

paliativas. A partir de la industrialización son cada vez más notables las consecuencias sobre el medioambiente de la actividad de la Civilización, en cuanto a extensión y toxicidad, y a su vez cada vez más dañinos para la propia sociedad. Se estima que se produce un kilogramo/hombre/día de desechos en las sociedades de mayor poder económico. Esto ha obligado a que los Estados actúen contra los abusos de la Industrialización en el pasado, del Desarrollo en la actualidad.

Los efectos de la Revolución Industrial sobre el medio ambiente han sido tan devastadores que han obligado al desarrollo de una nueva etapa en la que cada vez está más controlado el proceso productivo, y más valorado el producto sostenible. En la actualidad, es general la respuesta sociopolítica resultante de la concienciación de parte de la población, y de toda una corriente cultural que se ha dado cuenta de que algunos factores productivos deben incluir conceptos medioambientales como valor propio del producto para que la Humanidad pueda tener continuidad, lo que se conoce como **Sostenibilidad**.

Dentro de este marco debe integrarse este libro que tiene por finalidad presentar los rudimentos necesarios para comprender la **jerga** y utilizar, siquiera someramente, las herramientas que ofrece la tecnología. La **ingeniería** es la disciplina que aplica el conocimiento científico en el diseño de aplicaciones, procedimientos y técnicas capaces de resolver problemas. La **ingeniería ambiental** es la rama que estudia soluciones tecnológicas y metodológicas a problemas ambientales integrando consideraciones ecológicas, sociales, económicas y culturales, a fin de promover un desarrollo sostenible. La Ingeniería Ambiental como resultado sinérgico de la aportación de algunas disciplinas, como se esquematiza en la **Figura 1.1**, contiene al menos dos planos coexistentes interpenetrados.

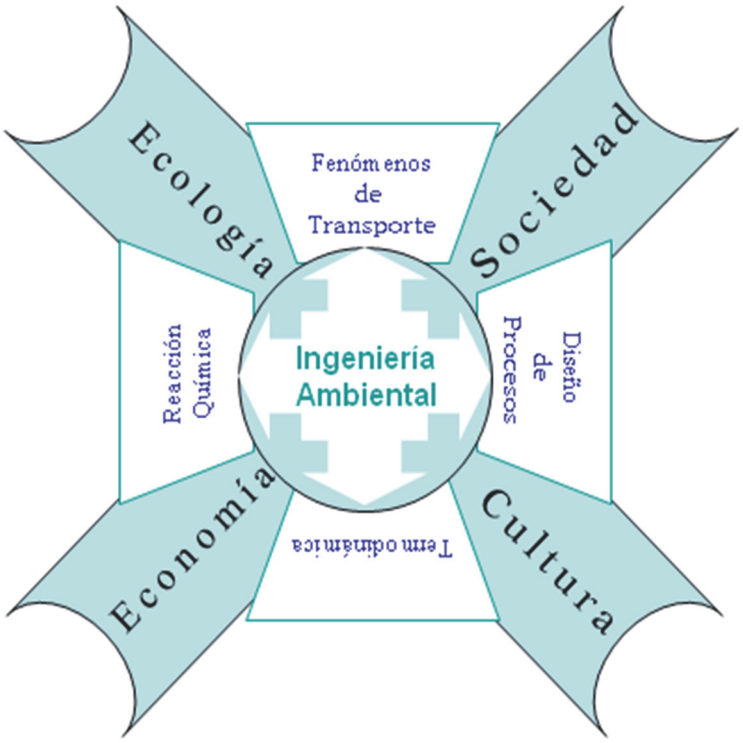


Figura 1.1. Esquema conceptual del soporte pluridisciplinar de la Ingeniería Ambiental.

Esta disciplina es el resultado de la integración de valores ambientales en el desarrollo de procesos, y responde a la necesidad de incluir criterios de **Sostenibilidad** en el Desarrollo. Hunde sus raíces en la Ingeniería Química y en la Ingeniería Sanitaria, puesto que son sus herramientas y metodologías, resultantes de la Ingeniería Industrial y de la capacidad de procesado químico y biológico, las que han ido siendo mejoradas con la incorporación de valores ecológicos. Sin embargo, los requisitos de los productos, las características de los recursos y de los productos secundarios generados, las tecnologías de procesado, así como las limitaciones físicas, legales… de las instalaciones y los materiales, hacen de la Ingeniería Ambiental un área bien diferenciada.

Paralelamente a esta disciplina se ha ido desarrollando todo una Industria Ambiental complementaria que surge, en primera instancia, como correctora de la actividad industrial en el cumplimiento de las normativas ambientales que son

cada vez más exigentes. Esta industria ambiental proporciona el desarrollo de tratamientos más eficaces aplicables a las plantas de residuos sólidos, las plantas de tratamiento de aguas urbanas, las plantas de gestión de aguas industriales, las incineradoras, ...

1.2. CONCEPTOS BÁSICOS

Son numerosos los indicativos que aportan información sobre un proceso, muchos de ellos resultantes de alguna medida empírica, pero cuya mera exposición aislada no aporta conocimiento suficiente sobre el mismo. Para extraer el mejor servicio a un proceso se hace imprescindible conocer, siquiera someramente, el comportamiento físico y químico del que se sirve la tecnología empleada. Para tal fin debemos recordar algunos de los conceptos elementales de física que nos permitirán, en primera instancia, definir, interpretar y predecir el comportamiento de un **sistema** y, más adelante, tratar de ponerlo en servicio en las condiciones más apropiadas para nuestros propósitos.

Conviene iniciar el análisis con la definición del **sistema** como una porción del espacio en un tiempo determinado, ya que la percepción de lo que ocurre en esta porción de espacio puede referirse a un instante o a un periodo de tiempo más prolongado. Esta porción del espacio puede referirse, por ejemplo, a una ciudad, al cauce de un río, a una cuenca hidrográfica o a una instalación industrial, como una conservera o una depuradora. Admitimos que un sistema está separado del resto por una envoltura inexistente, ideal, y lo caracterizamos de acuerdo con su capacidad de intercambio de **materia** y de **energía**. En concreto se dice que un sistema es **aislado** si no permite ningún tipo de transferencia con su entorno; **cerrado** cuando es posible un intercambio de energía, pero no de masa; y, **abierto** cuando se pueden producir tanto el intercambio de masa como el de energía con el entorno.

Sobre un sistema definido es posible, desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental, actuar de diferentes maneras, por ejemplo:

- Medir sus características: físicas, químicas y biológicas.
- Establecer las condiciones de operación con respecto a determinadas características de referencia.

