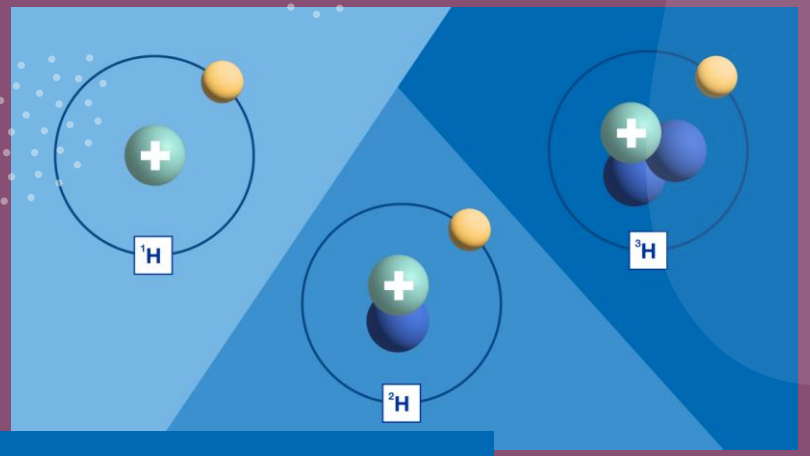
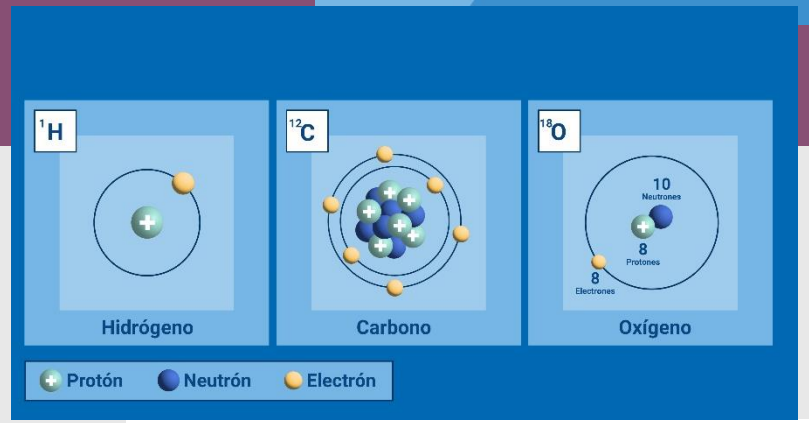
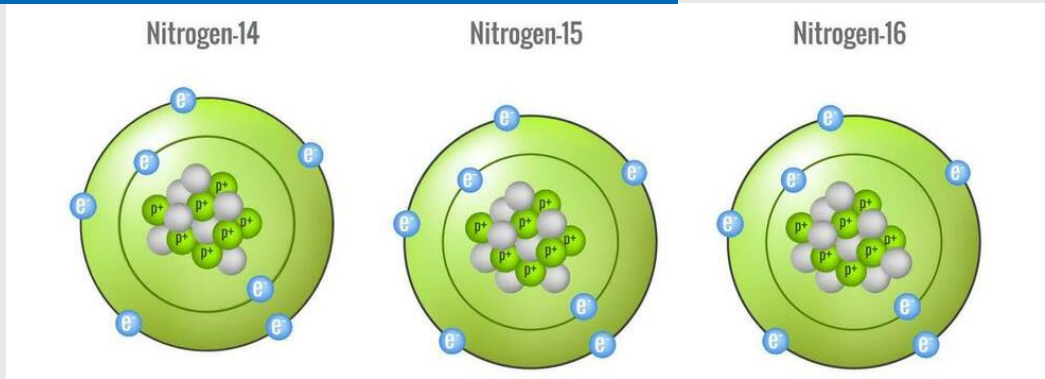
Introducción a los isótopos estables y su uso en estudios tróficos en ecología



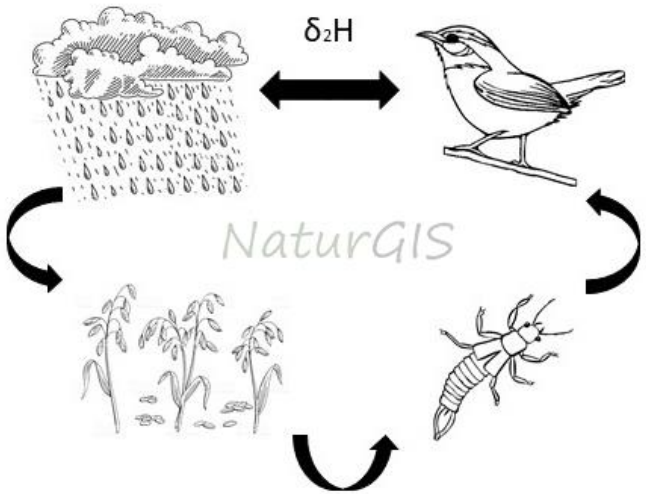


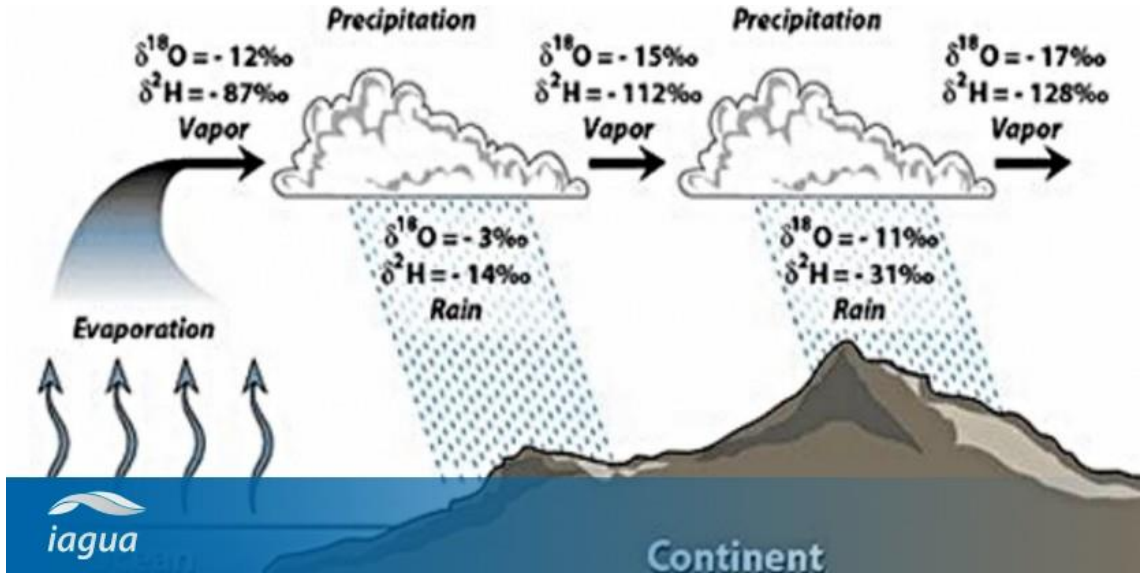


- M en B. Manuel Palomo-Morales
- Universidad Autónoma Metropolitana
- Departamento de Biología

Los análisis de los isótopos estables en ecología

En ecología, estos isótopos se han convertido en herramientas fundamentales para entender procesos ecológicos y tróficos, ya que permiten **rastrear el flujo de energía y nutrientes** a través de los ecosistemas.





Reconstrucción de dietas: Los isótopos estables permiten inferir la dieta de organismos, incluso en especies difíciles de observar directamente.

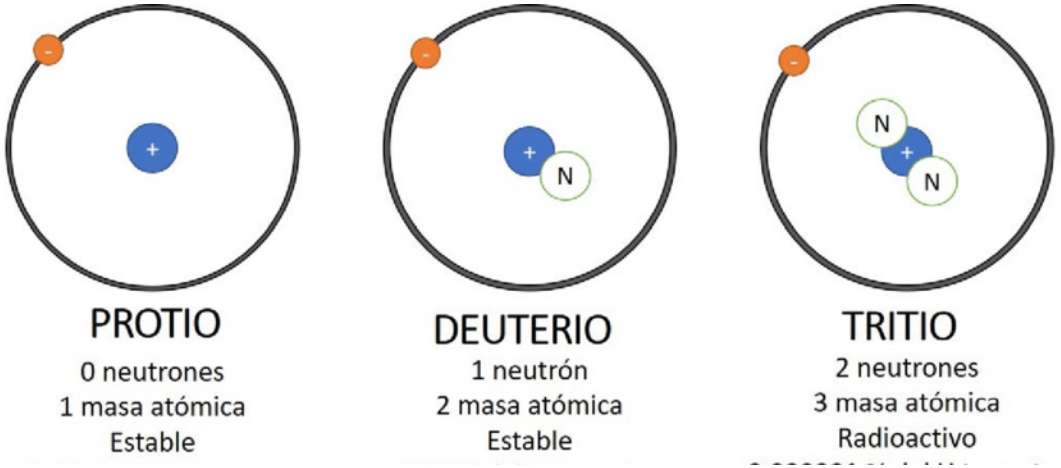
Migración y conectividad: Al analizar isótopos en tejidos como plumas, pelo o huesos, se puede rastrear el movimiento de especies entre diferentes hábitats.

