Taller de simulació medi–ambiental

Difusió de contaminants al medi aquàtic

Juan Carlos Cañadas* i Jordi Sellarès†

12 de febrer de 2002

Juan Carlos Cañadas
Barcelona (1963)
Doctor en Física
Dept. de Física i Eng. Nuclear (ETSEIT)
Universitat Politècnica de Catalunya

Jordi Sellarès
Barcelona (1969)
Doctor en Física
Dept. de Física i Eng. Nuclear (EUETIT)
Universitat Politècnica de Catalunya

*juan.carlos.canadas@upc.es
†jordi.sellares@upc.es

Índex

Presentació

L'aigua a la biosfera transporta matèria i energia i ofereix suport al desenvolupament de la vida, de la qual n'es un component essencial. La importància de l'aigua no es pot sobrevalorar. Per aquest motiu és molt interessant poder preveure quin serà l'impacte d'un determinat ús de l'aigua sobre el medi aquàtic i quin serà l'efecte sobre els altres usos de l'aigua.

En aquesta unitat mirarem d'estimar quina relació hi ha entre les concentracions de contaminants en el medi aquàtic i la intensitat dels abocaments, mitjançant models senzills. Es comentarà breument quines són les principals vies de dispersió i es discutirà el rang de validessa dels resultats dels models emprats.

Objectius

- Descriure breument el sistema d'aigües superficials.
- Exposar models senzills per predir la concentració de contaminants a un sistema aquàtic.

Esquema

1. El sistema d'aigües superficials
   (a) El cicle hidrològic
   (b) Usos de l'aigua
      i. Medi natural
      ii. Font de subministrament
      iii. Medi receptor
      iv. Generació d'energia
   (c) La qualitat de l'aigua (paràmetres)
      i. Físics
      ii. Químics
      iii. Biològics
2. Concentració dels contaminants a l'aigua
   (a) Rius
   (b) Llacs, estuaris i mars
3. Vies de dispersió dels contaminants
   (a) Transport pel corrent
   (b) Sedimentació
4. Rang de validessa del model
   (a) Interrelació amb el medi
   (b) Homogeneització de les concentracions
   (c) Variació dels cabals i dels abocaments
   (d) Interacció amb els sediments

1 El sistema d'aigües superficials

1.1 El cicle hidrològic

Quan parlem d'aigües superficials (veure glossari) en realitat ens referim a una part del cicle de l'aigua (Fig. 1) a la troposfera (veure glossari).

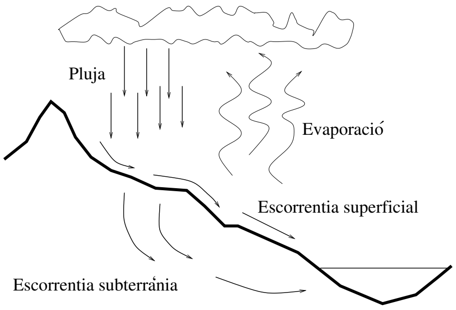

Figura 1: El cicle de l'aigua

De fet, es tracta de la part més important del cicle de l'aigua, doncs hi tenen lloc una gran quantitat de processos geològics (arrossegament de materials), químics (transport de substàncies dissoltes) i biològics (síntesi de matèria orgànica, flux de nutrients, circulació de residus).

> **Curiositat:** L'aigua és un dels composts més abundants del planeta, ja que constitueix un 7% de la seva massa total. No obstant, tan sols el 0.7% d'aquesta aigua correspon a aigua dolça en estat líquid

Podem dir que la característica més notable de les aigües superficials és la seva capacitat per transportar matèria i energia. Aquesta capacitat confereix a l'aigua un paper determinant en l'estat dels ecosistemes terrestres i aquàtics.

1.2 Usos de l'aigua

L'aigua és un medi natural que té una forta activitat. A més, interacciona amb el territori que té al seu voltant (riberes i zones inundables). La preservació de la flora i de la fauna que viu al medi aquàtic o al seu voltant requereix un cabal mínim d'aigua, que tingui un cert nivell de qualitat.

Les aigües superficials són, a més, una font de subministrament per a subministrament públic, reg agrícola, activitats industrials, activitats ramaderes o altres usos. En aquest sentit, cada activitat té les seves exigències, tant en quantitat com en qualitat.