- Controlar la evolución con el tiempo de sus parámetros o de los sucesos que provocan dichas alteraciones.
- Intervenir sobre el sistema para mitigar los cambios que le alejan de los valores determinados como referencia o patrón.

Así, por ejemplo, en el cauce de un río puede interesar medir la composición química de la corriente de agua, haciendo hincapié en determinados componentes como la cantidad de materia orgánica e inorgánica presente o el contenido en microorganismos y, tras comparar con los índices de calidad respectivos, emitir una valoración o plantear actuaciones correctivas, si fuera necesario, para reajustar aquellos parámetros cuya desviación sea significativa con respecto a los parámetros de referencia. Definiremos a continuación algunos de los aspectos elementales cuya información conjunta nos permitirá definir y analizar un sistema con suficiente claridad.

1.2.1. Operación unitaria

Hay una serie de manipulaciones que son comunes en muchos procesos y cuyo análisis y comprensión se realiza de forma independiente al mismo. Estas operaciones se conocen como **operaciones básicas o unitarias**, y pueden realizarse sobre fluidos o sobre sólidos, y entre mezclas de varias fases. Son ejemplos de operaciones unitarias la agitación, la molienda, el tamizado o la separación de mezclas de sólidos por medios magnéticos, mecánicos, o por gravedad. Algunas operaciones unitarias en las que intervienen varias fases son el mezclado u homogeneización; la dispersión de una fase en otra por aireación, la destilación, la cristalización, la separación de los componentes de una mezcla por absorción, por adsorción o por extracción. Como es previsible, cada una de estas manipulaciones tienen unos requisitos, como el aporte de energía como calor, presión, etc., algunos de los cuales se estudiarán más avanzado el curso. Hay otra serie de tratamientos inducidos por reacción química como: la oxidación de contaminantes orgánicos disueltos en una fase fluida con ayuda de un catalizador, o la combustión total o parcial de productos de desecho por gasificación, por combustión o por pirólisis. También existen procesos que se aprovechan en tratamientos biológicos que utilizan la acción de microorganismos que emplean diversos compuestos contaminantes, como fuente metabólica.

Ocasionalmente, para el tratamiento óptimo de estas corrientes es preciso hacer uso de sistemas en **cortocircuito** o sistemas de **recirculación** (Figura 1.2). En el primer caso, se dice que una operación está en **cortocircuito** cuando parte de la corriente de entrada sale del sistema sin sufrir alteración, ya que lleva una trayectoria que la conduce directamente a la salida sin que permanezca un tiempo apreciable en el mismo. Puede ser útil, por ejemplo, para proteger el ecosistema de un digestor ante una avenida tóxica. Una operación opera con **recirculación** cuando parte de la corriente de salida se introduce de nuevo con la corriente de entrada. Tiene como misión llevar a la corriente de entrada a las condiciones óptimas para verificación del proceso o alcanzar un mayor aprovechamiento de reactivos en sistemas de baja conversión.

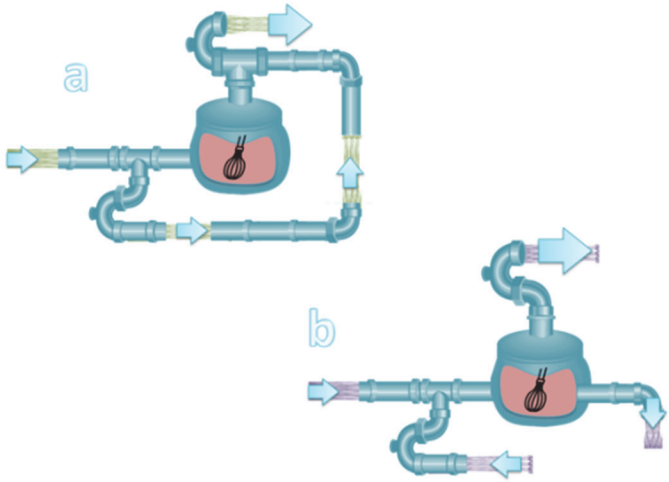


Figura1.2. Esquema de flujo: a) cortocircuito; b) recirculación.

Todas las operaciones unitarias que se producen en un sistema pueden realizarse en **modo discontinuo**, si se introducen las fases en un recipiente, se tratan y se separan, o en **modo continuo**, si continuamente se introducen las corrientes y se extraen. Si en una operación continua las propiedades intensivas (presión, temperatura, velocidad del fluido, composiciones, etc…) en cada una de las posibles localizaciones del sistema se mantienen constantes en el tiempo se dice que es una operación en **estado estacionario**, mientras que en los casos en

los que hay una variación de alguna de estas propiedades el sistema es en **estado no-estacionario**.

1.2.2. Fases, transporte y estados

Para llevar materia hasta un módulo de tratamiento, tanto en el transporte como durante la operación unitaria, se requiere cierto manejo de una o varias fases. A continuación, revisamos qué entendemos por fases, cómo se ponen en contacto y cómo se describe un sistema atendiendo al movimiento y naturaleza de sus fases.

Si observamos un sistema de una sola fase o un sistema con un fluido con movimiento laminar, cuando es perturbado éste ofrece una respuesta que resulta en una transferencia de energía, materia o velocidad según el origen de la perturbación. Por ejemplo, en la superficie de una estufa, al conectarla a la red eléctrica, se produce un pequeño flujo de energía desde la zona en contacto con la fuente de calor hacia el exterior, flujo que observamos porque la pared exterior esta "algo más caliente" que el aire situado a cierta distancia de ella. Hay un transporte de calor desde zonas de temperatura elevada a las zonas de temperatura menor. Podemos considerar otro ejemplo, cuando en otro sistema en el que se derrama una pequeña cantidad de disolución acuosa de amoniaco, sentimos el olor de éste porque parte de las moléculas de agua y amoniaco pasan al aire y llegan a los receptores olfativos de la nariz, se ha producido difusión de materia desde zonas más concentradas a zonas más diluidas. Finalmente, como tercer ejemplo, en una corriente fluida se vierte en otra de menor velocidad las porciones más veloces impulsan un aumento en la velocidad de las más lentas, como cuando un agitador se mueve suavemente en un recipiente que contiene un líquido mientras transmite su velocidad a las capas más próximas de fluido que lo mojan y éstas a las siguientes, se está produciendo una transferencia de velocidad desde las porciones de fluido más veloz a las de fluido menos veloz. Los tres son ejemplos de fenómenos de transporte que, aunque se estudiarán con más detalle más adelante, son comunes a todos los procesos y requieren el empleo de algunos conceptos que estudiaremos como: **fase**, **modo de contacto**, **tipo de flujo** o **estado**.

