




**TRABAJOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE TENERIFE EN EL ÁMBITO DEL PROYECTO AQUAMAC II PARA CUMPLIMIENTO DE LA DIRECTIVA MARCO DE AGUAS”**



**CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE**



**Autores:** Elzbieta Skupien Balon, Dra. Ing. de Minas  
Roberto Poncea Poncea, Hidrogeólogo



## ÍNDICE

1. OBJETIVOS
2. UTILIDAD DE LOS ISÓTOPOS AMBIENTALES EN HIDROGEOLOGÍA
3. BREVE DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA
4. TÉCNICAS HIDROGEOLÓGICAS BASADAS EN EL CONTENIDO EN TRITIO. BREVE INTRODUCCIÓN TEÓRICA
5. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO COMPLEJO EN LAS MASAS DE AGUA DE TENERIFE

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

## 1. OBJETIVOS

- El objetivo principal del estudio desarrollado en el ámbito del Proyecto AQUAMAC II e incluido en el Programa de Iniciativa Comunitaria INTEREG IIIB 2000-2006, cofinanciado por el FEDER, y contratado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife, ha sido la caracterización del estado cualitativo de las aguas subterráneas de Tenerife, de conformidad con lo dispuesto en la DMA, definiendo y estableciendo una red de muestreo representativa de las masas de agua subterránea.
- Aplicar las técnicas isotópicas ambientales de interés en las aguas subterráneas en la red de control, fundamentalmente para su uso como trazadores naturales de los sistemas de flujo y como datadores de los tiempos de tránsito ("edad aparente") del agua subterránea, para mejora del modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero insular de Tenerife.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

## 2. UTILIDAD DE LOS ISÓTOPOS AMBIENTALES EN HIDROGEOLOGÍA

Los isótopos que se han considerado en este trabajo son:

- **Oxígeno-18 y Deuterio:** La utilidad de estos isótopos estables del agua como herramienta hidrogeológica, en condiciones favorables, radica en que permiten caracterizar las zonas de recarga, definir los perímetros de protección, procesos de evaporación, procesos de intrusión marina, etc. Es necesario un muestreo estacional para poner de manifiesto las diferencias entre una estación seca y otra húmeda, a la vez que altitudinal.
- **Tritio:** La presencia de tritio en el agua subterránea se interpreta como un indicio claro de recarga reciente. Su ausencia indica tiempos de residencia superiores a 50 años. En algunos casos dicha presencia indica la mezcla de aguas subterráneas. Por ello, el tritio se utiliza habitualmente para diferenciar las aguas subterráneas de rápida circulación en el acuífero (corto tiempo de tránsito), de las que se mueven de forma más lenta o que incluso están atrapadas. Además, permite definir sistemas locales y/o regionales de flujo subterráneo.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

## Situación actual de la contribución isotópica de las aguas subterráneas en Tenerife.

- La isla de Tenerife cuenta con un seguimiento periódico de la calidad de las aguas subterráneas, fundamentalmente de su composición físico-química.
- Sin embargo, existen escasas determinaciones isotópicas (Oxígeno 18, Deuterio y Tritio) a pesar de su gran interés como herramienta hidrogeológica, ya sea con fines de investigación (modelo conceptual del sistema acuífero insular) o para resolver problemas reales.
- Los isótopos estables del agua han demostrado ser de gran utilidad para el estudio de numerosos problemas hidrológicos relacionados con las aguas subterráneas. Los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica de la misma que puede ser aprovechada para obtener conclusiones sobre su origen y comportamiento.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

## 3. BREVE DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA

Los dos elementos que componen la molécula del agua son el hidrógeno y el oxígeno, los cuales, en su estado natural, están formados por la mezcla de sus isótopos:

- Para el hidrógeno:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  (también conocido como deuterio: D)
- Para el oxígeno:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ .

El  $^1\text{H}$  y el  $^{16}\text{O}$  son los isótopos mayoritarios. Por ello, la especie molecular más abundante en la naturaleza es la que corresponde con la fórmula  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ . Sin embargo, a parte de esta especie molecular existen otras, aunque se encuentran en porciones muy inferiores.