Curiositat: El volum d'aigua considerat mínim per poder viure és de 10 l/hab dia, incloent consum i higiene. El consum a les grans ciutats situa entre els 150 i 200 l/hab dia, tenint en compte tan sols el consum domèstic

Estretament lligat a l'ús anterior, tenim l'ús com a receptor d'altres fluxos hídrics. Sovint s'utilitza l'aigua com a medi físic adequat per transportar i desfer-se de residus. Aquesta utilització comporta un deteriorament de la qualitat de les aigües.

L'aigua s'utilitza per generar energia hidroelèctrica, mitjançant la construcció d'embassaments, o energia tèrmica, utilitzant l'aigua com a font freda. En ambdos casos es poden produir efectes negatius, ja sigui per la modificació del cabal en el primer cas o per l'augment de la temperatura en el segon.

En aquest moment, ja pots fer l'activitat 1.

Curiositat: La disponibilitat d'aigua a l'Estat Espanyol és de 3000 m^3 per habitant, per sobre dels 2500 m^3 per habitant de la mitjana europea. La gran variabilitat espaial i temporal fa, però, que a moltes zones hi hagi escassetat d'aigua

1.3 La qualitat de l'aigua

La contaminació (veure glossari) pot ser tant d'origen natural com antropogènic (veure glossari). En aquest darrer cas, sol estar associada amb l'aportació de substàncies (normalment contingudes en un flux d'aigua) o energia.

La composició de l'aigua varia en el mateix instant en que es precipita en forma de pluja. El diòxid de carboni es dissol a l'aigua de pluja i li dóna una lleugera acidesa. Això fa que, un cop a la superfície, tingui una major capacitat per dissoldre els minerals. El resultat final és un augment de la salinitat de l'aigua.

A la costa mediterrània, predominantment calcàrea, aquest fenòmen produeix aigües dures, amb un gran contingut de calç.

A banda de les sals minerals, altres tipus de substàncies inorgàniques també poden anar a parar a l'aigua, amb resultats diversos.

Els cianurs, els cromats i els metalls pesants tenen un efecte tòxic. Els fosfats i els nitrats, que es troben principalment als adobs, estimulen el creixement biològic i provoquen, per aquest motiu, l'empobriment de l'aigua en oxígen.

L'aport de matèria orgànica també provoca una disminució de l'oxígen disponible a l'aigua. Això es degut a que els organismes que descomposen la matèria orgànica són aerobis (veure glossari) i a que també hi ha processos inorgànics d'oxidació de la matèria orgànica. La matèria inorgànica que en resulta contribueix a deteriorar la qualitat de l'aigua.

Curiositat: Un contaminant no té perquè ser tòxic. La Mayonesa és una substància molt contaminant malgrat no ser tòxica. Si us caduca un pot no el buideu a la pica. És molt millor llençar-lo a les escombreries

La manca d'oxígen és tan sols un primer pas en la pèrdua de qualitat de l'aigua. Els organismes anaerobis, que són els únics que poden viure sense oxígen, emeten nitrògen, àcid sulfhídric i metà. La coloració fosca i l'aparició de males olors és el senyal més evident de la presència d'organismes anaerobis.

Per poder informar de la qualitat de l'aigua d'una manera pràctica, s'han creat indicadors. Aquests indicadors expressen la qualitat de l'aigua en forma de resultat numèric, basant-se en el valor de determinats paràmetres de qualitat.

L'índex ISQA, adoptat per la Generalitat de Catalunya es basa en sis paràmetres: la temperatura, l'oxígen dissolt, la DBO_5 (veure glossari), la DQO (veure glossari), la matèria oxidable i la matèria en suspensió.

A la taula 1 podem veure altres paràmetres emprats per avaluar la qualitat de l'aigua.

Paràmetres físics	*Paràmetres químics*	*Paràmetres biològics*
Temperatura	pH	Bactèries
Olor	Potencial redox	Virus
Sabor	Alcalinitat	Fongs
Color	Acidesa	Microalgues
Terbolesa	Duresa	Plantes
Matèria en suspensió	Clorurs	Animals
Matèria dissolta	Amoníac	
Conductivitat elèctrica	Nitrats	
Radioactivitat	Nitrits	
	Oxigen dissolt	
	Demanda bioquímica d'oxigen (DBO)	
	Demanda química d'oxigen (DQO)	
	Nitrogen Kjeldahl	
	Substàncies orgàniques	

Taula 1: Paràmetres de qualitat de l'aigua

Abans de continuar, pots fer l'activitat 2.