Entendemos por **fase** el conjunto de todas las partes homogéneas de un sistema, iguales en composición en todos los puntos, y por todas las propiedades químicas y físicas intensivas (que no dependen de la cantidad) y separadas de las demás partes por cierta superficie visible. Cada sustancia, que puede ser separada del sistema y existir individualmente fuera del mismo se llama **componente** del sistema. A su vez, cada componente puede encontrarse en cualquiera de los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gas; y constituir varias fases. Lógicamente, la zona de contacto entre dos fases se conoce como **interfase**. La interfase es el lugar geométrico principal en el que se verifican la mayoría de las operaciones unitarias, ya que se suele aprovechar de sus características "especiales", diferenciadas del resto del sistema, para la verificación de fenómenos físicos o químicos.

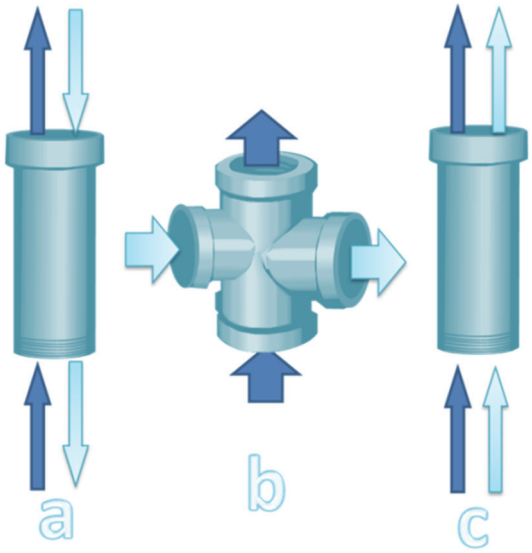


Figura 1.3. Esquema de modos de operación para el contacto de corrientes
a) flujo contracorriente, b) flujo cruzado, c) flujo paralelo.

En interfases donde las fases están en movimiento éstas pueden, circulando en modo **laminar** o en modo **turbulento**, ponerse en contacto circulando en **corrientes cruzadas** o en **corrientes en paralelo**, en el mismo sentido o en sentido opuesto, y menos frecuentemente en **contacto intermitente** por pulsos

(Figura 1.3). Un procedimiento característico es el contacto por etapas: dos fases se ponen en contacto, por medio de agitación, se produce una transformación física, química, entre ambas, y a continuación se procede a su separación. Este proceso se puede realizar una sola vez, en una sola etapa, o bien en una cascada de etapas de modo que cada corriente de entrada a una etapa procede de la etapa anterior y cada corriente de salida se introduce en la etapa posterior. Además, para facilitar el contacto se puede introducir una agitación para favorecer la mezcla entre ambas, dispersar una fase en otra empleando una columna de burbujeo (gas disperso en líquido), un spray (líquido disperso en gas), o un lecho fluidizado (donde se hace pasar un fluido a través de un lecho de sólidos, de pequeño tamaño, a velocidad elevada de modo que parte circula entre el sólido y parte como burbujas). También se puede optar por mezclar dos fases fluidas facilitando su contacto con lechos sólidos, como rellenos de columnas o platos, por los que circula una fase en sentido vertical y otra fase en sentido horizontal etc.

Como durante la circulación de un fluido ésta discurre de modo que cada porción del mismo sigue una trayectoria según las propiedades del fluido y su velocidad podemos encontrar dos escenarios extremos. Si el fluido se mueve con una velocidad baja, la trayectoria que siguen sus componentes es una línea recta, o suavemente curvada, y las trayectorias de diversas porciones de fluido discurren paralelas formando un haz, de modo que las líneas de flujo se abren y cierran suavemente y cada porción mantiene su individualidad sin mezclarse con otras, se dice de este flujo que es laminar. Si, por el contrario, la velocidad es suficientemente elevada para que las trayectorias sigan curvas pronunciadas que discurren en remolinos de forma que las líneas de flujo se entremezclan y las porciones de fluido pierden su individualidad, se dice que el flujo es turbulento. La evolución desde laminar a turbulento es difusa y ocurre a lo largo de un intervalo amplio que considera, además de la velocidad del fluido, la viscosidad y la densidad de la fase de fluidos. Para identificar estas condiciones de flujo en conducciones se utiliza el parámetro adimensional denominado **número de Reynolds** que relaciona estas variables, como se tratará con más extensión en capítulos posteriores.

Cuando, en lugar de las trayectorias de los componentes de una corriente, consideramos las propiedades intensivas de una corriente (presión, temperatura y composición) podemos discriminar entre dos modos de operación con

peculiaridades muy útiles para el diseño de operaciones: flujo en pistón y mezcla total. Se dice de una corriente, que se introduce en un equipo, que opera en continuo en **flujo en pistón** cuando cada una de las pequeñas partículas, que se podría suponer la componen, tienen un mismo tiempo de permanencia en el sistema, de modo que podríamos considerar esta corriente formada por frentes que recorren el aparato y que en cada sección tienen las mismas propiedades intensivas, a su vez diferentes de frente a frente. Por el contrario, una corriente que se introduce en un aparato que opera en continuo en **mezcla total** los valores de las propiedades de la corriente de entrada son diferentes a cualquier otro punto del sistema, donde se encuentran los mismos valores para las propiedades intensivas.

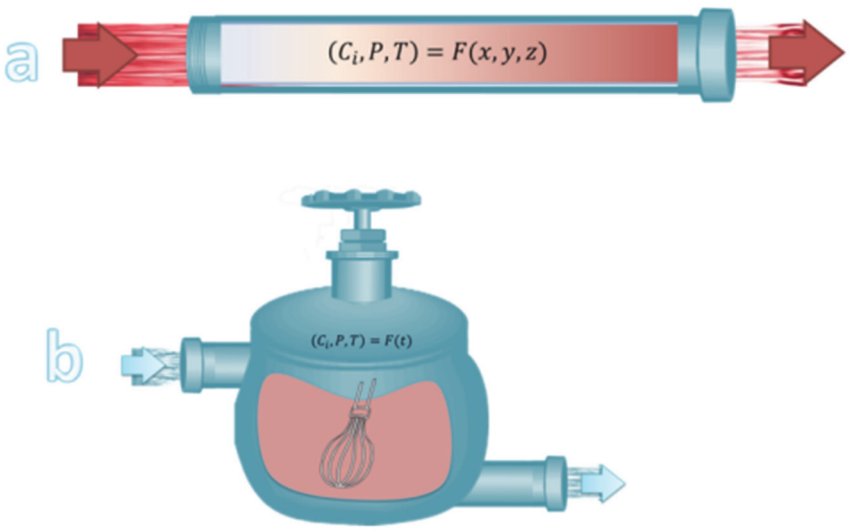


Figura 1.4. Esquema de modelos ideales de flujo: a) flujo pistón; b) mezcla total.