Cambios en los ecosistemas: Los isótopos ayudan a detectar alteraciones en las redes tróficas debido a factores como la contaminación, el cambio climático o la introducción de especies invasoras.

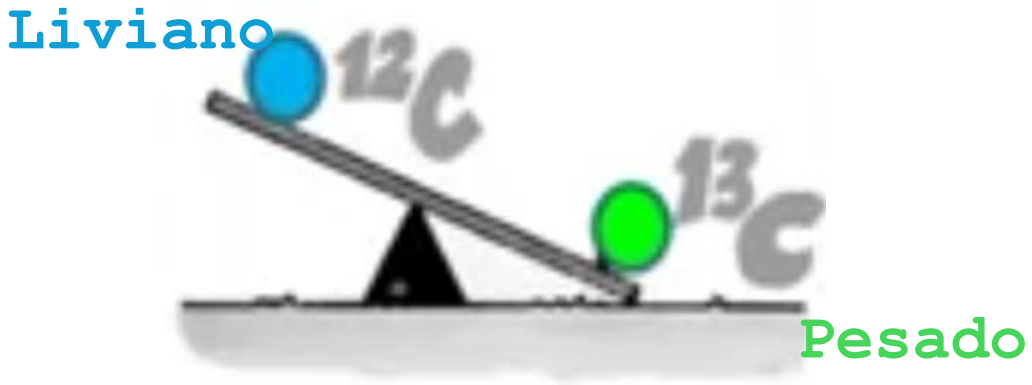
Karasov y Martínez del Rio, 2007

¿Qué son los isótopos estables?

Los isótopos estables son variantes de un mismo elemento químico que tienen el **mismo número de protones** pero **difieren en el número de neutrones** en su núcleo. A diferencia de los isótopos radiactivos, los isótopos estables **no se desintegran con el tiempo**.



Si a un átomo se le añade un neutrón se convierte en un isótopo de ese elemento químico.



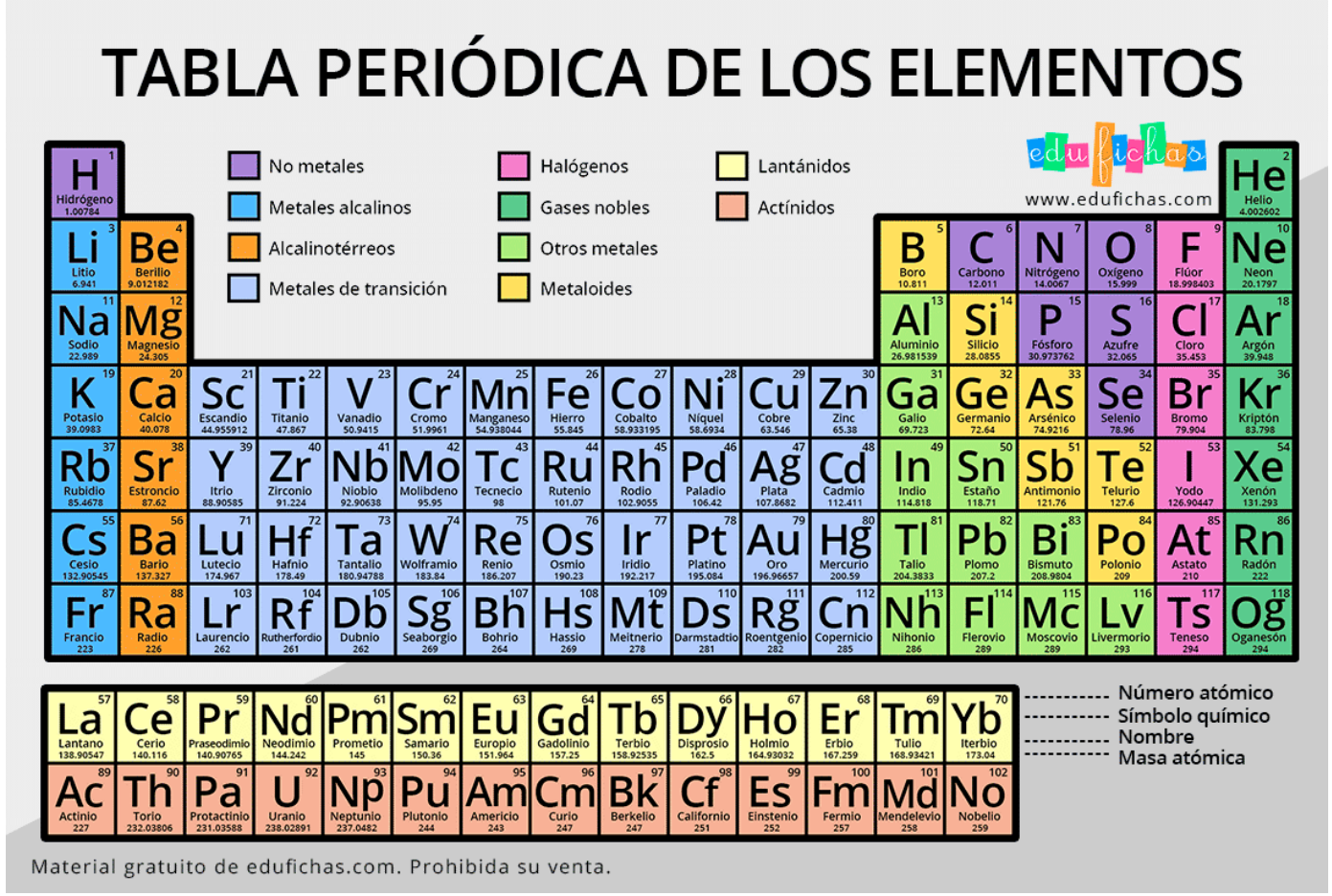
Karasov y Martínez del Rio, 2007

Isótopos estables

Isótopo proviene de considerar la tabla periódica de los elementos.

***Iso* : Igual**

***Topos* : Posición**



Se reconocen ≈ 120 elemento químicos y 3100 formas isotópicas

- 283 (>10%)

Son formas estables

Mientras que el resto ocurre **Descomposición Radioactiva**

Fry, 2006.

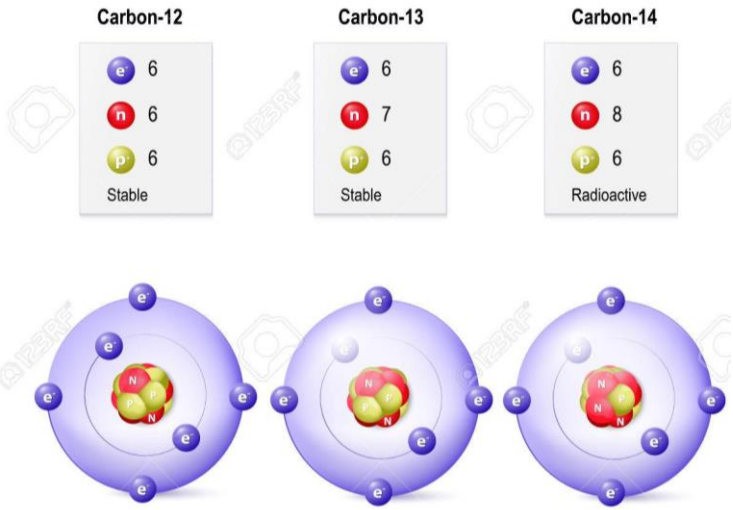
Isótopos estables e isótopos no estables

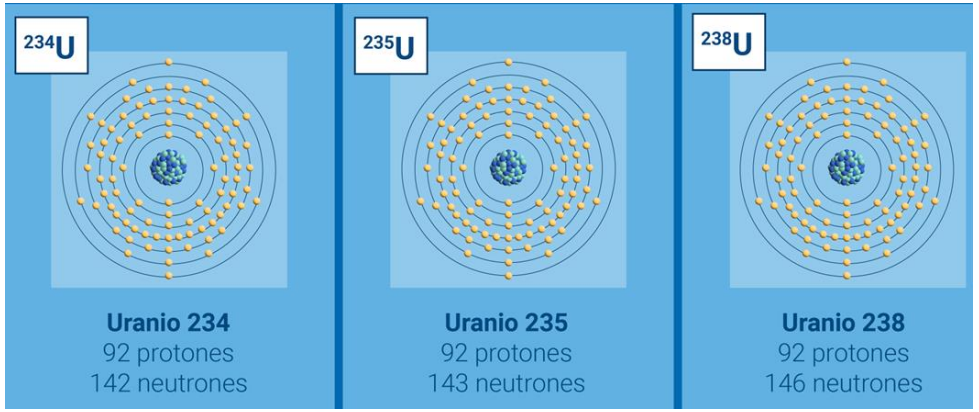
1. Isótopos estables:

