

NUTRIENTES Y CICLOS  
BIOGEOQUIMICOS

por

Cliff J. Kirchmer, Ph.D.  
Asesor en Química del Agua y Laboratorios  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria  
y Ciencias del Ambiente (CEPIS)

## NUTRIENTES

### I. Nitrógeno

A. Las principales formas de nitrógeno en el agua incluyen:

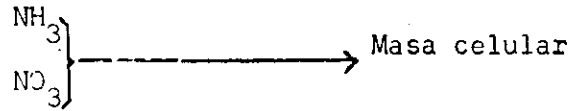
1. Especies oxidadas
  - a. nitrito
  - b. nitrato
2. Especies reducidas
  - a. amoniaco
  - b. nitrógeno molecular
3. Especies orgánicas
  - a. aminos
  - b. amidas
  - c. compuestos heterocíclicos

B. El ciclo de nitrógeno demuestra cómo las formas inorgánicas y orgánicas de nitrógeno se transforman, sin que alguna forma se acumule en exceso. (Ver figuras 1-4).

1. La figura 1 ilustra el ciclo de nitrógeno tal como ocurre en el ambiente.
2. La figura 2 ilustra en forma más esquemática el ciclo de nitrógeno.
3. La figura 3 ilustra las principales transformaciones moleculares en el ciclo de nitrógeno. (Nótese el papel central que juega el amoniaco como enlace entre las fases orgánicas e inorgánicas).
4. La figura 4 ilustra las reacciones del ciclo de nitrógeno en un lago modelo estratificado.

5. Asimilación de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3^-$

- a. Son las principales reacciones en la conversión de nitrógeno inorgánico a nitrógeno orgánico (formas celulares).



- b. Agentes de la asimilación

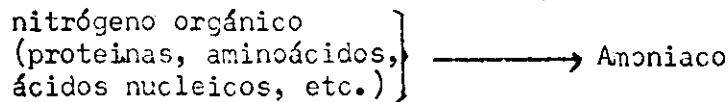
Fitoplancton (Algas)

Macrofitos

- c.  $\text{NH}_3$  ( $\text{NH}_4^+$ ) se asimila más fácilmente que  $\text{NO}_3^-$ .

6. Amonificación

- a. Es el proceso contrario de asimilación

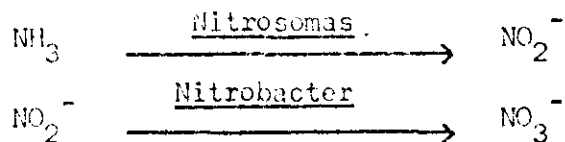


- b. Es un proceso complicado que involucra varios mecanismos:

- (1) Descomposición bacteriana de nitrógeno orgánico soluble y detritus orgánico.
- (2) Excreción de amoníaco y aminoácidos por zooplancton, que se alimentan de fitoplanctos y detritus.
- (3) Autólisis directo después de la muerte de la célula.

7. Nitrificación

- a. Es la oxidación aeróbica de amoníaco a nitrito y nitrato por bacterias autotróficas



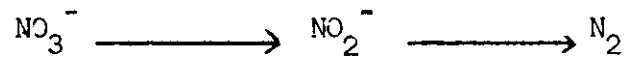
b. Otros agentes de conversión

Bacterias heterotróficas  
Actinomicetos  
Hongos

- c. Este proceso es importante porque convierte amoníaco en nitrato, una forma más estable de nitrógeno.
- d. Puede originar una disminución significativa de oxígeno en los ríos.  
(Requiere 4.5 mg O<sub>2</sub> per mg de amoníaco oxidado).

8. Desnitrificación

- a. Es la conversión de nitrato en nitrógeno por bacterias facultativas y anaeróbicas en la ausencia de oxígeno.



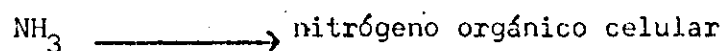
- b. Da origen a pérdida de nitrógeno y, por lo tanto, puede ser importante en el balance de nitrógeno (p.ej. en lagos y suelos sujetos periódicamente a condiciones anaeróbicas).
- c. Reacción que puede ser aprovechada en plantas de tratamiento terciario para remoción de nitrógeno (remoción en orden de 60-90%).
- d. La reducción de nitrato puede dar origen también a amoníaco y nitrógeno orgánico.

9. Fijación del nitrógeno

- a. Consiste en la reducción de nitrógeno a amoníaco.



- b. Es el proceso que ha sido objeto de mayores estudios.
- c. Muchas veces ocurre junto con asimilación de NH<sub>3</sub>.



- d. Los siguientes organismos actúan como agentes de fijación:
  - algas verdeazules (muy importante en lagos)
  - bacterias fotosintéticas
  - bacterias aeróbicas (p.ej. Azotobacter)
  - bacterias anaeróbicas (p.ej. Clostridium)
  - bacterias facultativas
  - nódulos de plantas leguminosas (p.ej. Podocarpus)  
y no-leguminosas (p.ej. Alnus sp.)
- e. La enzima nitrogenasa interviene en la fijación.
- f. Las altas tasas de fijación de nitrógeno tienen relación recíproca con el crecimiento excesivo de algas verdeazules, principalmente Anabaena, Gloeotrichia, y Aphanizomenon en lagos, Trichodesmium en aguas marinas subtropicales y Calothrix en aguas marinas poco profundas en climas templados.
- g. La nitrogenasa no puede distinguirse entre acetileno ( $H-C \equiv C-H$ ) y nitrógeno ( $N \equiv N$ ) y reduce acetileno a etileno, un producto que puede ser analizado fácilmente por cromatografía de gas. Este hecho es utilizado para medir indirectamente las tasas de fijación de nitrógeno.
- h. El molibdenum es esencial en la fijación de nitrógeno.

C. Importancia del nitrógeno en la calidad del agua.

- 1. Como indicador de la polución por aguas residuales domésticas;
- 2. Es vital para la vida acuática;
  - a. Nutriente limitante
  - b. Eutroficación
- 3. Un alto contenido de  $NO_3^-$  y/o  $NO_2^-$  puede causar methemoglobinemia;
- 4. Una alta concentración de  $NO_2^-$  indica una situación inestable;
- 5.  $NH_3$  tiene DBO;
- 6.  $NH_3$  tiene demanda de cloro,

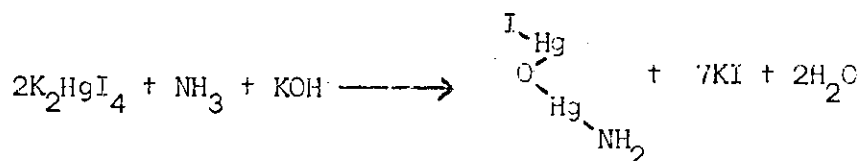
7. Las aguas residuales domésticas demuestran transformaciones típicas de nitrógeno con el tiempo. (Ver figura 5).