Las únicas que son interesantes en el campo de la hidrogeología son las especies que tienen incorporado un átomo de D, o bien uno de  $^{18}\text{O}$ .

Al realizar los análisis y estudios de estas moléculas, lo que en realidad interesa conocer es la relación isotópica que guardan entre sí. Esta relación isotópica R se define como el cociente entre el número de moléculas de la especie pesada y de la especie ligera correspondiente a una muestra cualquiera de agua, es decir:

$$R = \frac{N^\circ \text{ de moléculas del tipo } (^1\text{H}_2^{18}\text{O})}{N^\circ \text{ de moléculas del tipo } (^1\text{H}_2^{16}\text{O})}$$

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Breve descripción teórica de los isótopos estables del agua (cont.).

- Para poder expresar de forma homogénea las variaciones de la relación isotópica fue preciso definir una muestra patrón que sirviera de referencia para distintos laboratorios. Fue por eso que surgió el "Patrón Medio de Agua de Mar", cuyas siglas en inglés son **SMOW** (Standard Mean Ocean Water), y que fue preparado originalmente en 1961 a partir de muestras de aguas de diferentes océanos tomadas a profundidades.
- Sin embargo, este patrón ya se ha agotado y el Organismo Internacional de Energía Atómica fue el encargado de reproducirlo. El nuevo patrón V-SMOW (Vienna SMOW).
- Las variaciones de la relación isotópica para oxígeno 18 y deuterio se expresan como desviaciones respecto al patrón V-SMOW por medio de la expresión:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{Muestra}} - R_{\text{V-SMOW}}}{R_{\text{V-SMOW}}} \times 10\text{‰}$$

El valor de  $\delta$  puede ser positivo o negativo. Un  $\delta$  positivo significa que la muestra tiene mayor concentración isotópica que el V-SMOW, y un valor de  $\delta$  negativo significa que la muestra tiene menor concentración isotópica que la del V-SMOW.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Breve descripción teórica de los isótopos estables del agua (cont.).

Los diagramas que relacionan las desviaciones isotópicas  $\delta(^{18}\text{O})$   $\delta(^2\text{H})$  se utilizan para poner de manifiesto los procesos que afectan a los diferentes tipos de agua.

La mayor parte de los recursos de agua subterránea son de origen meteórico. En la Línea de Agua Meteórica Mundial se refleja la fuerte relación que existe entre los valores de las desviaciones  $\delta$  de la precipitación. La pendiente es 8 y el denominado exceso de deuterio es del  $10\text{‰}$ .

Oxígeno 18

Deuterio

Línea Mundial de las Aguas Meteóricas  
 $y = 8x + 10$

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Campañas de muestreo.

Se han realizado dos campañas de muestreo de aguas subterráneas entre los puntos seleccionados de las masas TF001 y TF002, para su posterior análisis isotópico de  $^{18}\text{O}$  y  $2\text{H}$ .

- En la primera campaña (junio 2006) se han tomado un total de 11 muestras que corresponden a 6 muestras de galerías y 5 de pozos o sondeos.
- En la segunda campaña (febrero 2007) se han tomado un total de 11 muestras que corresponden a 9 muestras de galerías, 1 de nacimiento y 1 de pozo.
- Existen 7 puntos comunes entre las dos campañas: 6 galerías y 1 pozo.
- Teniendo en cuenta estos resultados, se han realizado diferentes figuras que relacionan  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  – altitud y  $\delta\text{D}$  – altitud, para puntos muestreados en este trabajo y que se muestran en las siguientes diapositivas.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Condiciones de muestreo.

En el caso del muestreo para análisis isotópicos (O-18, D y T) se ha considerado necesario tomar las muestras en el frente de las galerías para descartar las mezclas de aguas recargadas a diferente altura. En algunos sondeos ha sido necesario bajar el tomamuestra a 400 m de profundidad.