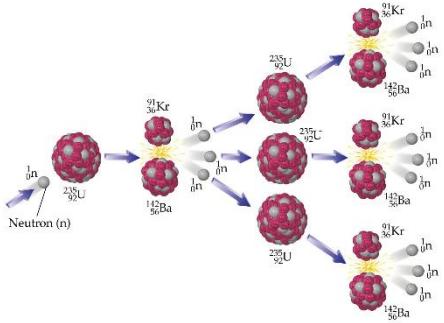
- Tienen un núcleo atómico que **no se desintegra con el tiempo**. Mantienen su estructura indefinidamente.
- Al no ser radioactivos no son peligrosos.
- La mayoría son mas ligeros que los isótopos no estables

2. Isótopos no estables (radiactivos):

- Tienen un núcleo inestable que **se desintegra con el tiempo**, emitiendo radiación (partículas alfa, beta o gamma) hasta transformarse en otro elemento.
- Pueden ser naturales o artificiales. Algunos, como el uranio-238 (^{238}U), existen en la naturaleza, pero otros se producen en laboratorios.







Karasov y Martínez del Rio, 2019

Origen y distribución de los isótopos estables

Los isotopos estables tienen distribución sesgada en la Tierra, que en su mayoría reflejan detalles de su síntesis por la fusión nuclear hace miles de millones de años en la estrellas.

Average terrestrial abundances and worldwide standards of the stable isotopes of major elements of interest in ecological studies

Element	*Low mass*	*% Abundance*	*High mass*	*% Abundance*	*Standard*
Hydrogen	^{1}H	99.984	^{2}H (Deuterium)	0.016	SMOW Standard Mean Ocean Water
Carbon	^{12}C	98.89	^{13}C	1.11	PDB PeeDee Belemnite
Nitrogen	^{14}N	99.63	^{15}N	0.37	N_2 (atm.) Air nitrogen
Oxygen	^{16}O	99.759	^{18}O	0.204	SMOW
Sulfur[a]	^{32}S	95.00	^{34}S	8.22	CD Triolite from the Canyon Diablo meteorite
Strontium[a]	^{86}Sr	9.86	^{87}Sr	7.02	

Los isótopos mas livianos son los más abundantes

Karasov y Martínez del Rio, 2007

¿Cómo se miden los isótopos estables?

1.Preparación de la muestra:

1. Las muestras biológicas (tejidos, pelo, plumas, huesos, sangre, etc.) se limpian y secan para eliminar contaminantes.
2. Luego, se homogenizan y se convierten en un formato adecuado para el análisis, como polvo fino o líquido.

2.Conversión a gas:

1. Las muestras se queman o se someten a reacciones químicas para convertirlas en gases simples.

Por ejemplo: El carbono se convierte en dióxido de carbono (CO_2) y el nitrógeno en nitrógeno molecular (N_2).

3.Espectrometría de masas de relación isotópica (IRMS):

1. El gas obtenido se introduce en un **espectrómetro de masas**, que es el instrumento clave para medir isótopos estables.
2. El espectrómetro separa los isótopos según su masa y mide la proporción entre ellos (por ejemplo, ^{12}C vs ^{13}C o ^{14}N vs ^{15}N).

Karasov y Martínez del Rio, 2007

Unidades de medida

Expresión de los resultados:

1. Los resultados se expresan en **notación delta (δ)**, que indica la diferencia en la proporción de isótopos en la muestra en comparación con un **estándar internacional**.

Fórmula: $\delta X =$

$$[(R_muestra - R_estándar)/R_estándar] \times 1000$$

Donde:

1. X es el isótopo (por ejemplo, ^{13}C o ^{15}N).
2. R es la **relación entre el isótopo pesado y el ligero** (por ejemplo, $^{13}C/^{12}C$ o $^{15}N/^{14}N$).

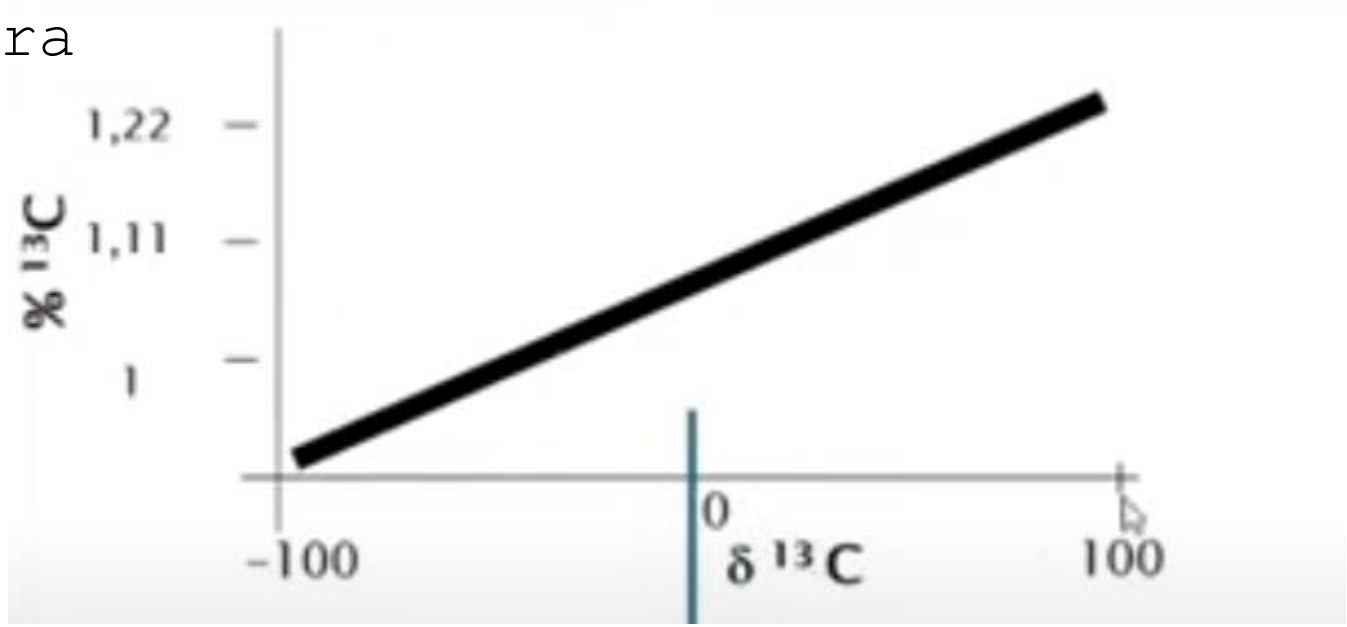
Las unidades son partes por mil (‰).

Peterson y Fry, 1987; Karasov y Martínez del Rio, 2007

Fraccionamiento isotópico

Por lo que tenemos una relación líneal entre los valores isotópicos: $_{13}C$

δ indica los valores del isótopo pesado en una muestra



Valores negativos de δ $_{13}C$ indican que hay relativamente menos cantidad del isótopo

Muestras con valores positivos δ $_{13}C$ indican que enriquecidas en el

Karasov y Martínez del Rio, 2007

Fraccionamiento Isotópico

La utilidad de los isótopos estables en estudios ecológicos se basa en que diferentes transformaciones isotópicas (**procesos físicos, químicos, biológicos o enzimáticos**) generan cambios relativos entre el isótopos pesados y livianos en ambientes naturales, así como en animales, plantas y productos antropogénicos.