D. Análisis de las formas del nitrógeno.

1. Amoniaco

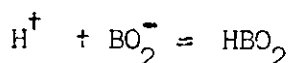
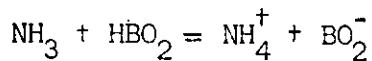
a. Método de destilación. Se amortigua la muestra a un pH de 9.5 con un amortiguador de borato a fin de disminuir la hidrólisis de los cianatos y de los compuestos de nitrógeno orgánico. Luego es destilada en una solución de ácido bórico. El amoniaco en el destilado puede determinarse por cualquiera de las dos formas siguientes:

- (1) Colorimétricamente por nesslerización. (Rango de 0.05 - 1.0 mg/l NH<sub>3</sub>-N/l).



coloide marrón amarillento

- (2) Por titulación con ácido sulfúrico estándar utilizando un indicador mezclado. (Rango de 1.0 - 25 mg/l).



- b. Método de electrodo específico. (Rango de 0.03-1400 mg NH<sub>3</sub>-N/l).

El color y la turbiedad no tienen efecto en la medición por lo que la destilación no es necesaria.

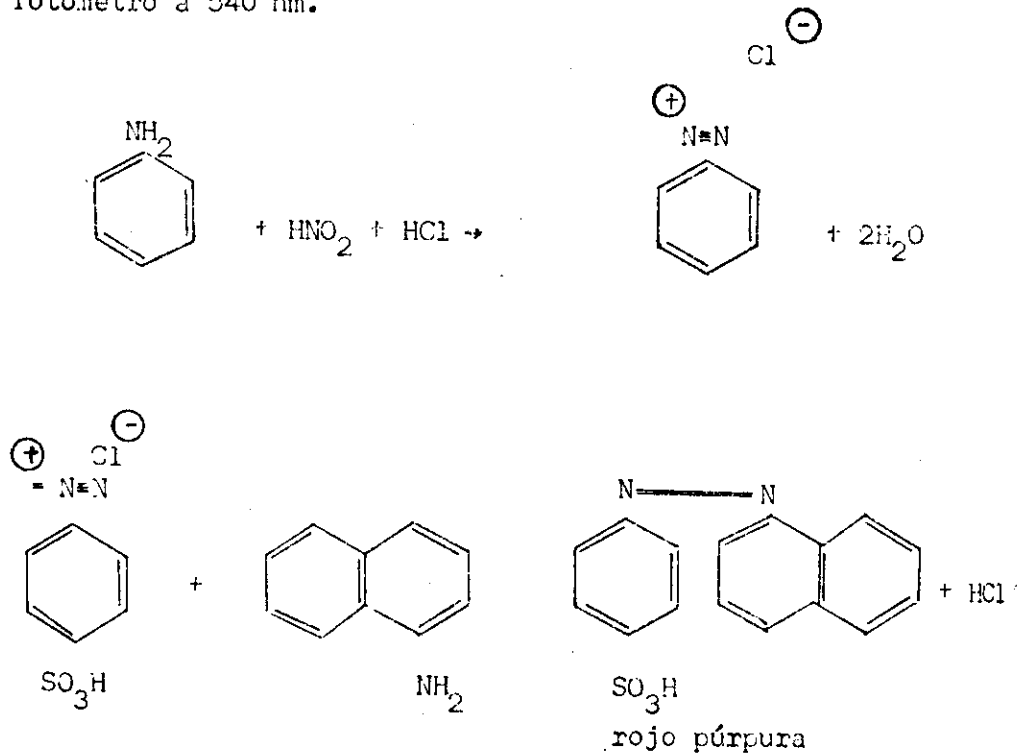
2. Nitrógeno Kjeldahl Total

- a. Incluye los compuestos orgánicos de mayor importancia además del amoniaco.

b. La muestra es calentada en presencia de ácido sulfúrico concentrado,  $K_2SO_4$ , y  $HgSO_4$  y evaporada hasta que se obtengan vapores de  $SO_3$  y la solución se torne incolora o de color amarillo pálido. El residuo es enfriado, diluido y tratado con una solución de tiosulfato en medio básico. El amoniaco es destilado y determinado por el método de destilación o el método del electrodo específico.

3. Nitrito

a. El compuesto diazonio formado por diazotación de sulfanilamida con el nitrito del agua bajo condiciones ácidas se acopla con N-(1-naftil)etilenodiamina para producir un color rojo púrpura que es leído en el espectrofotómetro a 540 nm.

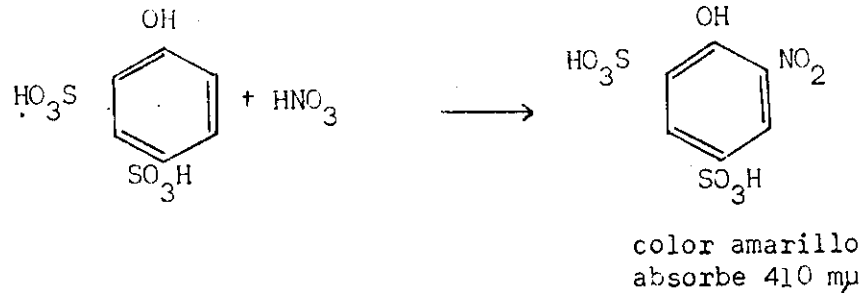


4. Nitrato

a. Método de brucina (el mejor).

Este método se basa en la reacción del ion de nitrato con el sulfato de brucina en una solución de  $13 N H_2SO_4$  a una temperatura de  $100^{\circ}C$ . El color amarillo del compuesto resultante se mide a 410 nm. El control de temperatura durante la formación del color es extremadamente crítico.

b. Método fenoldisulfónico ácido



c. Reducción a nitrito y análisis de nitrito

(1) Agentes reductores - Cadmio  
Zinc

(2) Análisis de nitrito por diazotización

II. FOSFORO

A. Ciclo del fósforo (ver figura 6)

B. Comportamiento químico del fósforo en el agua

1. Principalmente es el ciclo bioquímico
2. Precipitación de hidroxapatita,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ . Es una importante reacción química.
3. La adsorción en arcilla es una importante reacción físico-química.