Las aguas subterráneas en la **Directiva Marco de Aguas:** programas de seguimiento en **Tenerife**

## Resultados del laboratorio.

**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
SERVICIO GENERAL DE ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES  
E-37002, Salamanca  
Tél: (+34) 923 294500, Extensión 1848  
FAX: (+34) 923 294514  
C.I.F. Q-37-18891-E

Dir. Isabel Fernández de la Riva  
Jefe de la Secc. de Plasmáticas Isotópicas  
Centro Sector de Aguas  
Calle de Tenebris  
Calle Lancelotti Rodríguez, 7, Edificio El Cid, 2ª Planta  
36003 SANTA CRUZ DE TENERIFE

Salamanca, 18 Septiembre 2006

Ref. Laboratorio: PH060

Muestra	Fecha	$\delta^{18}O_{SMOW}$ ‰	$\delta^2H_{SMOW}$ ‰	$\delta^{18}O_{SMOW}$ ‰	$\delta^2H_{SMOW}$ ‰		
TF-3	26/06/06	14.13	-24.5	0.2	17908.221	-0.30	0.12
TF-10	26/06/06	14.26	-36.2	0.9	17906.511	-0.44	0.26
TF-11	26/06/06	14.59	-37.8	0.4	17906.930	-0.29	0.17
TF-13	26/06/06	15.22	-12.6	0.9	17908.930	-0.87	0.15
TF-14	26/06/06	15.43	-25.4	0.2	17906.416	-0.62	0.23
TF-23	26/06/06	16.08	-25.4	0.4	17906.448	-0.45	0.22
TF-26	26/06/06	16.54	-22.4	0.3	17908.632	-0.22	0.32
TF-28	26/06/06	17.17	-53.0	0.6	17906.932	-7.37	0.18
TF-43	26/06/06	17.40	-34.7	0.4	17906.731	-0.60	0.18
TF-45	26/06/06	18.03	-51.8	0.4	17908.731	-7.17	0.34
TF-47	26/06/06	18.26	-42.1	0.2	17906.930	-0.33	0.42

**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
SERVICIO GENERAL DE ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES  
E-37002, Salamanca  
Tél: (+34) 923 294500, Extensión 1848  
FAX: (+34) 923 294514  
C.I.F. Q-37-18891-E

Dir. Isabel Fernández de la Riva  
Jefe de la Secc. de Plasmáticas Isotópicas  
Centro Sector de Aguas  
Calle de Tenebris  
Calle Lancelotti Rodríguez, 7, Edificio El Cid, 2ª Planta  
36003 SANTA CRUZ DE TENERIFE

Salamanca, 26 Mayo 2007

Ref. Laboratorio: PH067

Muestra	Fecha	$\delta^{18}O_{SMOW}$ ‰	$\delta^2H_{SMOW}$ ‰	$\delta^{18}O_{SMOW}$ ‰	$\delta^2H_{SMOW}$ ‰		
110	26/5/07	14.23	-11.8	0.7	271457.236	-3.20	0.19
217	26/5/07	14.48	-48.9	0.3	271457.336	-7.48	0.16
319	26/5/07	15.11	-10.2	0.3	271457.336	-2.21	0.42
427	26/5/07	15.34	-45.4	0.3	271457.436	-5.07	0.35
10-10 prima	26/5/07	15.36	-34.4	0.4	271457.436	-4.89	0.30
10-11 prima	26/5/07	16.19	-34.7	0.4	271457.536	-5.18	0.26
10-13 prima	26/5/07	16.62	-6.1	0.1	271457.537	-3.39	0.19
10-14 prima	26/5/07	17.05	-23.3	0.3	271457.637	-4.40	0.18
10-23 prima	26/5/07	17.28	-22.8	0.4	271457.638	-3.98	0.13
10-28 prima	26/5/07	17.51	-45.3	0.4	271457.738	-5.36	0.20
10-43 prima	26/5/07	18.14	-55.7	0.6	271457.739	-5.82	0.25

Las aguas subterráneas en la **Directiva Marco de Aguas:** programas de seguimiento en **Tenerife**