El término usado para hacer referencia a estas trasfromacionee es el **fraccionamiento isotópico** y se denota con el símbolo griego **Δ**

$$\delta_{producto} = \delta_{fuente} - \Delta$$

$$\Delta = \delta_{fuente} - \delta_{producto}$$

Karasov y Martínez del Rio, 2007

Fraccionamiento Isotópico

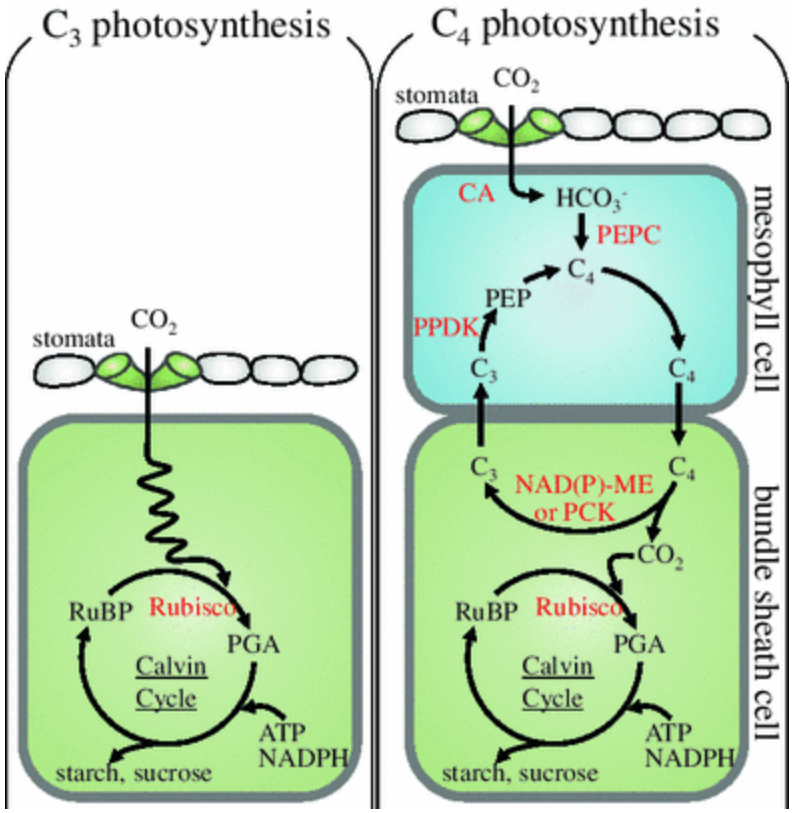
Mecanismos de fraccionamiento

Difusión del CO_2:

El CO_2 debe difundirse a través de los estomas de las hojas. El ^{12}C se difunde más rápido que el ^{13}C porque es más ligero.

Fijación del CO_2:

La enzima **RuBisCO** (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) fija el CO_2 durante la fotosíntesis. Esta enzima tiene una **mayor afinidad por el ^{12}C que por el ^{13}C**.



Plantas C3:
Tienen un fraccionamiento isotópico mayor,
lo que resulta en una menor proporción de ^{13}C en sus tejidos.

Valores típicos de $\delta^{13}C$: -22‰ a -30‰.

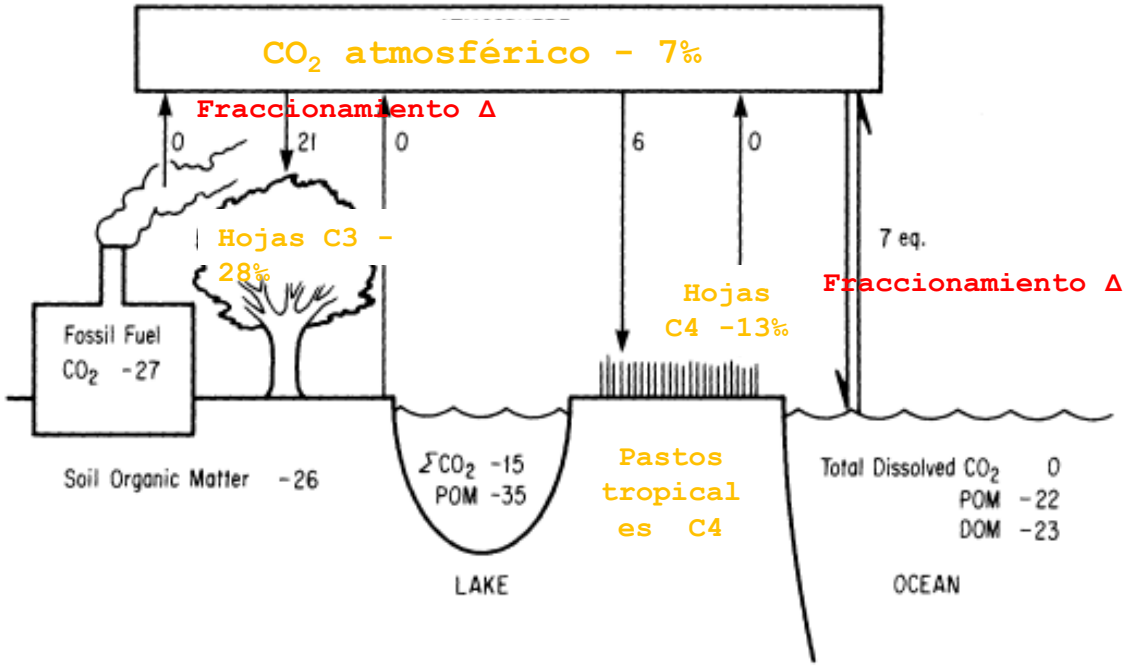
Plantas C4:
Usan la vía C4 para fijar el CO_2, que es más eficiente en condiciones de alta temperatura y baja concentración de CO_2.
Tienen un fraccionamiento isotópico menor, lo que resulta en una **mayor proporción de ^{13}C** en sus tejidos.

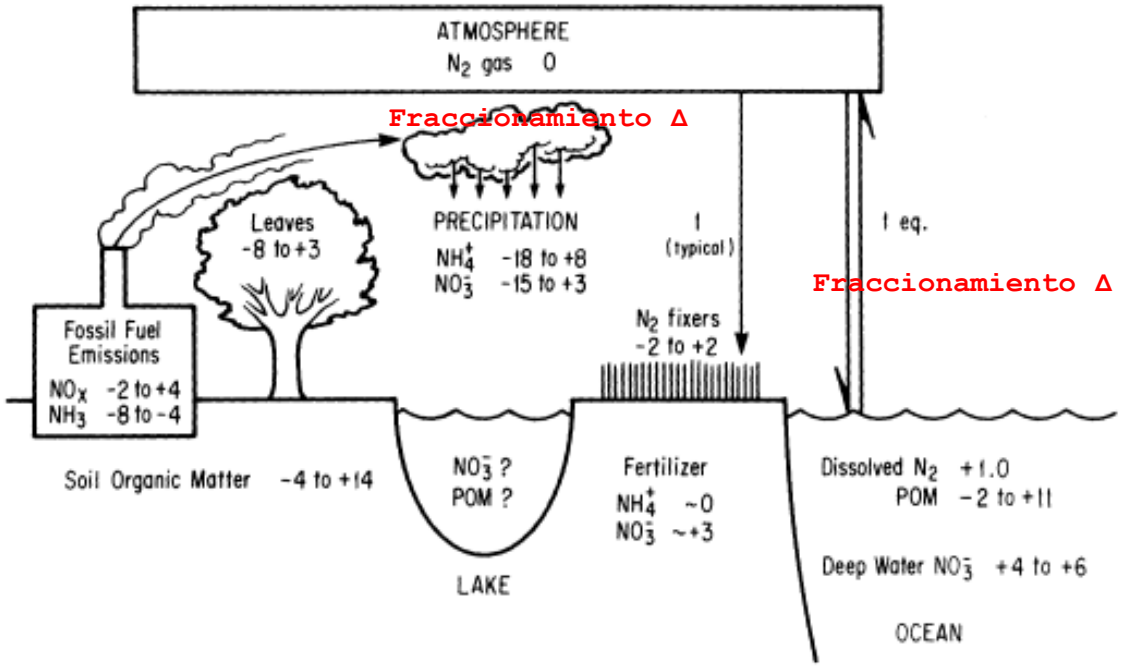
Valores típicos de $\delta^{13}C$: -10‰ a -14‰.

Karasov y Martínez del Rio, 2007

Fraccionamiento Isotópico

Distribución del $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ en la naturaleza





Existe un constante grado de fraccionamiento entre la proporción isotópica de $\delta^{13}C/\ \delta^{12}C$ y $\delta^{15}N/\ \delta^{14}N$ entre la dieta y el consumidor.

Peterson y Fry, 1987

Isótopos estables en estudios tróficos

- Regla general "Eres lo que comes"

- La proporción isotópica de $^{13}C/^{12}C$ y $^{15}N/^{14}N$ en el tejido de un organismo será **similar** a la fuente de **alimentación**, más el **enriquecimiento de por el fraccionamiento** producto de la digestión.

- El tejido ofrece información sobre los **recursos asimilados** por un taxon durante un dado periodo de tiempo; obteniéndose la **importancia nutricional** de los distintos rubros.

- Se recomiendo combinar estos análisis con estudios de contenido estomacal o fecal o consultar la literatura, para facilitar la interpretación de los resultados.

- La información obtenida representa el **habito alimenticio integrado** en el corto, mediano y largo plazo (**tasa metabólica en el tejido**).