2 Concentració dels contaminants a l'aigua

En aquesta secció estudiarem un model simple per estimar la concentració d'un contaminant a partir de la intensitat de l'abocament.

Fins ara hem vist com la incorporació d'un component (o la modificació de la seva concentració) al sistema de les aigües superficials no tan sols deteriora la qualitat de l'aigua sinó que altera el seu equilibri, provocant canvis addicionals.

Per no complicar excesivament el model, suposarem, en contra del que s'ha dit, que la interacció del contaminant amb el medi que l'envolta és senzilla. Això vol dir que el contaminant es descomposa en altres substàncies que no tenen cap efecte sobre el medi aquàtic. A més, la velocitat a la que es descomposa el contaminant només depen, proporcionalment, de la seva concentració:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\lambda C(t), \tag{1}$$

on λ és una constant de proporcionalitat, característica del contaminant. Les dimensions de λ són de $[T]^{-1}$. Quan λ és molt petita ens trobem davant d'una substància molt estable. Una λ gran és pròpia de materials que es descomponen rapidament.

Les unitats de la concentració depenen del contaminant. La concentració és una quantitat dividida entre un volum. El volum es pot donar en litres (l) o metres cúbics (m^3). La quantitat de contaminant és dóna en unitats de massa si és un producte químic o en unitats d'activitat radioactiva si és un radionúclid. En el primer cas podem utilitzar grams (g), miligrams (mg) o qualsevol altre multiple o submultiple del kilogram (kg). En el segon cas podem utilitzar els bequerels (Bq) que equivalen a una desintegració radioactiva per segon.

Resolvent l'Eq. 1 es veu que la concentració té una dependència exponencial amb el temps

$$C(t) = C(0)\, e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

Aquestes premises són certes en el cas particular dels radionúclids, però també poden servir per caracteritzar certs contaminants químics.

Per suposat, també són vàlides en el cas de contaminants extremadament estables, siguin del tipus que siguin. En aquest cas $\lambda = 0$.

També suposarem que el contaminant es difon de manera homogenea immediatament.

Finalment, considerarem que no hi ha interacció amb els sediments i que, per tant, tot el contaminant prové del flux d'aigua i és difon de la mateixa manera.

2.1 Càlcul de la concentració a rius

Segons les premises que hem assenyalat abans, la concentració d'un contaminant a un riu és

$$C = \frac{T}{R}\, e^{-\lambda t_p}, \tag{3}$$

on T és la intensitat de l'abocament, R és el cabal del riu i t_p el temps que triga l'abocament en arribar al punt del riu a on volem predir la concentració (veure la Fig. 2). Aquesta equació es dedueix, tret del factor exponencial, amb un simple argument de proporcionalitat.

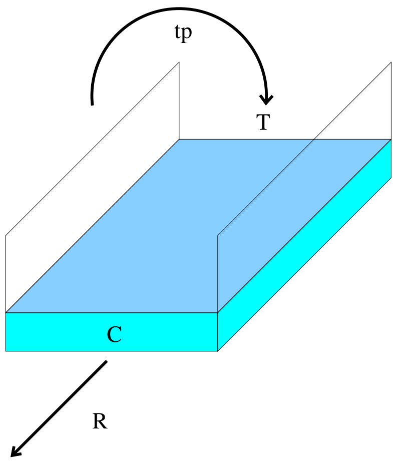

Figura 2: Paràmetres per calcular la concentració d'un contaminant a un riu

Les unitats de T són de quantitat de contaminant per unitat de temps. R és un volum per unitat de temps.

Quan t_p és molt més petit que λ, l'exponencial és gairebé igual a 1.

En el cas que T i R siguin variables en el temps (la qual cosa es gairebé segura) l'Eq. 3 serà vàlida tan sols si el temps que triga l'aigua en arribar a un determinat punt és molt més petit que l'escala típica de variació de T i R.