C. Fuentes principales de fósforo:

1. Rocas sedimentarias
2. Fertilizantes
3. Desperdicios domésticos (3 a 10 mg/lt)
4. Detergentes

5. Lluvia (0.01 a 0.1 mg/lit)
6. Aditivos anticorrosivos (polifosfatos)
7. Aditivos para control de incrustaciones

D. Su importancia en la calidad del agua

1. Papel en la productividad acuática - Eutroficación (i.e. florecimientos de algas)
2. Interfiere con la coagulación (formación de complejos con cationes)

E. Métodos para el análisis de fósforo (ver figura 7).

1. En base a reacciones específicas del ion ortofosfato
2. El pretratamiento es necesario para algunas formas de fósforo.
3. Terminología del fósforo

a. Fósforo (P)- corresponde a todo el fósforo presente en la muestra sin tener en cuenta su forma.

(1) Ortofosfato (P, orto.). Corresponde al fósforo inorgánico  $[(\text{PO}_4)^{-3}]$

(2) Fósforo hidrolizable

(a) (P, hidro) corresponde a los polifosfatos

$[(\text{P}_2\text{O}_7)^{-4}, (\text{P}_3\text{O}_{10})^{-5}, \text{etc.}]$  + algo de fósforo orgánico

(b) Fósforo (P) - Ortofosfato (P, orto) = Fósforo hidrolizable (P, hidro)

(3) Fósforo orgánico (P, org) -

(a) Incluye oxidables orgánicos y algo de fósforo inorgánico

(b) Fósforo (P) - Ortofosfato (P, orto) - Fósforo hidrolizable (P, hidro) = Fósforo orgánico (P,org)

- b. Las formas disueltas de fósforo pueden medirse por filtración a través de filtros de membrana de 0.45 micrones antes de la determinación  
(P-D), [P-D, orto] , [P-D, hidro] , [P-D org]
- c. Pueden calcularse las formas insolubles de fósforo
- d. Las formas de fósforo que se miden más corrientemente son:
  - (1) (P) y (P-D)
  - (2) (P, orto) y (P-D, orto)

4. El hierro alto interfiere en el análisis.

### III OTROS NUTRIENTES DE IMPORTANCIA

A. Carbón. (Ver figura 8, ciclo del carbón).

1. Fuentes

- a.  $\text{CO}_2$  en el aire o el agua
- b.  $\text{HCO}_3^-$  en el agua
- c.  $\text{CO}_3^{=}$  en el agua
- d. Otros compuestos de carbón

2. Efectos de la remoción del carbón en el agua

- a. Disminución del pH
- b. Deposición de  $\text{CaCO}_3$

3. La cantidad de carbón disponible es grande y generalmente no es un factor limitante

B. Azufre. (Ver figura 9, ciclo del azufre).

1. Transformaciones

- a.  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{SO}_4$   
Bacterias del azufre

b.  $\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{S}$  (reducción anaeróbica)

Bacterias de sulfovibriones

c.  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SO}_4$  (oxidantes aeróbicos del azufre)

Bacterias tiobacilos

d. S orgánico  $\rightarrow \text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$

Microorganismos heterotróficos aeróbicos y anaeróbicos respectivamente.

2. Importancia en la calidad del agua

El  $\text{H}_2\text{S}$  que se forma en aguas anaeróbicas causa olor desagradable (huevo podrido).

BIBLIOGRAFIA

- BREZONIK, Patrick L. "Nitrogen Sources and Cycling in Natural Waters"  
U.S. Environmental Protection Agency Ecological Research Series EPA  
660/3-73-002, July 1973
- ODUM, Eugene P. "Ecología". Tercera edición, traducida al español por  
el señor Carlos Gerhard Ottenwaelder. Nueva Editorial Interamericana
- MAN in the living environment. A Report on Global Ecological Problems.  
Published for The Institute of Ecology by The University of Wisconsin  
Press. 1972
- MACKENTHUN, Kenneth M. "Toward a Cleaner Aquatic Environment" U.S.  
Environmental Protection Agency. Stock No. 5501-00573. Superintendent  
of Documents
- STANDARD Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th ed.,  
1971. APHA. AWWA. WPCF
- MANUAL of Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes - U.S.  
Environmental Protection Agency