Karasov y Martínez del Rio, 2007

El tipo de tejido refleja el patrón de tiempo

Por lo que refleja un patrón alimenticio de tiempo:

Escala temporal	Tipo de tejido	
	Renovable	Crecimiento continuo
Horas	Contenido estomacal	
Días	Plasma sanguíneo	
Semanas	Hígado	
Entre 1 y 6 meses	Músculo, células sanguíneas, pelo, plumas, piel	
Anual (series temporales)	Pelo, plumas	Barbas de ballena, conchas de moluscos, uñas, dientes
Vida completa		Otolitos en peces, colágeno óseo, corales

Tabla 1. Tiempo estimado que integran diferentes tipos de tejido sobre información dietaria en un organismo. Se distinguen tejidos renovables de aquellos de crecimiento continuo que generan líneas o capas donde almacenan la información mientras son formados. Información tomada de Tieszen et al. (1983) y Dalerum y Angerbjorn (2005).

Tieszen et al., 1983; Dalerum y Angerbjorn, 2005; Bergamino et al., 2017

Enriquecimiento trófico: Carbono

Los tejidos de los consumidores se enriquecen en el isótopo más pesado con respecto a su alimento:

Este enriquecimiento trófico del ^{13}C es pequeño (**~0-1‰** por nivel trófico)

En una cadena trófica (hipotética) en un ecosistema terrestre:

Plantas C3: $\delta^{13}C$ = -26‰.

Asimilación de CO^2

Digestión y Síntesis de tejidos

Herbívoro (conejo): $\delta^{13}C$ = -25‰ (enriquecimiento de +1‰).

Digestión y Síntesis de tejidos

Carnívoro (zorro): $\delta^{13}C$ = -24‰ (enriquecimiento adicional de +1‰).

Martínez del Río et al., 2009

Enriquecimiento trófico: Nitrógeno

El enriquecimiento trófico del **^{15}N** es de **~2-4‰** por **nivel trófico**.

Causas de esto:

- Las plantas **discriminan** ligeramente contra el **^{15}N**, **prefiriendo** el isótopo más ligero el **^{14}N**.
- Durante la digestión y el metabolismo, el **herbívoro retiene más ^{15}N que ^{14}N**.
- Cuando un carnívoro consume un herbívoro, el proceso se repite: retiene más **^{15}N que ^{14}N**.

La señal isotópica incrementa **3.4‰** (**~2-4‰**) cada escalón trófico

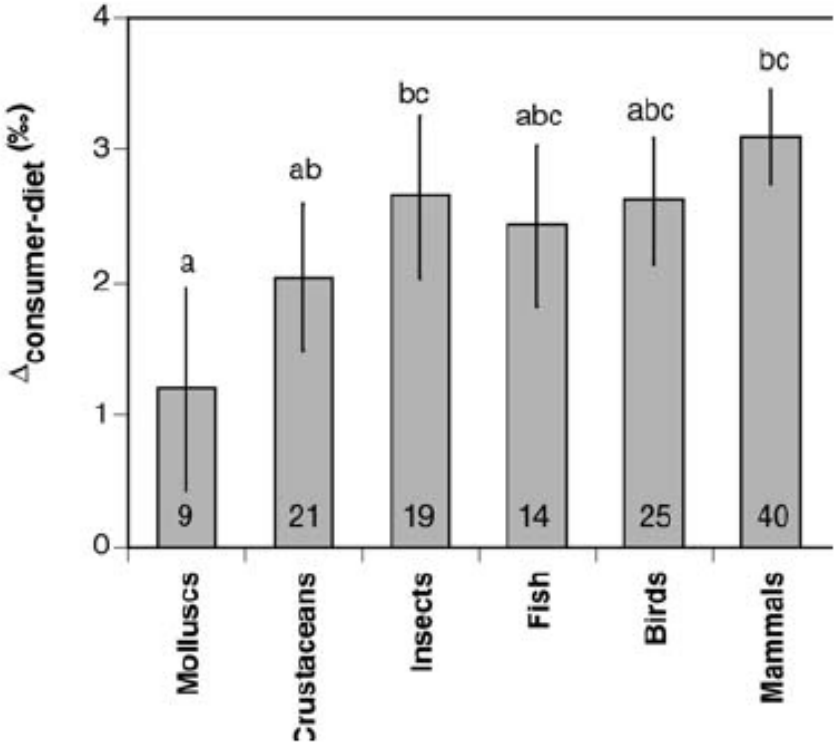
Plantas $\delta^{15}N \approx$ 0-3‰ → +3‰ → **Consumidor primario $\delta^{15}N \approx$ 3-6‰** → +3‰ → **Consumidor secundario $\delta^{15}N \approx$ 6-9‰** → +3‰ → **Consumidor terciario $\delta^{15}N \approx$ 9-12‰**