1.2.3. Conceptos termodinámicos

En el estudio de un sistema la valoración de los estados de equilibrio se afronta desde al análisis macroscópico conocido como termodinámica. Aunque la Termodinámica es una potente herramienta para el estudio de sistemas propios

de ingeniería ambiental, a continuación, sólo revisamos los conceptos que serán más útiles para afrontar algunos aspectos del curso, como los cálculos de balances de energía o la evaluación de los estados de equilibrio entre fases, y se recomienda la consulta de libros especializados para profundizar en la materia.

Haremos uso de la **capacidad calorífica** que es la energía necesaria para modificar la temperatura de una cierta cantidad de materia, es una propiedad extensiva que se expresa en J/ºC. O bien, el **calor específico**, que es la propiedad intensiva y se expresa en J/ºC mol, o bien J/ºC mol g. Aunque la capacidad calorífica a presión, C_p, o a volumen, C_v, constante se utilizarán en diferentes momentos según convenga. Aunque será la C_p la más empleada ya que puede estimarse a partir de una expresión en serie de potencias de temperatura, T, cuyos coeficientes están tabulados para la mayoría de las sustancias, según la expresión:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \qquad [1.1]$$

Nos serán necesarios el **calor de combustión**, ΔH_r, el **calor de formación**, ΔH_f, y el **calor de reacción**, ΔH_r, para plantear y resolver balances de materia y energía en sistemas donde ocurren reacciones químicas. Se entiende por tales la energía puesta en juego para la combustión, formación o reacción de un mol de una determinada sustancia en unas condiciones determinadas (presión, temperatura, estado físico), y se calcula como:

$$\Delta H_r = \Delta H_r^0 + \int_{T_{ref}}^{T} \sum\left[C_p^{productos}(T)\right] - \sum\left[C_p^{reactivos}(T)\right] dT \qquad [1.2]$$

$$\Delta H_f = \Delta H_f^{\text{productos}} - \Delta H_f^{\text{reactivos}} \qquad [1.3]$$

El **calor latente**, L, es la energía requerida para cambiar de estado de agregación una cantidad de sustancia, m. Es una propiedad intensiva, que se expresa en J/kg, o J/mol, y depende del tipo de cambio de fase (fusión, vaporización, condensación) y su valor está tabulado para la mayoría de las sustancias. Permite calcular el **calor de cambio de fase** como:

$$Q = mL \qquad [1.4]$$

El concepto de equilibrio es un tema principal en termodinámica y su aplicación se hace indispensable en sistemas de interés en ingeniería ambiental. Se admite que dos fases están en **equilibrio** si en ambas el potencial químico es idéntico lo que supone igualdad de presión y temperatura, pero no requiere igualdad de composición de ambas fases. Nos será de utilidad en sistemas bifásicos gas y líquido, asumiendo comportamiento ideal, para calcular la distribución de los componentes entre ellas según la ley de Henry, que relaciona la presión parcial de un gas con la solubilidad (la concentración del gas, como fracción molar) como:

$$p_i = H_i x_i \qquad [1.5]$$

1.2.4. Conceptos cinéticos

En toda operación se provoca una transformación en el sistema que conduce a una variación de temperatura, de presión, de concentración, de composición de las fases… a la que el sistema responde de tal modo que el resultado obtenido esté en la línea del objetivo propuesto. Esta variación de las propiedades del sistema puede hacerse de modo "rápido" o "lento" y este concepto cinético debe ser cuantificado. Esta velocidad, en general, se mide como la variación de una propiedad puntual intensiva -como la temperatura, la presión o la concentración- por unidad de tiempo. En cambio, si se mide respecto a la variación de una propiedad extensiva se define respecto a la variación por unidad de volumen, en la unidad de tiempo.

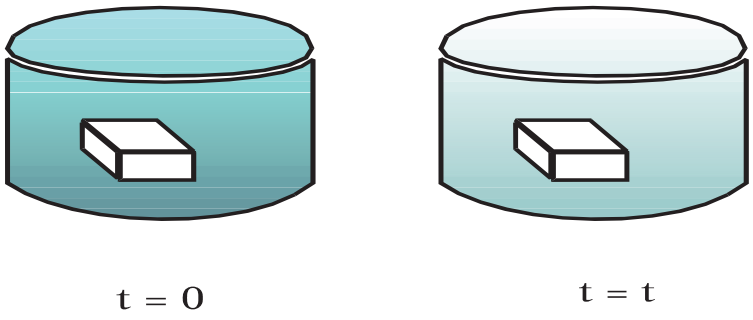


Figura 1.5. Representación visual de la concentración por unidad de volumen y tiempo.

Por ejemplo, el concepto de velocidad de reacción química está asociado al cambio en el número de moles de una sustancia que se hallan contenidos en la unidad de volumen en una unidad de tiempo. Este cambio será positivo en la formación de productos y negativo en su desaparición (al definir la unidad de volumen hay que tener en cuenta si éste es constante o si sufre alteraciones, y en ese caso relacionar el volumen final con el inicial). En general se expresa como aumento de productos o consumo de reactivos como:

$$r_i = \frac{dp_i}{dt} = -\frac{dR_i}{dt} \qquad [1.6]$$

En sistemas biológicos, cuyas complejas redes metabólicas o anabólicas hacen imposible el seguimiento de todos los componentes, se suele trabajar a partir del estudio del crecimiento celular como variación en el número de células que están contenidas en la unidad de volumen por unidad de tiempo. Es decir, como la variación en el sustrato, la masa celular o enzimática, contenida en la unidad de volumen en la unidad de tiempo. De igual forma que no es posible seguir todas las concentraciones de las sustancias, tampoco lo es seguir todos los procesos enzimáticos, ya que los organismos vivos son algo más que sustancias químicas o que procesos enzimáticos. Además, para conocer el crecimiento neto hay que tener en cuenta no sólo la proliferación celular sino también su muerte celular. De ahí que se acepten ecuaciones pseudo-cinéticas como la propuesta por Michaelis-Menten en función de la concentración total, X, de la concentración de sustrato, S, de una serie de parámetros que afectan al crecimiento (k_m y K_S) y al deceso k_d.

$$\mathrm{r} = \frac{\mathrm{dX}}{\mathrm{dT}} = \frac{\mathrm{k}_m \mathrm{SX}}{\mathrm{S}+\mathrm{K}_S} \qquad [1.7]$$

1.2.5. Biodiversidad y Ambientalismo

Según el Convenio de Naciones Unidas sobre Conservación y Uso sostenible de la Diversidad Biológica, de definición de biodiversidad se puede enunciar del modo siguiente: “La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro

de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas". Por eso se suele considerar que la biodiversidad está constituida por tres componentes principales: genética, taxonómica y ecológica; claramente diferenciados e interdependientes (Tabla 1.1.). Se consideran seis niveles principales de organización ecológica.