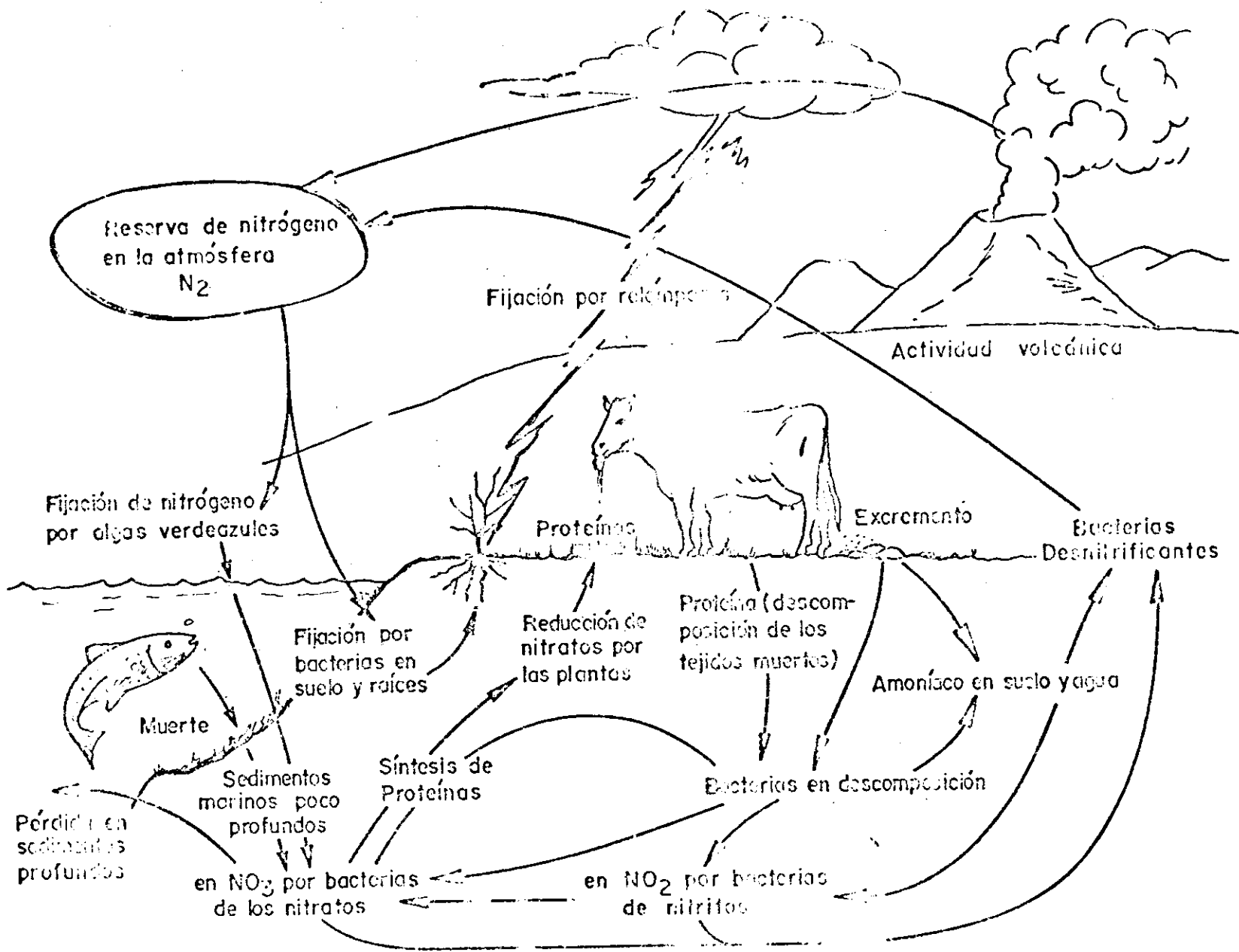


Figura 1 - CICLO DEL NITROGENO

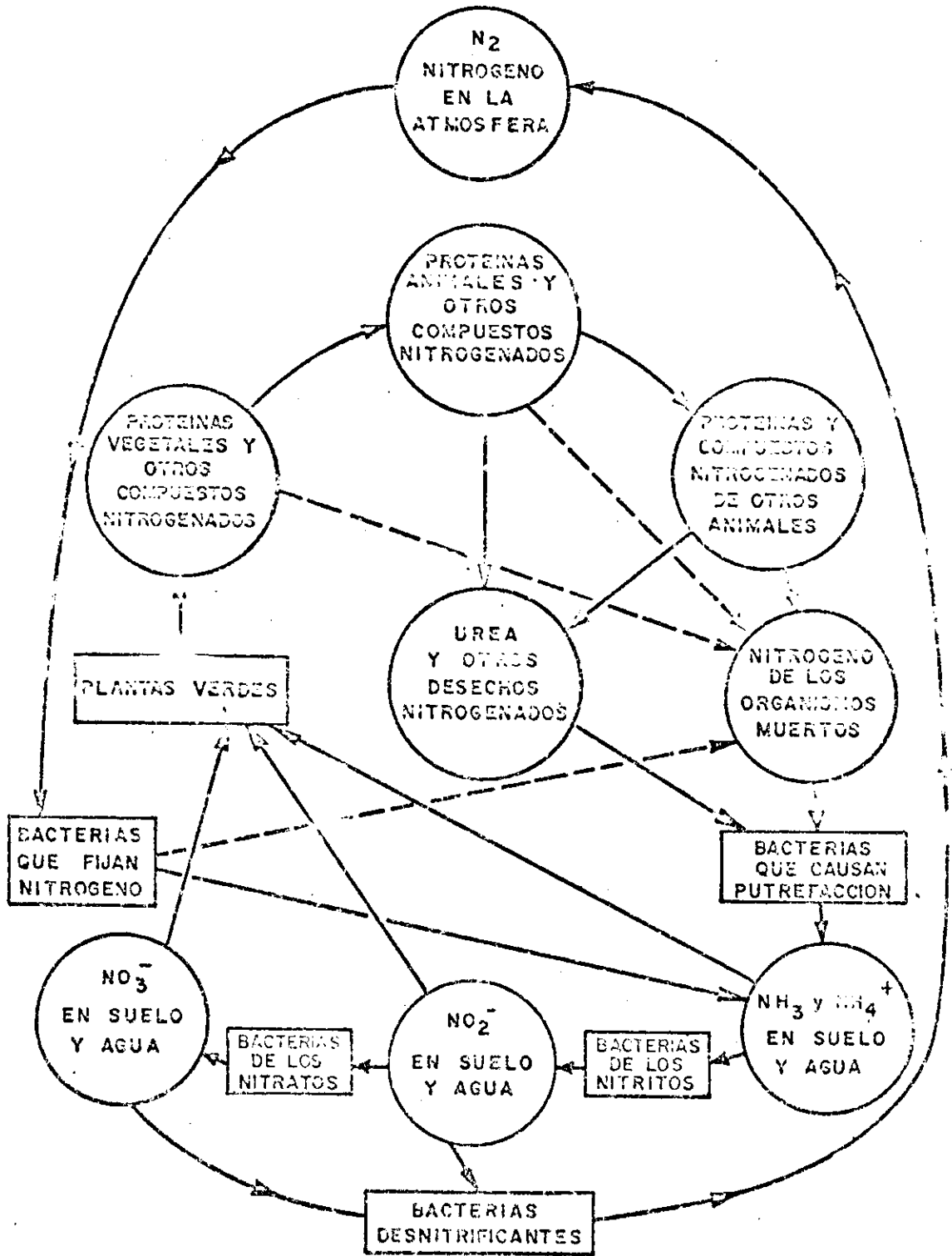


Figura 2  
CICLO NATURAL DEL NITROGENO

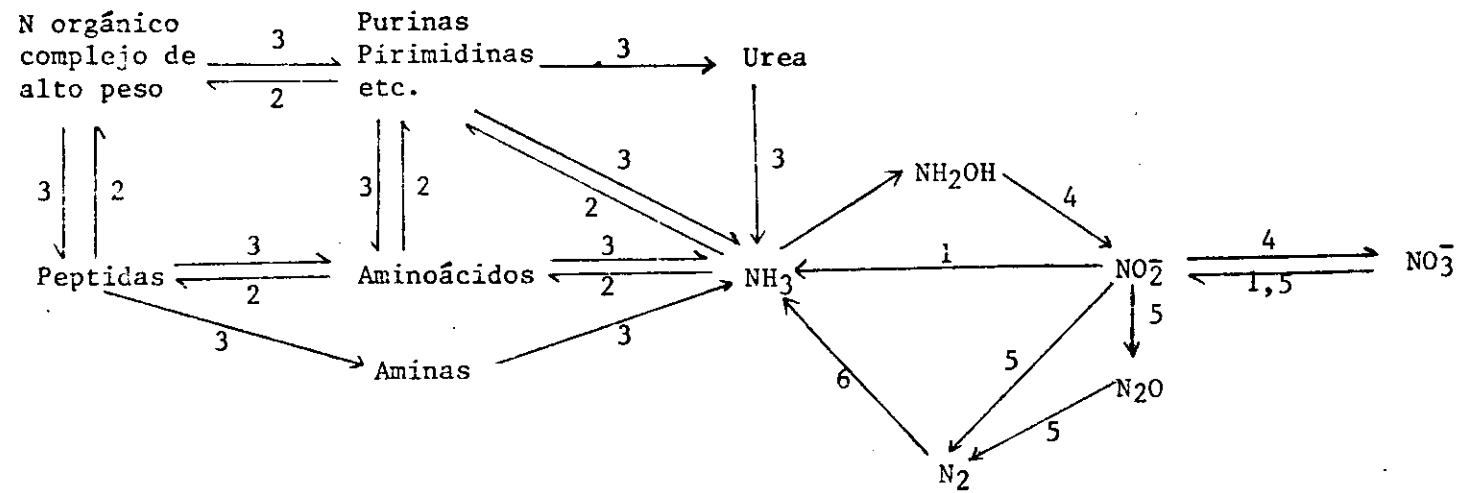
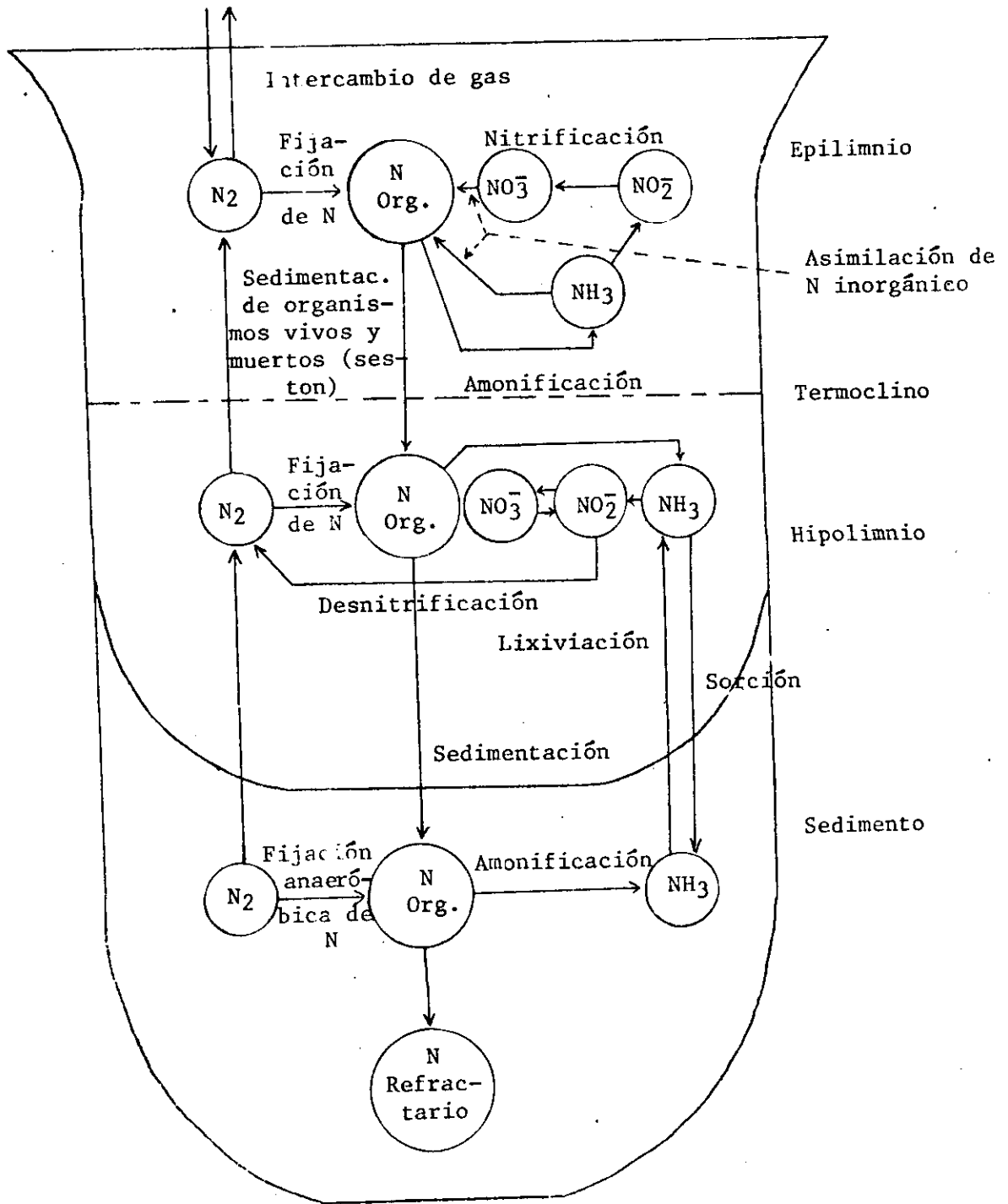


Figura 3 - CICLO DE NITROGENO SIMPLIFICADO QUE MUESTRA LAS PRINCIPALES TRASFORMACIONES MOLECULARES: (1) ASIMILACION DE NITRATO, (2) ASIMILACION DE AMONIACO, (3) AMONIFICACION, (4) NITRIFICACION, (5) DESNITRIFICACION, (6) FIJACION DE NITROGENO



**Figura 4 - REACCIONES CICLICAS DEL NITROGENO EN UN LAGO MODELO ESTRATIFICADO.** Nótese que tanto las trasformaciones aeróbicas como anaeróbicas aparecen en el hipolimnio. En un lago verdadero, éstas no ocurren en forma simultánea, naturalmente. Extraído y adaptado de Kuznetsov (1959). Die Rolle von Microorganismo im Stoffkreislauf der Seen. Berlin Verlag.