2.2 Càlcul de la concentració a llacs, estuaris i mars

En el cas d'un llac, s'ha de treballar una mica més per poder obtenir la concentració de contaminant. Considerarem un llac com el de la Fig. 3, amb un abocament d'intensitat

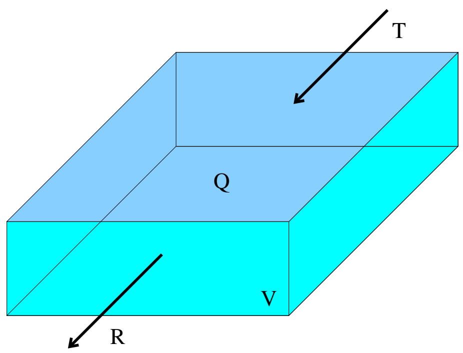

Figura 3: Paràmetres per calcular la concentració d'un contaminant a un llac

T, un volum V i un cabal de sortida R. Si anomenem Q a la quantitat de contaminant i C a la seva concentració, està clar que la relació entre ambdues magnituds vindrà donada per

$$C = \frac{Q}{V}. \tag{4}$$

Pensem ara per quins motius varia la quantitat de contaminant Q. Per una banda tenim una variació deguda a l'abocament

$$\frac{dQ_a}{dt} = T, \tag{5}$$

una altra deguda a la quantitat de contaminant que es perd a travès del flux de sortida

$$\frac{dQ_f}{dt} = -CR = -\frac{Q}{V}R \tag{6}$$

i una altra deguda a la descomposició del contaminant

$$\frac{dQ_d}{dt} = -Q\lambda. \tag{7}$$

Sumant aquestes equacions terme a terme obtenim la següent equació diferencial

$$\frac{dQ}{dt} = T - Q\left(\lambda + \frac{R}{V}\right), \tag{8}$$

la solució de la qual és

$$Q = \frac{T}{\lambda + R/V} \tag{9}$$

o aplicant l'Eq. 4, si es prefereix en termes de la concentració,

$$C = \frac{T}{V}\frac{1}{\lambda + R/V}. \tag{10}$$

Per fixar idees, fes les activitat 3, 4 i 5.

2.3 Vies de dispersió dels contaminants

La principal via de dispersió, i l'única que hem tingut en compte, és la del moviment de les aigües. Una altra via important és la transferència als sediments. Els sediments poden absorvir una part del material contaminant. A l'inrevés, també és possible el pas de contaminació dels sediments a l'aigua, si hi ha una disminució de la concentració de contaminant al medi aquàtic.

2.4 Rang de validessa del model

El model que hem presentat és suficient per fer una estimació de les concentracions de contaminant a un medi aquàtic, a partir de la intensitat de l'abocament. No obstant presenta algunes limitacions.

En primer lloc, no s'ha tingut en compte les repercusions del contaminant a les propietats del medi. La presència d'un contaminant sovint modifica les propietats físiques, químiques i biològiques del medi d'una manera difícil de quantificar. A l'hora, aquest canvi en les propietats del medi pot afectar la concentració del propi contaminant. En aquest sentit, l'Eq. 1 és una simplicació radical, vàlida en comptades ocasions (radionúclids, substàncies molt estables químicament, concentracions baixes, ...).

Una altra limitació és que parteix de que la concentració de contaminant és homogenea. En un riu, aquesta condició no es raonable a distàncies curtes del punt d'abocament. En un llac sovint es dóna el fenòmen de l'estratificació, on el material dificilment pot passar d'una capa a una altra. Des d'un punt de vista matemàtic caldrà considerar que tenim varis compartiments i modelitzar la tranferència de matèria entre aquests compartiments.

De la mateixa manera, s'ha considerat que els abocaments i els cabals són constants en el temps (homogeneitat temporal). Alguna hipòtesi addicional i una major complexitat de les equacions diferencials ens permetrien anar més enllà en aquest punt.

Finalment, una limitació molt important és que no hem tingut en compte la interacció amb els sediments. Els sediments poden emmagatzemar contaminant i convertir-se en una font d'aquest material un cop s'hagi aturat l'abocament.

Resum

En aquesta unitat hem presentat un model senzill de la propagació de contaminants al medi aquàtic. S'han enumerat els principals usos del sistema d'aigües superficials, que resulta ser tan sols una fase, de gran importància, del cicle de l'aigua.

La modificació de les propietats de l'aigua, degut a la introducció d'una substància aliena a la seva composició habitual o a la forta variació en la concentració d'un dels seus components habituals, comporta un efecte en cadena que produeix sovint canvis addicionals — fins i tot pel que fa a la pròpia substància que ha originat el canvi —. Per aquest motiu les consideracions sobre la concentració d'una certa substància sense tenir en compte el medi en el seu conjunt s'han de fer amb precaució.