Tabla 1.1. Resumen de biodiversidad

Diversidad genética	Variedad de genes o formas genéticas subespecíficas
Diversidad taxonómica	Variedad de especies u otras categorías taxonómicas
Diversidad ecológica	Variedad de ecosistemas en cualquier nivel geográfico

A. *Individuo*: organismos aislados de una especie determinada.

B. *Población*: grupo de individuos de la misma especie en una zona concreta al mismo tiempo. Tienen un tamaño, una tasa de nacimiento y una tasa de mortalidad de las que puede inferirse una tasa de crecimiento.

C. *Comunidad*: poblaciones de diferentes especies que conviven en hábitats, muchas interactuando entre sí. Un hábitat se refiere a la clase de medio físico o lugar determinado por la topografía, estructura de la vegetación, geología y el medio circundante. Dentro de cada hábitat se puede describir para cada especie su sitio dentro de la comunidad, una combinación de lo que hace y dónde vive, es decir, el nicho de la especie.

D. *Ecosistema*: está compuesto por los seres vivos (bióticos) y por el entorno (abióticos) de una zona.

E. *Bioma*: cuando las condiciones ambientales (p. ej. Clima) son similares en diferentes partes del mundo, a menudo los hábitats y las comunidades son también similares (p. ej. bosque tropical)

F. *Biosfera*: es la parte de la tierra y de la atmósfera en la que existe vida. Incluye la capa superficial de la tierra, los océanos y los sedimentos en el fondo de las masas de agua, y parte de la atmósfera en la que existe vida.

Uno de los principales axiomas en ecología es aquel que manifiesta que globalmente todo está conectado con todo. Hecho que se observa en la extraordinaria influencia que pueden tener pequeños cambios en un componente sobre otros ecosistemas alejados tanto en el espacio como en el tiempo. Con lo que

obliga a cuidar especialmente el impacto que la actividad humana puede dar lugar y a minimizar su extensión en la medida de los posible.

1.3. MAGNITUDES Y SISTEMAS DE UNIDADES

Se llaman **magnitudes** a aquellas propiedades que pueden medirse y expresar su resultado mediante un número y una unidad. Conviene recordar que **propiedades extensivas** son aquellas que dependen de la cantidad de materia considerada y son aditivas porque los valores de una misma **propiedad extensiva** se pueden sumar, y que **propiedades intensivas** son aquellas que no dependen de la masa o del tamaño de un cuerpo, no son aditivas

Desde muy antiguo el hombre se ha servido de sistemas de medidas que le permitieran realizar con éxito las más diversas actividades (desde construir casas hasta comerciar). Las primeras referencias de medida (documentos babilonios y egipcios) señalan que la longitud fue medida con el antebrazo, la mano o el dedo. Mientras que las unidades de tiempo se basaban en los movimientos periódicos del sol y la luna. El Imperio Romano difundió e impuso sus medidas por todos sus territorios dando lugar al primer sistema paneuropeo. Así, por ejemplo, los romanos tenían para la longitud como base el pie, el cual se dividía en 12 pulgadas, y 1000 pasos constituían una milla romana, la cual está razonablemente cerca de la milla británica de hoy en día. Carlomagno (742-814) creó un sistema único de medidas en todo su reino, que con el paso del tiempo fue degenerando de tal forma que las medidas de longitud, volumen o masa en el reino eran arbitrarias en tamaño, y variables de una ciudad a otra. En Inglaterra también había una variedad de medidas tan grande que la realeza británica ordenó asignar unos valores definidos a las unidades de medida como quedó reflejado en la Carta Magna "Habrá una medida para vino en todo nuestro reino, y una medida para cerveza, y una medida para granos... y una anchura para las telas... y con los pesos se hará lo mismo que con las medidas" (Carta Magna, 1215). Estos estándares no sufrieron ninguna revisión sustancial hasta el siglo XIX (independencia de Estados Unidos). Hoy en día estos estándares se conocen como Sistema Anglosajón de Unidades. En 1790 en Francia había cerca de 800 denominaciones diferentes para las medidas y, considerando sus diferentes valores en las distintas ciudades, había alrededor de 250.000 clasificaciones para las diferentes unidades. Esto obligó a la Asamblea Nacional de Francia a la promulgación de un decreto durante la Revolución Francesa (8 de mayo de 1790), por el cual, la Academia Francesa de Ciencias

"recomendaría la implantación de estándares invariables para todas las medidas y todos los pesos". El resultado de este proyecto ha dado lugar a lo que se conoce hoy en día como Sistema Internacional de Unidades.

Sin embargo, aunque el Sistema Internacional es el más extendido y aceptado, dado que hay muchos datos en bibliografía que se expresan en otros sistemas, conviene destacar: Sistema Cegesimal, que emplea longitud, masa y tiempo como unidades fundamentales; Sistema Técnico, que emplea la fuerza como magnitud fundamental y la masa como magnitud derivada; y el Sistema Británico o Imperial, cuyas unidades similares a las del Sistema Internacional fueron definidas en la "*British Weights and Measures Act of 1824*", son muy habituales en entornos ingenieriles por motivos comerciales.

Tabla1.2 Unidades derivadas de las magnitudes fundamentales.

Propiedad	**Unidad**	**Dimensiones**
Fuerza	Newton (kg m s^{-2})	MLt^{-2}
Presión	Pascal (kg $m^{-1}s^{-2}$)	$ML^{-1}t^{-2}$
Energía	Julio (kg m^2s^{-2})	ML^2t^{-2}
Potencia	Watio (kg m^2s^{-3})	ML^2t^{-3}
Viscosidad	kg m^{-1} s^{-1}// N s m^{-2}	$ML^{-1}t^{-1}$
Calor específico	J kg^{-1} K^{-1}	L^2t^{-2} T^{-1}
Densidad	kg/ m^3	ML^{-3}
Superficie	m^2	L^2
Volumen	m^3	M^3

En el Sistema Internacional hay siete magnitudes fundamentales: longitud, tiempo, masa, temperatura, cantidad de sustancia, corriente eléctrica e intensidad luminosa; de las que es posible obtener todas las demás, denominadas magnitudes derivadas. La magnitud de una cantidad física se mide por comparación con el valor de otra semejante tomada como unidad. Así una longitud se compara con un

patrón de la unidad metro y se expresa con un número y una magnitud en este caso metros. Algunas de las unidades derivadas, ampliamente usadas, se recogen en la Tabla 1.2. Una unidad derivada puede frecuentemente expresarse de varias maneras utilizando nombres de unidades básicas y nombres especiales de unidades derivadas.