# TRANSFORMACIONES DEL NITROGENO

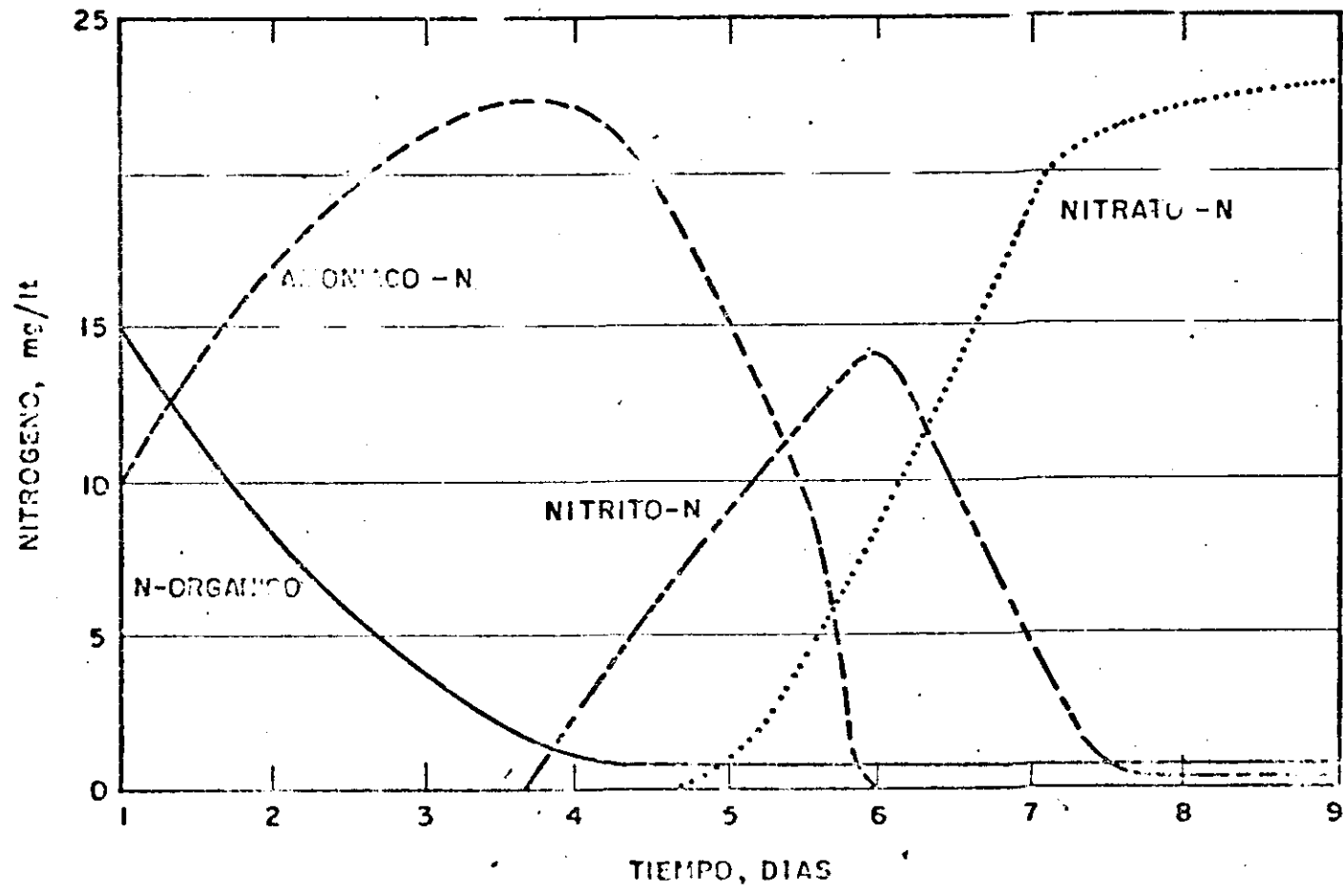


Figura 5

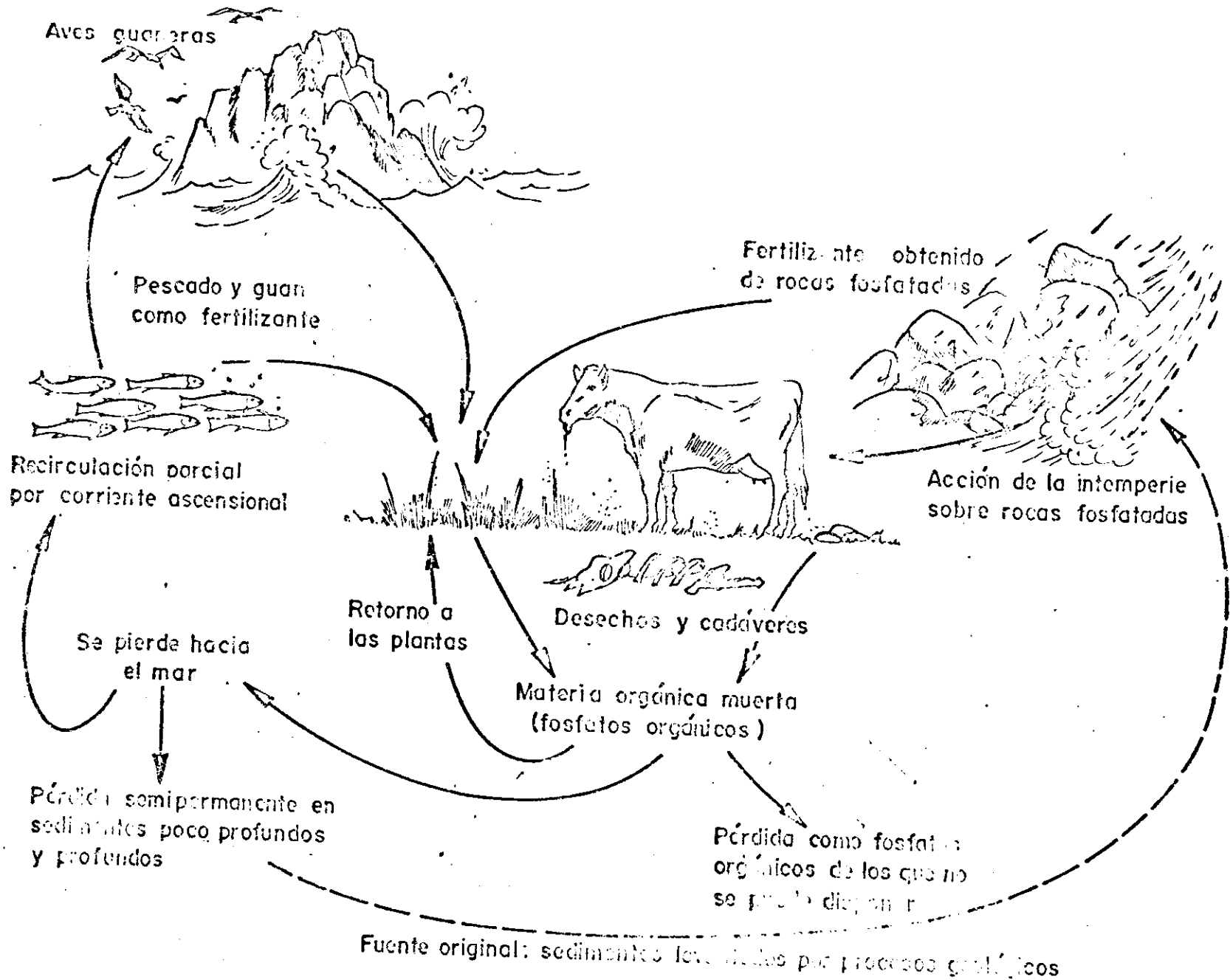