Els radionúclids són un tipus de contaminant que ens ofereixen la oportunitat de treballar amb models senzills. No afecten de manera visible les propietats del medi i la seva velocitat de descomposició es independent dels factors ambientals.

El model que s'ha presentat té en compte els efectes més importants. Es pot millorar modelitzant de manera més acurada el moviment del contaminant entre les diferents zones del medi aquàtic i entre el medi aquàtic i les zones adjacents (sediments i riberes). També s'hauria d'extendre pel cas en que els abocaments i els cabals no són constants. Incloure la modificació de les propietats del medi degudes a la presència del contaminant implica un grau de dificultat molt superior.

Glossari

aerobis que el seu metabolisme consumeix oxígen. Tots els èssers eucarionts (que tenen cel.lules amb nucli) i un bon nombre de procarionts (són una cel.lula sense nucli) són aerobis. En canvi, els èssers anaerobis (per exemple els llevats) no necessiten oxígen i poden utilitzar altres espècies químiques (per exemple, l'ió nitrat o l'ió sulfat) com acceptors d'electrons.

aigües superficials són les que es troben als llacs, rius o, senzillament, les que s'escolen per sobre la superfície.

antropogènic generat per l'home.

contaminació modificació de les condicions físiques, químiques o biològiques d'una aigua supeficial amb consequències desfavorables per a algun dels essers vius que la utilitzen.

***DBO*$_5$** acrònim de "demanda biològica d'oxígen".

DQO acrònim de "demanda química d'oxígen".

troposfera és la capa de la terra compresa entre la superfície i 11 km d'alçada. És a on té lloc gairebé la totalitat dels fenòmens meteorològics.

Referències addicionals

- **Josep Lluís Font:** *Dispersión de contaminantes en la biosfera. Modelos dosimétricos.* CIEMAT, Madrid (1990).

  En aquest llibre trobareu el model desenvolupat en aquesta unitat, juntament amb alguns perfeccionaments. Està orientat principalment cap a la dispersió de radionúclids però el seu contingut pot ser d'interès en l'estudi d'altres substàncies contaminants.

Activitats

1. Segons l'esquema que hem vist a la subsecció 1.2, com classificaries l'ús lúdic (bany, pesca, turisme fluvial, ...) dels rius.

2. Busca informació sobre el diòxid de sofre (SO_2). Comenta breument on s'emet i com reacciona amb l'agua de pluja. Creus que intensifica o que disminueix l'efecte del diòxid de carboni (CO_2)?

3. Considera el cas de la Fig. 3, però suposant que per comptes d'un abocament T hi va a parar un flux d'aigua de cabal R_0 i amb una concentració de contaminant C_0. Com caldria expressar les Eqs. 9 i 10?

4. Tornem a l'Eq. 10. Troba una expressió per a C/C_0 i digues quines propietats matemàtiques li trobes (per exemple, si és positiva, negativa, creixent, decreixent, si té cotes superiors o inferiors, ...). Explica qualitativament com varia en funció de λ i en funció de V si la resta de paràmetres adopten valors arbitraris.

5. Basant-te en el que has vist en la unitat sobre propagació de contaminants al sòl, amplia el model del llac, per tenir en compte l'estratificació, utilitzant un model de capses amb fluxos proporcionals als seus continguts.

6. Realitza les activitats descrites al guió de pràctiques corresponent a aquesta unitat.

Exercicis d'autocomprovació

1. Quin dels següents efectes negatius no es degut a l'ús de l'aigua per generar energia?
   (a) La inundació de terrenys pels embassaments
   (b) L'augment de la temperatura de l'aigua dels rius
   (c) L'acidesa de la pluja
   (d) La variació dels cabals

2. Quin dels següents contaminants es caracteritza pel seu efecte tòxic?
   (a) Els nitrats
   (b) Els cromats
   (c) La matèria orgànica
   (d) Les sals minerals

3. Quin dels següents organismes és anaerobi?
   (a) *Canis Familiaris*
   (b) Tripanosoma
   (c) Ferment lacti
   (d) Ameba

4. Les unitats de la intensitat d'abocament T poden ser
   (a) Bq/s
   (b) Bq/m^2
   (c) $Bq \cdot s$
   (d) $Bq \cdot m/s$

Solucions dels exercicis d'autocomprovació

1. (c) 2. (b) 3. (c) 4. (a)