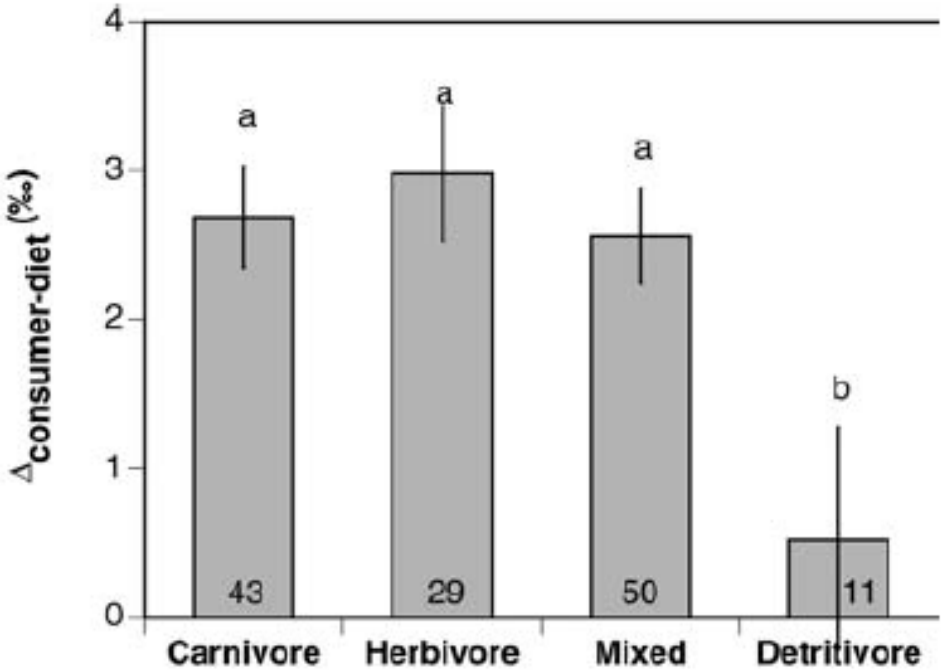
Martínez del Río et al., 2009

Valores tróficos

Los valores de fraccionamiento se obtienen a través de metánalisis

Basado en134 estimaciones de Δ ^{15}N



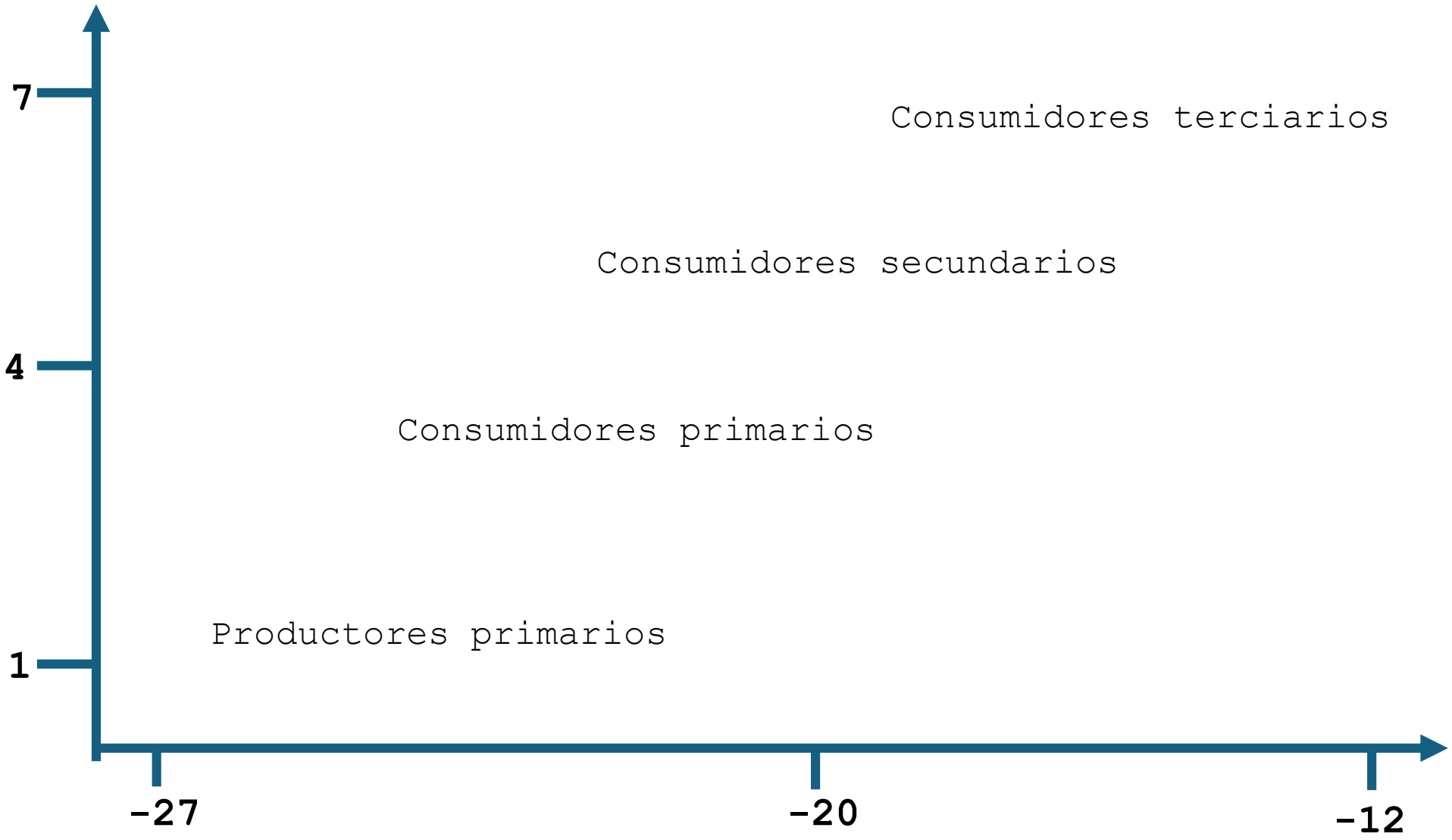


Los mulcos y crustáceos presentan valores mas bajos de Δ ^{15}N, mientras que para mamíferos son mayores

Al compararlos por grupos funcionales los organismos detritívoros presentan valores más bajos de Δ ^{15}N

Vanderklift y Ponsard, 2003

Diagrama del enriquecimiento trófico del $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$



Martínez del Río et al., 2009

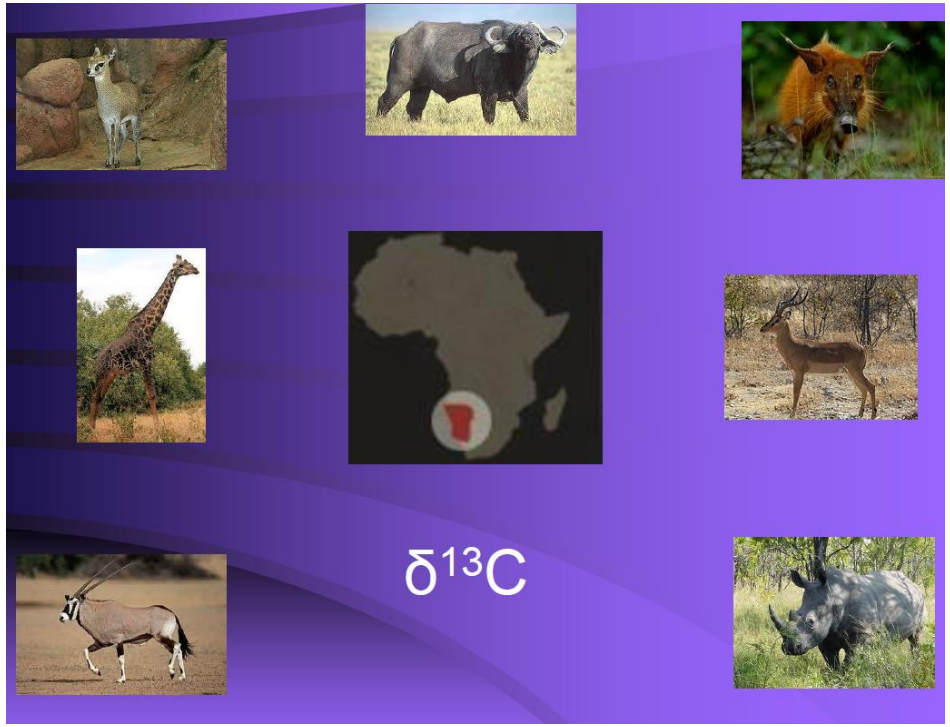
Estudios de caso

Reconstrucción de la dieta

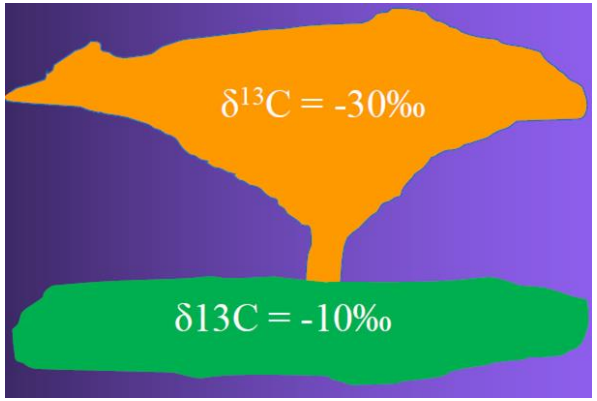
Animal diets in the Waterberg based on stable isotopic composition of faeces

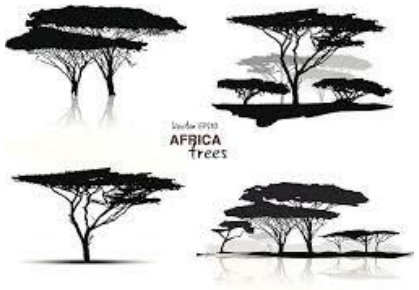
D. Codron[1*], J. Codron[1], J.A. Lee-Thorp[1], M. Sponheimer[1,2] & D. de Ruiter[3]
[1]Quaternary Research Centre, c/o Department of Archaeology, University of Cape Town, Private Bag, Rondebosch, 7701 South Africa
[2]Department of Anthropology, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309, U.S.A
[3]Department of Anthropology, Texas A & M University, College Station, TX 77843–4352, U.S.A.