Figura 6 - CICLO DEL FOSFORO

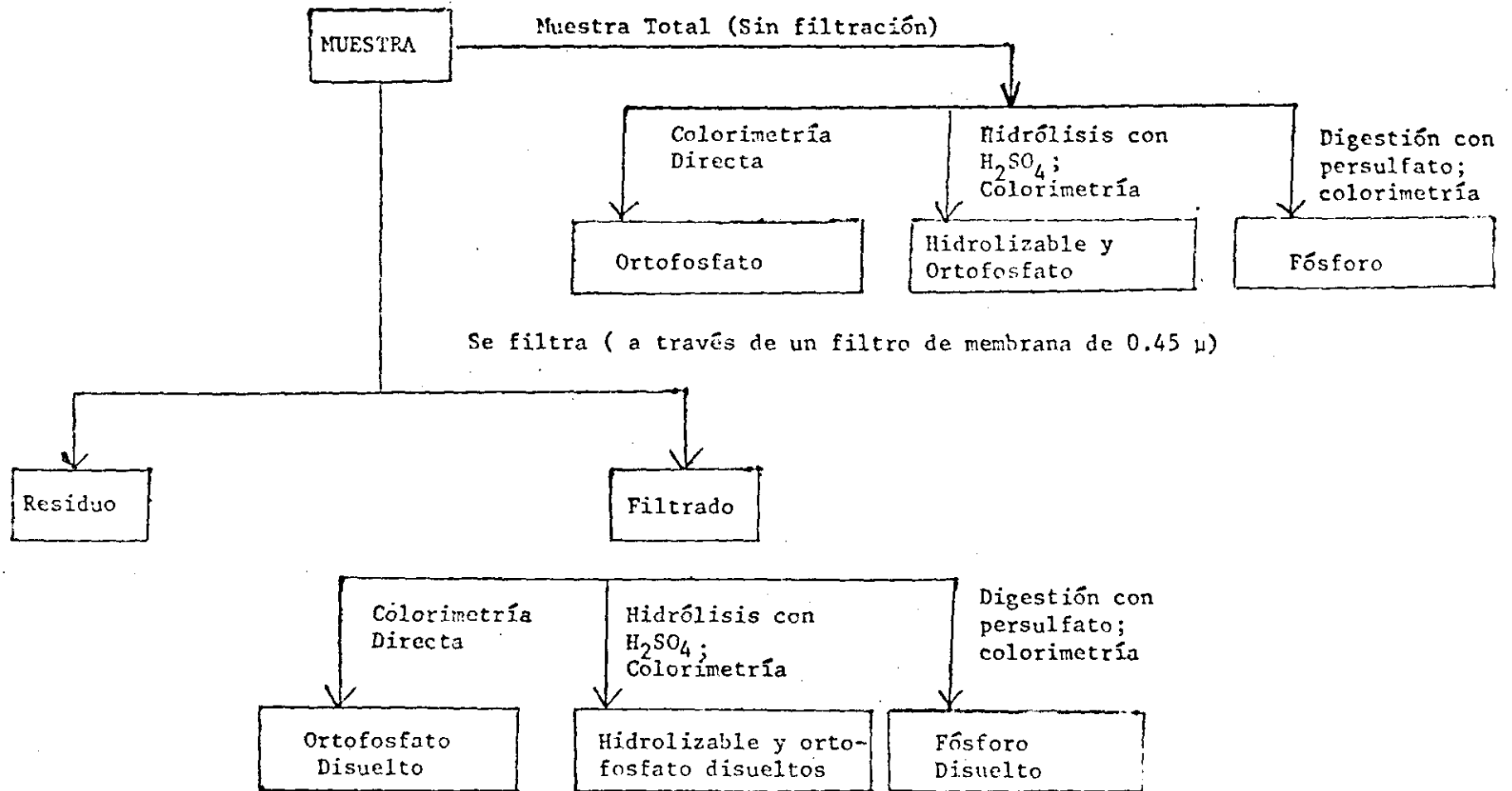


Figura 7 - Esquema analítico para la diferenciación de