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) adoptó una serie de prefijos para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI. Siguiendo la Recomendación 1 (1969) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), el conjunto de estos prefijos está designado bajo el nombre de prefijos SI. Las unidades SI, es decir las unidades básicas o fundamentales y las unidades derivadas del SI, forman un conjunto coherente, *el conjunto de unidades SI*. El SI admite el uso de múltiplos y submúltiplos para evitar usar números muy grandes o muy pequeños de las unidades de medida.

Tabla 1.3. Múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI

	Factor	**Prefijo**	**Símbolo**
10^{12}	1 000 000 000 000	tera	T
10^{9}	1 000 000 000	giga	G
10^{6}	1 000 000	mega	M
10^{3}	1 000	kilo	K
10^{2}	1 00	hecto	H
10	1 0	deca	da
1	1		
10^{-1}	0,1	deci	d
10^{-2}	0,01	centi	c
10^{-3}	0.001	mili	m
10^{-6}	0,000 001	micro	μ
10^{-9}	0,000 000 001	nano	n
10^{-12}	0,000 000 000 001	pico	p
10^{-15}	0,000 000 000 000 001	femto	f

Los múltiplos y los submúltiplos de las unidades SI que están formados mediante prefijos SI deben ser designados por sus nombres completos (p. ej. nanómetro). Como excepción a la regla, los múltiplos y submúltiplos del kilogramo están formados ligando nombres de prefijos al nombre de la unidad "gramo" y símbolos de prefijos al símbolo de unidad "g".

Aunque el uso de las unidades SI está recomendado en ámbitos científicos, técnicos y comerciales, otras son todavía ampliamente utilizadas como el barril, el galón, la libra…. y algunas lo serán probablemente todavía durante numerosos años debido, a que su uso está tan extendido en la vida cotidiana y tan profundamente enraizado en la historia y en la cultura de algunas comunidades, que su sustitución será un proceso muy arduo. Es la razón por la cual las principales unidades fuera del SI están mencionadas en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Unidades fuera del Sistema Internacional en uso con el Sistema Internacional

Nombre	**Símbolo**	**Valor en SI**
Minuto	min	1 min = 60 s
Hora	h	1 h = 3600 s
Día	d	1 d = 86400 s
Litro	L	1 L = 10^{-3} m^3
Tonelada	t	1 t = 1000 kg
Bar	bar	1 bar = 0,1 MPa = 10^5 Pa
Ergio	erg	1 erg = 10^{-7} J
Dina	dyn	1 dyn = 10^{-5} N
Poise	P	1 P = 0,1 Pa·s
Atmósfera	atm	1 atm = 101325 Pa
Caloría	cal	1 cal = 4,18 J

1.4. MAGNITUDES Y SOSTENIBILIDAD

Ya se ha introducido alguno de los conceptos generales que le serán de utilidad para comprender la asignatura. Profundizando en el estudio de unidades y medidas, puede colegir que son estos dos de los aspectos fundamentales de la Ingeniería formulados como la "estandarización o normalización" y el "problema de escala". Al primero da soporte la definición de unidades internacionales y su definición precisa que acabamos de recordar, y es una necesidad para el buen diseño y desarrollo de cualquier proyecto. Su universalización facilita el comercio y la industria a nivel global puesto que permite conocer las características y propiedades del producto tanto como su funcionalidad. Por ejemplo, un tubo de acero queda definido si se especifica que este es de 30 mm de diámetro externo y 7 mm de espesor, y que es conforme con la norma ISO 2938. Por su parte el segundo será parte del núcleo gestor de cualquier proyecto. Para ilustrar este último nótese que no será necesaria la misma instalación para el tratamiento de aguas urbanas de un núcleo de 15 habitantes que para uno de 60.000; como no sería lo mismo diseñar un puente sobre una acequia que sobre el rio Támesis. Destacada la importancia de estos dos aspectos cabe preguntarse qué particularidades exige la Ingeniería Ambiental, que no estuvieran incluidas en los aspectos ya resueltos de la Ingeniería Industrial o en la Ingeniería Química. Pues son justo esas dos cuestiones, normalización y escala, las que hay que resolver sobre problemas ambientales. Como ya conoce, aunque existe una variable que mide y nos permite describir el volumen o la masa de un lago, no existe aquella que nos diga cómo está de contaminado -si lo estuviera- o cómo es de sostenible. A esta particularidad responde el epígrafe de Índices e Indicadores, que tiene por objeto medir y normalizar aspectos complejos de la sociedad como la calidad de las aguas o la contaminación de los ríos.

1.4.1. Indicadores

En la literatura se encuentran muchas definiciones del término indicador ambiental debido, fundamentalmente, a la relativa novedad del tema y a la cantidad de aproximaciones que se pueden aplicar a su estudio. Por ejemplo, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) define el término indicador como un "parámetro o el valor resultante de un conjunto de parámetros, que ofrece información sobre un fenómeno, con un significado más amplio que el directamente asociado a la configuración del parámetro". Mientras

que la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) presenta una definición más técnica: "los indicadores ambientales comunican aquellos aspectos considerados típicos o críticos para la compleja interrelación entre especies naturales y componentes abióticos del sistema ambiental". Y en España el Ministerio de Medioambiente (2004) define como indicador ambiental una "variable que ha sido socialmente dotada de un significado añadido al de su propia configuración científica, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social con respecto al medio ambiente e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones".

Así pues, los indicadores ambientales tratan de proporcionar información de una forma concreta y sistemática sobre una situación ambiental determinada, de forma que sean útiles para la toma de decisiones. Se acepta que los indicadores ambientales deben de cumplir los siguientes criterios:

1. Tienen que tener validez científica siendo su significado claro e inequívoco.
2. Debe haber disponibilidad de datos, y la estadística debe de ser fiable.
3. Deben ser representativos, es decir, estar fuertemente asociados a las propiedades que describen.
4. Deben ser sensibles a los cambios para posibilitar la predicción de situaciones futuras.
5. Deben poderse medir con relativa facilidad. Además, tienen que ser claros, simples y específicos.
6. No sólo tienen que ser relevantes a nivel científico sino también político para ser útiles en la toma de decisiones.
7. Su información debe de ser comparable a distintas escalas territoriales y temporales.
8. La relación del coste de obtención de la información con el beneficio de esa información debe de ser razonable.