10 September 2004. Accepted 19 April 2005



Mosaico diferido en la sabana africana





Plantas C3

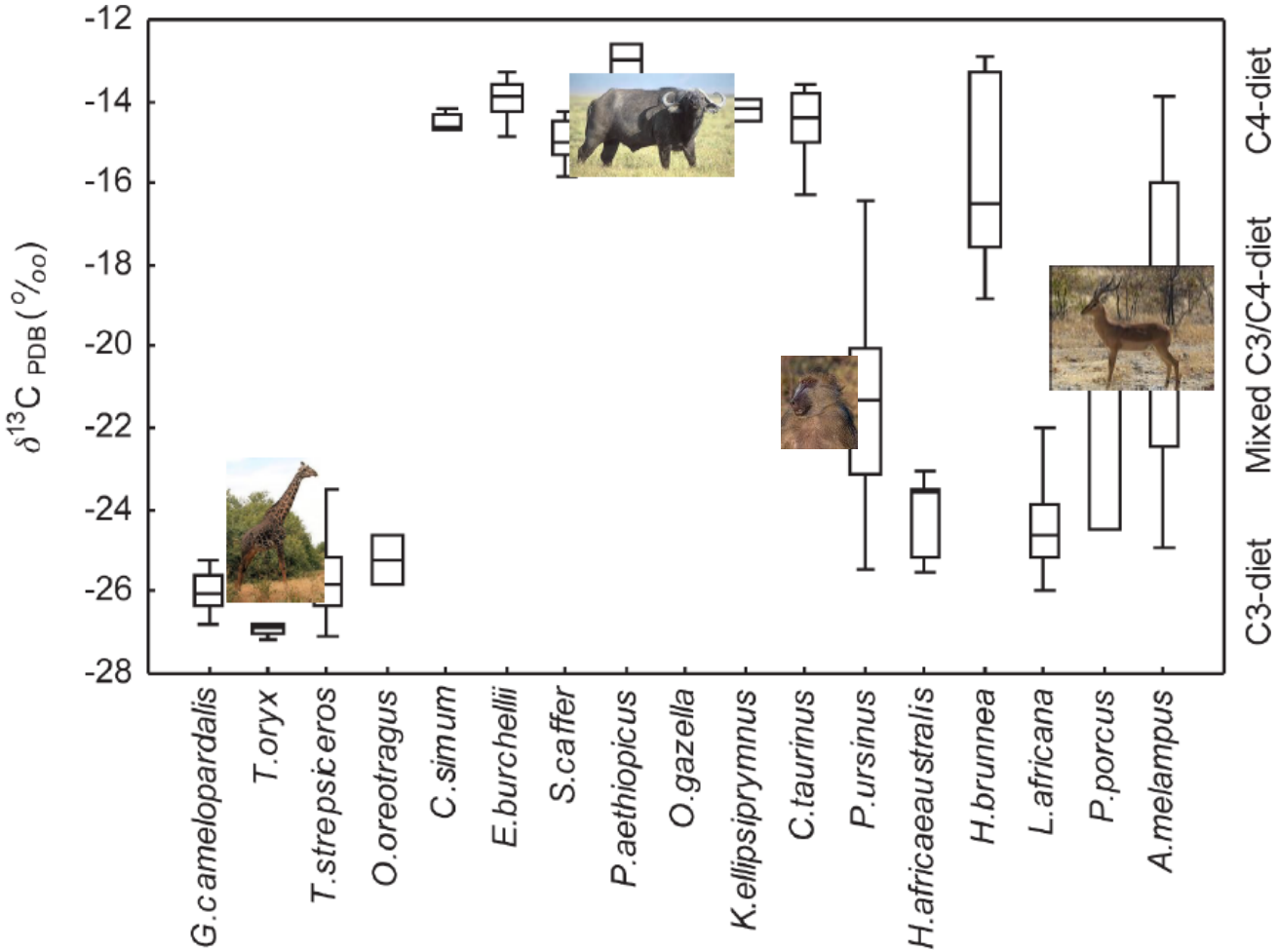
Plantas C4

Reconstrucción de la dieta

Animal diets in the Waterberg based on stable isotopic composition of faeces

D. Codron[1*], J. Codron[1], J.A. Lee-Thorp[1], M. Sponheimer[1,2] & D. de Ruiter[3]
[1]Quaternary Research Centre, c/o Department of Archaeology, University of Cape Town, Private Bag, Rondebosch, 7701 South Africa
[2]Department of Anthropology, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309, U.S.A
[3]Department of Anthropology, Texas A & M University, College Station, TX 77843–4352, U.S.A.
10 September 2004. Accepted 19 April 2005

El hábitat de la sabana relativamente pobre en nutrientes afecta las elecciones dietéticas y la calidad nutricional de los animales, lo que lleva a adaptar las estrategias de alimentación.



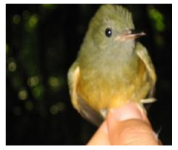
The Auk 122(3):783–792, 2005
© The American Ornithologists' Union, 2005.
Printed in USA.

QUANTIFYING DIFFERENTIAL RESPONSES TO FRUIT ABUNDANCE BY TWO RAINFOREST BIRDS USING LONG-TERM ISOTOPIC MONITORING

L. Gerardo Herrera M.,[1,4] Keith A. Hobson,[2,3] Patricia Hernández C.,[1] and Malinalli Rodríguez G.[1]

[1]*Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Apartado Postal 70-153, 04510 México, Distrito Federal, México;*
[2]*University of Saskatchewan, Department of Biology, Saskatoon, Saskatchewan S7N 5E2, Canada; and*
[3]*Canadian Wildlife Service, 115 Perimeter Road, Saskatoon, Saskatchewan S7N 0X4, Canada*

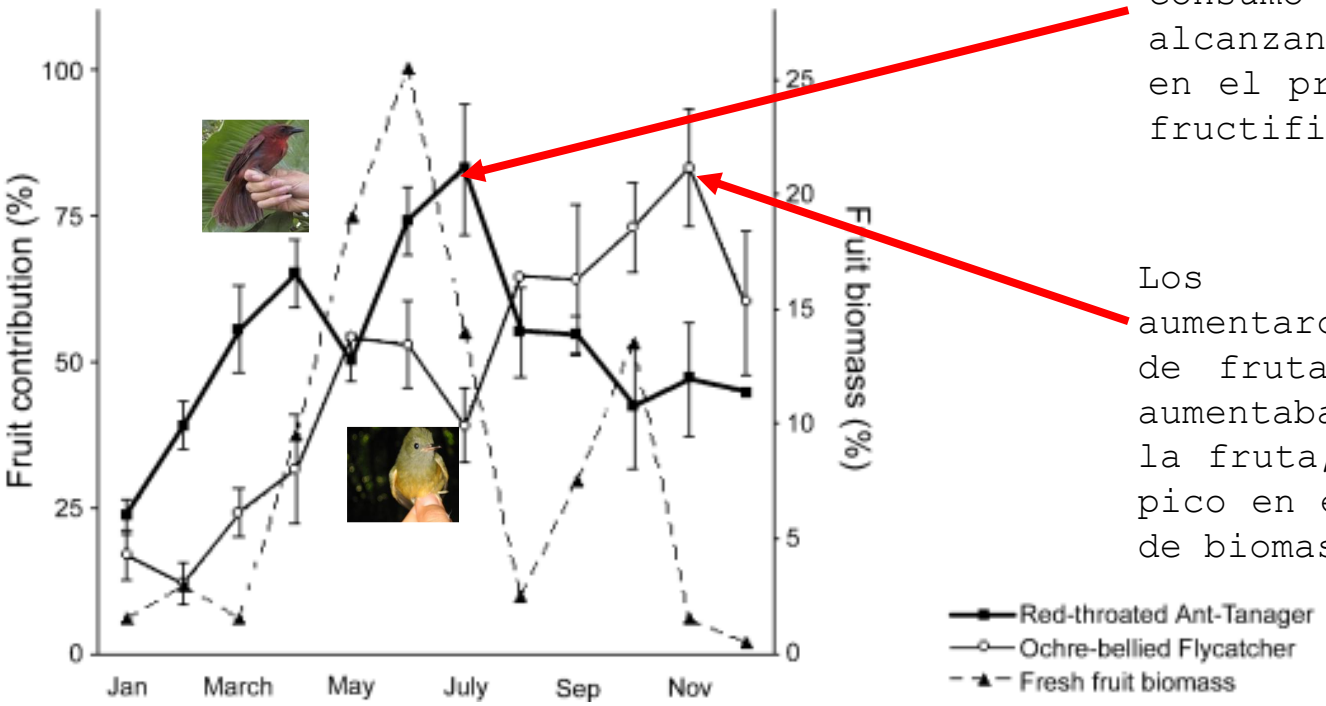
Habia rubica (Piranga Hormiguera Garganta Roja)



Mionectes oleagineus (Mosquerito Ocre)

Table 1. One-year stable-nitrogen isotope values of blood from Ochre-bellied Flycatchers and Red-throated Ant-Tanagers at Los Tuxtlas, Mexico. Values are means (± SE, except when sample size of any species was less than three).

	Red-throated Ant-Tanager		Ochre-bellied Flycatcher	
	$\delta^{15}N$ (‰)	*n*	$\delta^{15}N$ (‰)	*n*
January	5.9 ± 0.1	12	6.1 ± 0.1	7
February	5.4 ± 0.1	10	6.5 ± 0.2	7
March	4.9 ± 0.2	14	5.9 ± 0.1	10
April	4.6 ± 0.3	4	5.6 ± 0.3	7
May	5.1 ± 0.1	12	4.9	2
June	4.2 ± 0.2	13	5.1 ± 0.2	6
July	3.8 ± 0.4	7	5.5 ± 0.2	6
August	4.8 ± 0.2	4	4.6	2
September	4.9 ± 0.1	10	4.6 ± 0.4	4
October	5.3 ± 0.3	3	3.9 ± 0.4	13
November	5.2 ± 0.3	4	3.6 ± 0.6	4
December	5.2	1	4.7 ± 0.3	4



Las tangaras aumentaron el consumo de fruta alcanzando un pico en el primer pico de fructificación.

Los papamoscas aumentaron el consumo de fruta a medida que aumentaba la biomasa de la fruta, alcanzando un pico en el segundo pico de biomasa de la fruta.