las formas de fósforo

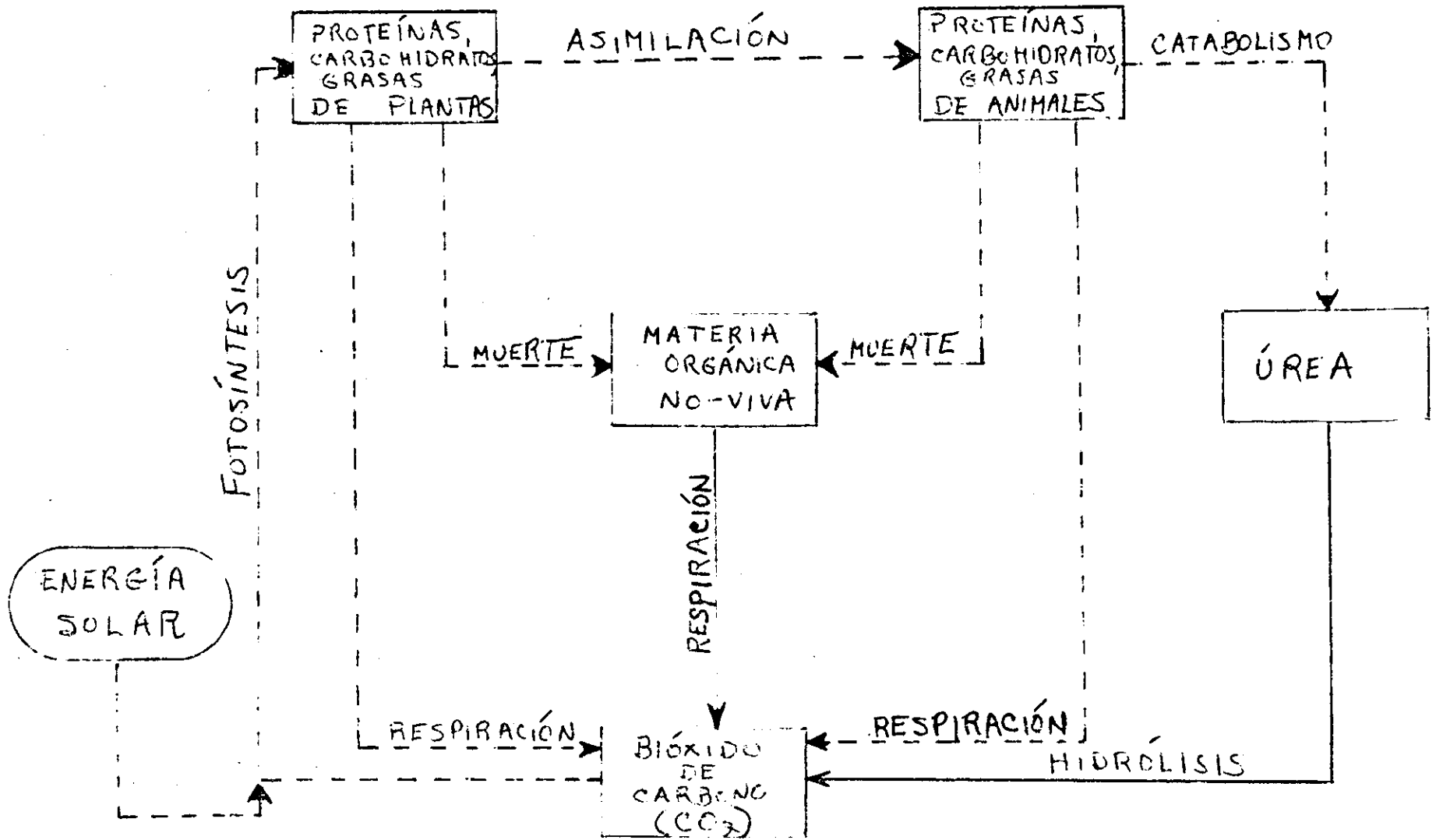


Figura 8

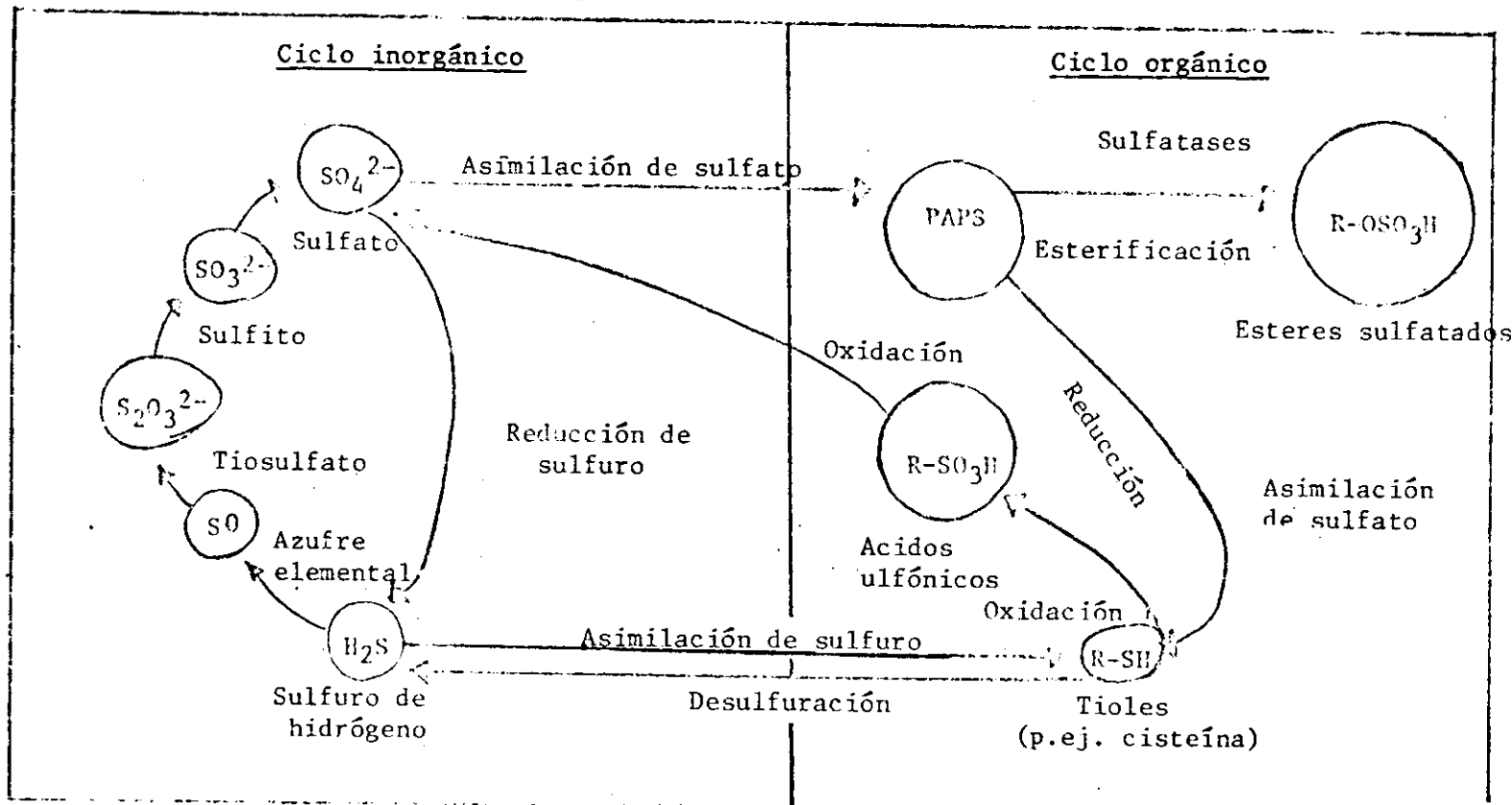


Figura 9