Estos indicadores permiten definir **índices** para el análisis en conjunto de varios parámetros o variables a partir de una única expresión numérica. Como define Pender[1]: "*los índices son una herramienta cuantitativa que simplifica a través*

[1] Pender, A.,L.Dunne y F. Convery (2000)"*Environmental indicador for the urban environment:A literature review*" Environmental Studies Reserach Series . Dublin University College.

de modelos matemáticos los atributos y pesos de múltiples indicadores con la intención de proporcionar una explicación más amplia de un recurso o del atributo a evaluar y gestionar". Por lo tanto, un índice proporciona una información de mayor grado que un indicador y por ello su carácter de estudio social es más acentuado.

En el contexto de indicadores ambientales, un índice se corresponde con una agregación de indicadores con impacto similar. Así se pueden agrupar mediante un único índice, para la evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero, los indicadores de concentración de dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y CFCs. La agrupación no es una simple suma de indicadores, de hecho, se requieren factores ponderados para satisfacer la necesidad de proporcionar una información significativa, condensada y simplificada.

1.4.2. Marcos de análisis y clasificación de los indicadores

Para poder hacer uso de los indicadores hay que organizarlos de un modo lógico que permita su análisis e interpretación de un modo eficiente. Los indicadores no se utilizan ni aislados ni se utilizan todos simultáneamente, se emplean agrupados como sistemas de indicadores, que se pueden categorizar atendiendo a varias clasificaciones:

- Por medios (aire, agua), temas (ruido, energía); y sectores (industria).
- Respecto a las causas que operan y las respuestas provocadas.
- Por ámbito espacial o ecosistemas.

La Unión Europea utiliza dos modelos de referencia: PER (Presión-Estado-Respuesta) y el FPEIR (Fuerza motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta).

1.4.2.1. Marco de referencia PER

Este marco de referencia para clasificar los indicadores obedece a una lógica según la cual las actividades humanas ejercen **presiones** sobre el **entorno** y los recursos ambientales provocan cambios alterando, en mayor o menor medida, su estado. La sociedad en su conjunto identifica estas variaciones y puede decidir la adopción de medidas (**respuestas**) con el fin de prevenir o de corregir las tendencias negativas detectadas. Lo lógico es que estas medidas se dirijan, con

carácter cautelar, contra el origen del mecanismo de presión, o bien, con carácter corrector, directamente sobre el medio afectado. Como consecuencia de estas actuaciones se supone, o espera, una mejoría del estado del medio ambiente. Esta metodología, que sigue una relación causal lineal entre las actividades y el ambiente, aparentemente lógica es considerada simplista, por ocultar aspectos complejos e interconexiones de difícil evaluación.

Son **indicadores de presión** aquellos relacionados con actividades humanas sobre el medio ambiente. Estos indicadores están estrechamente relacionados con los patrones de producción y consumo, como son los indicadores de emisión de sustancias contaminantes o los del uso de los recursos naturales. Entre los indicadores del banco público, por ejemplo, la "presión urbana en el territorio", que se expresa como hab/km^2, es un indicador de presión directa, y el "número de turistas extranjeros por habitante", que se expresa como turista/hab, es un indicador de presión indirecta. Los indicadores de presión se consiguen de bases de datos de seguimiento socioeconómico y medioambiental, y por ello son un punto de partida de consideraciones políticas.



Figura 1.6. Esquema del marco de referencia PER.

Los **indicadores de estado** informan de la calidad del medio ambiente en relación con las presiones recibidas y de la calidad y cantidad de recursos naturales. Estos indicadores han sido diseñados para informar de la situación del medio ambiente y de su evolución a lo largo del tiempo como, por ejemplo, el indicador de "calidad de las aguas de baño continentales".

Los **indicadores de *respuesta*** muestran la acción de la sociedad para mantener recursos naturales o corregir daños. Se refieren a las acciones y respuestas, tanto individuales como colectivas (por ej. El indicador "impuestos ambientales") Las respuestas deberían estar diseñadas para actuar sobre las *presiones* (por ej. "agricultura ecológica") o el resultado sobre el *estado* (por ej. "calidad de las aguas de baño marinas") y dar como resultado una modificación en los indicadores de estado.

1.4.2.2. Marco de referencia FPEIR

Es una derivación del modelo PER que Eurostat ha extendido, como base de su programa de trabajo. El modelo se basa en la idea de que las actividades antropogénicas *impactan* en el ambiente y que estos impactos ambientales adversos inducen a los humanos a restringir o controlar los factores, *fuerzas motrices*, que afectan a alguna fase del sistema. Los desarrollos sociales y económicos son fuerzas motrices que ejercen *presión* en el ambiente, producen cambios ambientales y sociales que conducen a *impactos* en ecosistemas, en las condiciones de vida de un entorno, produciendo con más o menos rapidez una *respuesta* en la sociedad.



Figura 1.7. Esquema del marco de referencia FPEIR.

Este modelo introduce, por tanto, dos nuevos conceptos: la fuerza motriz y el impacto. La fuerza motriz o impulsora de los cambios medioambientales (negativos) que procede de la actividad humana en diversos sectores como: la agricultura, la industria, la energía, el turismo, los transportes y los hogares, entre otros. Son, por tanto, indicadores de presión indirecta. Mientras que los indicadores de impacto nos muestran el efecto por los cambios producidos sobre la salud o sobre los ecosistemas (ej. desertización).

1.4.3. Índices de calidad

Los índices de calidad se estructuran como suma de las influencias de los indicadores del sujeto a evaluar. El índice de calidad general del agua **ICG**[2], se define por la ecuación [1.8] donde n es el número de parámetros que intervienen, λ_i son las medidas de variables o parámetros analizados, F1 y F2 dos diferentes tipos de funciones que caracterizan la influencia de cada parámetro según el uso previsto para las aguas.

$$ICG = \sum_{i=1}^{n} \left[F_1(\lambda_i)\right] \cdot \left[F_2(\lambda_{in})\right] = \sum_{i}^{n} Q_i P_i \qquad [1.8]$$

donde F_i son funciones de equivalencia que transforman los resultados analíticos de la muestra (pH, conductividad, etc.) en valores adimensionales $F_1(\lambda_i) \equiv Q_i$. De este modo se traducen medidas dimensionales en números adimensionales de 0-100 que indican la calidad del agua respecto al parámetro. Si algún valor Q_i resultase nulo para un determinado parámetro, el agua es rechazada independientemente del resto de los datos.