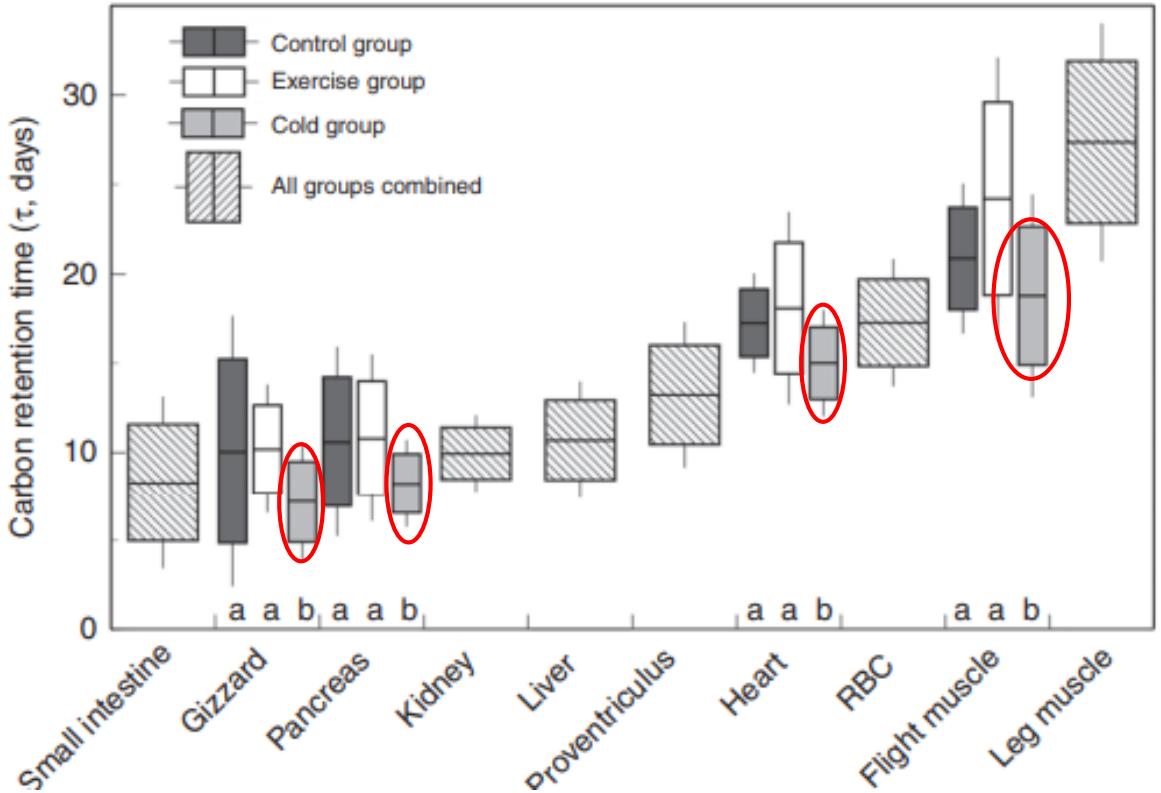
Tasa metabólica

Exposure to cold but not exercise increases carbon turnover rates in specific tissues of a passerine

U. Bauchinger[1,2,*], J. Keil[1], R. A. McKinney[3], J. M. Starck[1] and S. R. McWilliams[2]
[1]Department Biology II, University of Munich (LMU), Großhaderner Straße 2, 82152 Planegg-Martinsried, Germany, [2]University of Rhode Island (URI), Kingston, RI 02881, USA and [3]US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Lab, Atlantic Ecology Division, Narragansett, RI 02882, USA
*Author for correspondence (ulf@etal.uri.edu)

Accepted 20 October 2009

Zebra finch
(Taeniopygia guttata)



Los aumentos en el metabolismo asociados con la exposición al frío, pero no con el ejercicio, produjeron aumentos mensurables en la tasa de recambio de C de, en promedio de 2,4 ± 0,3 días.

La tasa de recambio de C aumentó en los órganos que respondieron al aumento de la ingesta de alimentos (páncreas e intestinos) y a la termogénesis por escalofríos (corazón y músculo de vuelo).

Reconstrucción en el tiempo

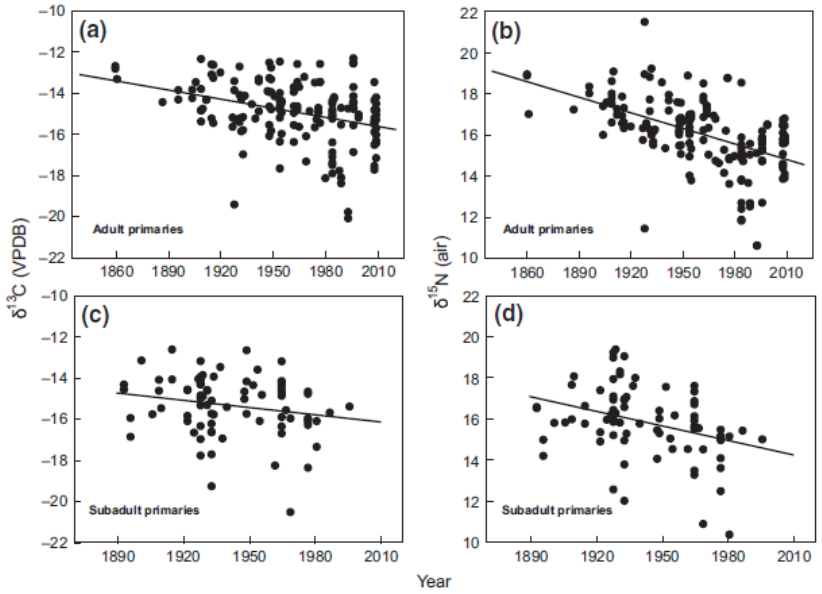
Global Change Biology

Global Change Biology (2014), doi: 10.1111/gcb.12796

Changing gull diet in a changing world: A 150-year stable isotope ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) record from feathers collected in the Pacific Northwest of North America

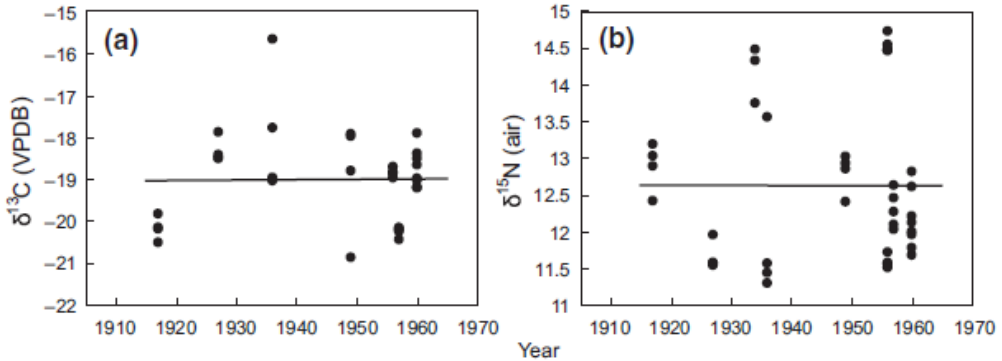
LOUISE K. BLIGHT[1,2], KEITH A. HOBSON[3], T. KURT KYSER[4] and PETER ARCESE[1]

[1]Centre for Applied Conservation Research, University of British Columbia, 2424 Main Mall, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada, [2]Procellaria Research & Consulting, 944 Dunsmuir Road, Victoria, BC V9A 5C3, Canada, [3]Environment Canada, 11 Innovation Blvd, Saskatoon S7N 3H5, Canada, [4]Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario K7L 3N6, Canada



Larus glaucescens (Gaviota de alas blancas)

El análisis de isótopos de **plumas muestra una disminución** en los **valores δ (13) C y δ (15) N**, lo que indica un alejamiento de las dietas marinas a lo largo del tiempo



La falta de tendencias similares en su fuente de alimento (peces) sugiere que estos cambios no se deben a cambios ambientales de línea de base sino más bien a un cambio dietético real en estas aves

Literatura citada

Bergamino, L., Tudurí, A., Bueno, C., Brugnoli, E., Valenzuela, L. O., Martínez, A., Garcia-Rodríguez, F. & Scarabino, F. (2017). Aplicación de isótopos estables como indicadores de flujos de energía en ambientes costeros de Uruguay. Revista del laboratorio tecnológico del uruguay. No. 13 (09 - 18).

Blight, L. K., Hobson, K. A., Kyser, T. K., & Arcese, P. (2015). Changing gull diet in a changing world: A 150-year stable isotope (δ13C, δ15N) record from feathers collected in the Pacific Northwest of North America. Global Change Biology, 21(4), 1497-1507.

Fry, B. (2006). Stable isotope ecology (Vol. 521, p. 318). New York: Springer.

Karasov, W. H., & Martínez del Rio, C. (2007). Physiological ecology: how animals process energy, nutrients, and toxins. Princeton University Press.

Martínez del Rio, C., Wolf, N., Carleton, S. A., & Gannes, L. Z. (2009). Isotopic ecology ten years after a call for more laboratory experiments. Biological Reviews, 84(1), 91-111.

Peterson, B. J., & Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. Annual review of ecology and systematics, 293-320.

Vanderklift, M. A., & Ponsard, S. (2003). Sources of variation in consumer-diet δ 15 N enrichment: a meta-analysis. Oecologia, 136, 169-182.