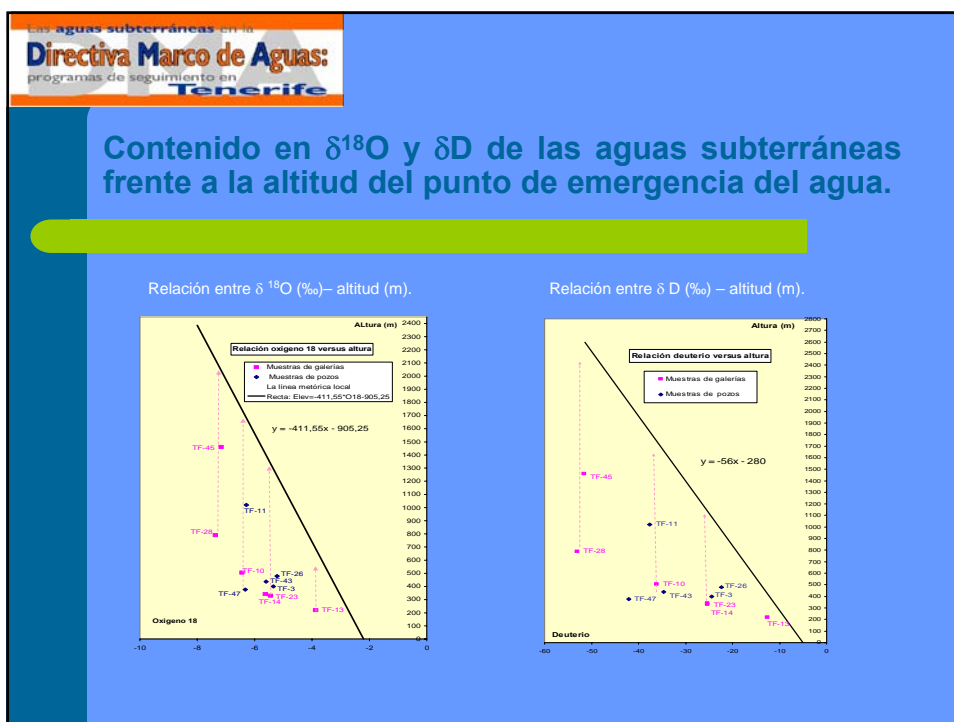
## Relación de las desviaciones isotópicas $\delta^{18}O$ y $\delta^2H$ . Recta de ajuste para campaña de junio 2006.

Los resultados de oxígeno-18 respecto al estándar V-SMOW en las aguas subterráneas de Tenerife oscilan entre -3,87 y -7,37 ‰, mientras los valores de deuterio oscilan entre -12,6 y -53,0 ‰.

- La ecuación de la recta de ajuste de las desviaciones isotópicas de las aguas subterráneas de Tenerife obtenida se puede expresar como:
 
$$\delta_D = 8 \cdot \delta^{18}O + 19$$
- Los puntos muestreados TF-3, TF-13, TF-14, TF-23 y TF-26 siguen una recta meteorológica clásica de pendiente 8, con un exceso de deuterio en el entorno de **+19**.
- Se observa que los puntos TF-10 y TF-11, siguen una recta meteorológica de pendiente 8, con un exceso de deuterio en el entorno de **+14**.
- Los puntos TF-28, TF-45 y TF-47 presentan valores muy negativos, indicativos de la zona de recarga de Las Cañadas (> 2.000 m), con posible interferencia de la actividad volcánica.







Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

#### 4. TÉCNICAS HIDROGEOLÓGICAS BASADAS EN EL CONTENIDO EN TRITIO. BREVE INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