Surge la necesidad de ponderar, en cierto modo, la influencia de los diferentes parámetros, lo que corresponde a la función $P_i \equiv F_2(\lambda_{in})$. La función F_2 depende tanto del tipo de variables que se han seleccionado, como del número de ellas que intervienen en el sumatorio, que es diferente según el uso al que esté dedicada el agua y, por tanto, su índice se estima según las siguientes reglas:

[2] Indice de Calidad General (ICG) 1981.(MAPAMA)

— A cada variable que interviene λ_{in} se le asigna un coeficiente "a", sus valores están entre 1 (más importante) a 4 (poco significativo).

— P_i se estima según la expresión $P_i = (1/a_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n} (1/a_i)$;

Con ello se cumple que la suma de los coeficientes de ponderación P_i sea la unidad y que ICG sea igual o menor que 100.

En la calidad de las aguas el índice varía entre 0, para el agua contaminada, y 100, para agua prácticamente limpia (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Calidad del agua [3]

Calidad del agua	**ICG agua**
Muy buena	entre 85 y 100
Buena	entre 75 y 85
Utilizable	entre 65 y 75
Mala	entre 50 y 65
Pésima	menor que 50

El índice de calidad del aire se ha venido estableciendo desde la Directiva Marco Europea 96/62/CE, que ha sido modificada y perfeccionada en varias ocasiones. El índice de calidad del aire en una determinada zona se estableció en función de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos: partículas en suspensión (PM10), dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono. Posteriormente, se han publicado normativas específicas que han introducido otros componentes, como la Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa o la Directiva 2004/107/CE, e introducen mejoras para la evaluación de la calidad del aire ambiente como la directiva Directiva 2015/1480/CE.

[3] En España, el sistema automático de información de la calidad de las aguas (SAICA) ejerce una labor de control y vigilancia sobre la calidad de las aguas continentales, recogiendo los datos en tiempo real que les proporcionan las distintas estaciones de muestreo de cada cuenca hidrográfica

Tabla 1.6. Calidad del aire

Calidad del aire	**ICG aire**
Buena	entre 0 y 50
Admisible	entre 50 y 100
Mala	entre 101 y 150
Muy mala	Mayor de 150

Para calcular el (ICA) el aire se asigna el valor 0 cuando la concentración de contaminante es nula, y el valor 100 cuando la concentración coincide con el valor límite fijado en las Directivas de la UE, interpolando un valor del contaminante entre límites se obtiene un índice entre 0 y 100. Se calcula el índice para cada analizador de cada estación de control de manera que el índice de calidad de aire de una estación será el caso peor de todos sus datos, y el índice de calidad del aire global para todas las estaciones será el caso peor medido entre todas las estaciones.

Además de la calidad del aire se controla la emisión de contaminantes bajo la Directiva 2001/81/ CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos. Estas directivas tiene como objeto limitar las emisiones de contaminantes, acidificantes, eutrofizantes y de precursores de ozono para reforzar la protección del medio ambiente y de la salud humana frente a los riesgos de los efectos nocivos de los mismos , y avanzar hacia el objetivo a largo plazo de no superar las cargas y los niveles críticos y de proteger de forma eficaz a toda la población frente a los riesgos conocidos para la salud que se derivan de la contaminación atmosférica mediante la fijación de techos nacionales de emisión.

La directiva se aplica a todas las fuentes resultantes de actividades humanas de los siguientes contaminantes: amoniaco (NH_3); óxidos de nitrógeno (NO_x); compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMCOV o COVDM) y dióxido de azufre (SO_2). y establece unos **techos nacionales de emisión** (la cantidad máxima de una sustancia expresada en kt (Gg) que puede emitir un Estado miembro en un año civil), para el año 2010 para los contaminantes mencionados y en particular, para el caso de España, estos techos son los siguientes:

Techo 2010(en Gg): NO_x 847; NMCOV 662; SO_2 746; NH_3 353.

Para instar al cumplimiento de los techos, la directiva obliga a los Estados miembros a elaborar unos **programas nacionales de reducción progresiva de las emisiones**, que deben incluir información sobre las políticas y medidas adoptadas o previstas, así como estimaciones cuantificadas del efecto de esas políticas y medidas sobre las emisiones de contaminantes en 2010. España elaboró en el año 2003 su primer Programa Nacional, actualizados y revisados en la ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental y el II Programa Nacional de Reducción de Emisiones (2009).

Respecto al suelo, en primer lugar, hay que hacer una revisión del concepto de calidad del suelo "una cualidad compleja del suelo que actúa de manera distinta en su influencia sobre la sostenibilidad del suelo para un tipo específico de uso", según la FAO. La formulación de índices de calidad del suelo se ha realizado de modo menos intenso que los estudios sobre agua y aire. En Europa el *Sixth Environmental Action Programme* encarga a la Comisión Europea la preparación de Una Estrategia Temática para la Protección del Suelo (European Commission 22.09.2006). De ella han surgido una serie de documentos[4] que presentan tres índices: el **índice de calidad** que manifiesta la capacidad del suelo para mantener los ecosistemas y los servicios sociales; el **índice de riesgo**, indica el nivel de riesgo al que está sometido el suelo frente a las causas de degradación; y el **índice de sostenibilidad** como medida comparativa de la calidad del suelo a través de un gradiente de tensión.

El índice de calidad tiene una función semejante a los correspondientes al agua o al aire:

$$ICS = \sum_{i}^{n} Q_i P_i \qquad [1.9]$$

En este caso Q_i normalizado es el cociente entre la medida del parámetro y un valor máximo elegido, de manera que cuanto mayor sea el parámetro más calidad tiene, o se divide por el valor menor elegido, si la idea es que el menor valor es el

[4] Soil Quality and Sustainability Evaluation an Integrated Approach to Support Soil-Related Policies of the European Union. A Joint Research Centre POSITION PAPERG. Tóth, V. Stolbovoy, L. Montanarella. Institute for Environment and Sustainability 2007

más adecuado. En cuanto al peso P_i, se da un cierto valor a cada parámetro de acuerdo a su influencia, como se ha indicado en el ICA, bien entendido que la suma de las P_i debe ser la unidad.

En España, el Real Decreto 9/2005 "por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados" establece el uso de indicadores e índices; hay que tener en cuenta que la calidad del suelo se establece desde puntos de vista diferentes, desde la bondad para el uso agrícola al rechazo a cualquier uso por su contaminación, hasta la clasificación de suelo agrícola, urbanizable, etc. Al decreto se acompaña la Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005, de 14 de enero, que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

1.5. BIBLIOGRAFÍA

1. Perry, R. H., Green, D. W. "**Perry´s *Chemical Engineers´ Handbook***". Eds. McGraw-Hill, 1997
2. "**Système International d'Unités, 8th edition (2006)**". Bureau International des Poids et Measures.
3. "**Banco Público de Indicadores Ambientales (BPIA)**". Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medioambiente.