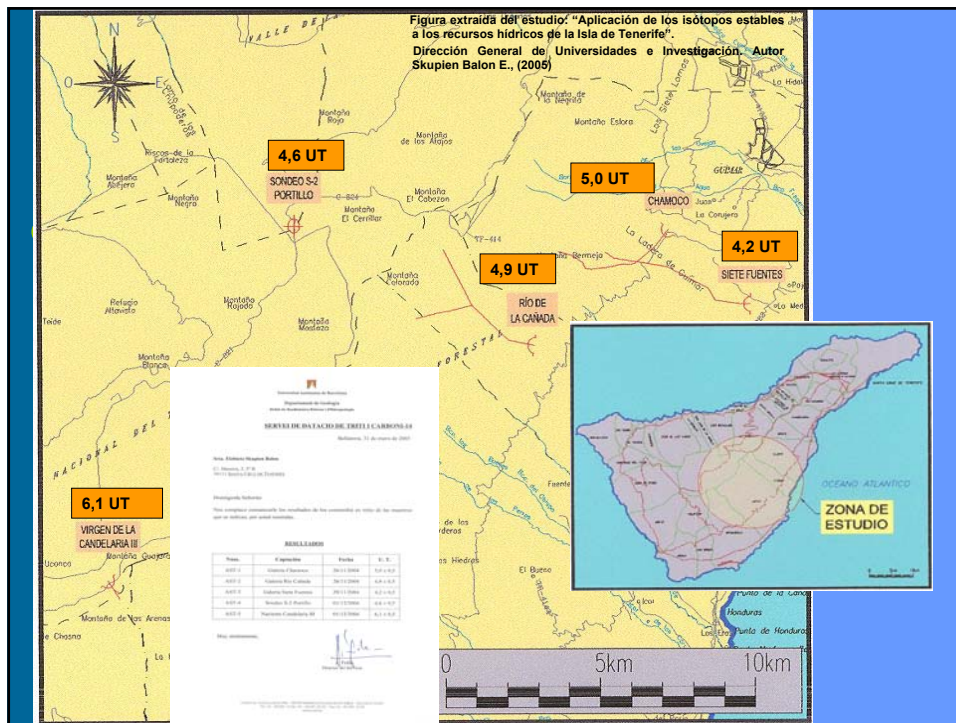
- El tritio ( $^3\text{H}$ ) es un isótopo del hidrógeno. Se desintegra con un periodo de semidesintegración de 12,43 años. Su medición se expresa en unidades de tritio (UT) o Bq/l (1Bq/l = 8,47 UT).
- El tritio existente en la atmósfera tiene dos orígenes distintos (IAEA, 1983):
  - Origen natural de procedencia cosmogénica, formado a partir de reacciones de activación neutrónica y protónica, así como a reacciones fotónicas debidas al bombardeo de átomos de  $^{14}\text{N}$  y  $^{16}\text{O}$  por la radiación cósmica.
  - Origen antropogénico procedente de pruebas nucleares en la atmósfera. También se produce como residuo de la industria de generación electronuclear.
- Hasta el año 1950 la procedencia de tritio existente en la atmósfera era exclusivamente de origen natural. Sin embargo, a partir de las primeras explosiones nucleares significativas (a partir del año 1952 y, sobre todo, en los años 1961 y 1962 cuando se realizó el mayor número de detonaciones nucleares atmosféricas), se registró un aumento considerable de la concentración de tritio en las precipitaciones hasta aproximadamente 1.000 veces superior respecto al valor natural.
- En las islas oceánicas existe un importante efecto de dilución por vapor marino, pobre en tritio. Según estimaciones de Plata (1978), el contenido de tritio ascendió en las Islas Canarias en el periodo 1963-1964 solamente hasta 300 UT.

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
Tenerife

#### Técnicas hidrogeológicas basadas en el contenido en tritio. Breve introducción teórica (cont.).

- Existe una gran diferencia entre la concentración de tritio en el hemisferio norte y en el hemisferio sur debido a que la mayoría de las explosiones nucleares han sido realizadas en aquél. Sin embargo, aparte de este hecho, existen numerosos factores que influyen en la cantidad de tritio que puede encontrarse en un lugar u otro. Entre estos factores destacan principalmente:
  - Situación geográfica.
  - Latitud.
  - Efecto de continentalidad.
  - Efecto de dilución.
- De forma resumida se puede considerar que el mayor contenido de tritio se halla en aquellas zonas que están a mayor altitud, más alejadas del ecuador y más alejadas del mar.
- Existen otros factores locales que influyen en la concentración del tritio como, por ejemplo, las variaciones estacionales, mensuales y anuales. También la intensidad de cada precipitación afecta a la cantidad de tritio existente en una zona concreta, ya que el contenido de tritio en la atmósfera no es constante en el tiempo (se producen ciclos anuales que tienen un máximo en primavera y verano y un mínimo en invierno, cuyo origen se relaciona con el intercambio de masas de aire entre la troposfera y la estratosfera).





Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Interpretación de los resultados.

- En ninguna de las captaciones muestreadas en junio 2006 se detecta la presencia de tritio en concentraciones significativas.
- La ausencia de tritio o valores  $< 0,5$  UT es indicativo de tiempos de renovación superiores a 50 años (aguas de origen de la era prenuclear, posiblemente con mezclas de aguas más recientes), con circulación lenta en el acuífero y/o largas distancias a lo largo de las líneas de flujo, y posibilidad de estratificación (en los niveles superiores del acuífero pueden localizarse valores más altos que en las zonas profundas como consecuencia de la existencia de vías preferentes por discontinuidades y macroporos que acortan el tiempo de tránsito a través de la zona no saturada).
- No obstante, el sustrato geológico permite, en general, una permeabilidad vertical muy superior a la horizontal, siendo en el acuífero donde se producen las mezclas de aguas y, por lo que parece, se dispone de tiempo suficiente para ello en la mayoría de los casos.
- Por lo tanto, las aguas alumbradas en las captaciones mencionadas se corresponden con aguas recargadas hace décadas mezcladas con aguas posiblemente más recientes, lo que indicaría que se están extrayendo una parte de las reservas, no compensadas con la renovación natural de los recursos hídricos, que se localizarían en las zonas superiores del embalse subterráneo.
- La campaña de muestreo de febrero 2007 ha permitido detectar tritio en tres captaciones: Naciente Candelaria III, Naciente Teno, y en la Galería Encarnación y Santa Ursula (1,2 a 1,5 UT).

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## Interpretación de los resultados (cont.).

- Las concentraciones de tritio halladas en las aguas subterráneas de Tenerife en ambas campañas de muestreo guardan relación con la distribución espacial de los puntos de muestreo. Así, las muestras que presentan mayores contenidos de tritio (1,2-1,5 UT) corresponden a las muestras obtenidas en nacientes (localizados en Teno y Las Cañadas del Teide), cuyas aguas corresponden a la infiltración del agua de lluvia recargada en la superficie y que ha atravesado una zona no saturada de poco espesor.
- Por otro lado, se observa que las concentraciones de tritio disminuyen (valores  $< 0,5$  UT) en las muestras obtenidas en los sondeos o pozos profundos y galerías con importante espesor de zona no saturada.
- Para la interpretación del tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas extraídas en pozos y galerías se ha utilizado un modelo exponencial o de mezcla total en el acuífero referido a la concentración de tritio obtenido en las aguas subterráneas (Poncela et al., 1992 y 2006; Skupien, 1998), de acuerdo con los criterios de aplicación. Según este modelo interpretativo, para Tenerife se tiene obtienen las siguientes correlaciones:

$< 0,5$  UT- Aguas submodernas recargadas anteriormente a 1957.  
 $0,5 - 1,5$  UT- Mezcla entre submodernas y recarga actual.  
 $> 1,5$  UT Aguas modernas ( $< 5$  a 10 años).

Las aguas subterráneas en la  
**Directiva Marco de Aguas:**  
programas de seguimiento en  
**Tenerife**

## 5. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO COMPLEJO EN LAS MASAS DE AGUA DE TENERIFE.

- La interpretación del contenido de tritio en las aguas subterráneas de las masas TF001 y TF002 permite caracterizar la presencia de al menos dos sistemas regionales principales de flujo:
  - > Aguas profundas con circulación lenta y/o largas distancias a lo largo de las líneas de flujo, con posibilidad de estratificación y mezclas locales, con tiempos de residencia superior a 50 años (incluso superior).
  - > Aguas modernas y/o recientes con circulación rápida y corto tiempo de tránsito.
- El comportamiento de los isótopos estables ( $^{18}\text{O}$  y D) indica diferentes áreas de recarga que, en conjunto, pueden agruparse en dos grupos principales:
  - > Un primer grupo definido con una recta meteórica local de pendiente 8 y exceso de deuterio **+19** (Zona Anaga y Dorsal NE) y,
  - > Un segundo grupo con pendiente 8 y exceso de deuterio **+14** (Zona Sur).