



# PLAN HIDROLÓGICO DE TENERIFE

## ANEJO 7. MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

## ESTUDIO AMBIENTAL ESTRATÉGICO

### MEMORIA

#### ANEJOS

1. Planos
2. Relación con otros planes
3. Fichas de Evaluación Ambiental detallada
4. Fichas de Caracterización Ambiental de las ARPSIS
5. Ley 4/2010, de 4 de junio, del Catálogo Canario de Especies Protegidas

## MEMORIA DEL PROYECTO DE PLAN

### MEMORIA

#### ANEJOS

1. Planos
2. Programa de Medidas
3. Fichero de Masas de Agua
  1. Masas de Agua Superficiales Costeras
  2. Caracterización Adicional de las Masas de Agua Subterránea
4. Inventario de Captaciones de Aguas Subterráneas y de Comunidades y Entidades de Gestión del Agua
5. Fichero de Exenciones al Cumplimiento de Objetivos. Resumen de Medidas Vinculantes
6. Modelo de Hidrología de Superficie
7. Modelo de Flujo Subterráneo
8. Actualización del Plan Hidrológico
9. Documento de Participación Pública y Consultas

## NORMATIVA DEL PROYECTO DE PLAN

### NORMAS

#### ANEJOS

1. Fichero de Ámbitos para la Implantación de Infraestructuras Hidráulicas
2. Fichero de Sistemas Territoriales de Infraestructuras Hidráulicas
  1. Sistemas Territoriales de Infraestructuras para el suministro de Agua de Mar Desalada
  2. Sistemas Territoriales de Infraestructuras para el suministro de Agua Salobre Desalinizada
  3. Sistemas Territoriales de Infraestructuras para el suministro de Agua Regenerada
  4. Sistemas Territoriales de Infraestructuras de Abastecimiento
  5. Sistemas Territoriales de Infraestructuras de Saneamiento
  6. Sistemas Territoriales de Infraestructuras para el suministro de Agua para Riego
  7. Sistemas Territoriales de Infraestructuras para la Producción Hidroeléctrica
  8. Catálogo de Infraestructuras Hidráulicas
3. Red Básica de Transporte del Agua
4. Listado de Registros de Riesgo
5. Listado de Zonas Susceptibles de Riesgo Hidráulico
6. Criterios Adicionales para la Identificación de Infraestructuras Esenciales-Estratégicas
7. Zonificación Hidrogeológica
8. Unidades de Demanda
9. Aglomeraciones Urbanas (Directiva 91/271)
10. Delimitación de las Masas de Agua Superficiales y Subterráneas
11. Condiciones de Referencia, Límites de Cambio de Clase, y Normas de Calidad Ambiental para la Evaluación del Estado de las Masas de Agua

## ÍNDICE

**MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO (MFS).....2**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de permeabilidad (K, en cm/d) de la capa superior del MFS de la isla de Tenerife. .... 2

## MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO (MFS)

Desde 1991 el CIATF dispone de un Modelo de simulación del Flujo Subterráneo (MFS) de Tenerife, construido a partir del esquema hidrogeológico e hipótesis de funcionamiento actuales del sistema acuífero insular. El MFS ha permitido comprobar que las hipótesis de funcionamiento hidrogeológico son en conjunto correctas y su calibración en régimen transitorio permite disponer de un instrumento de pronóstico del funcionamiento del acuífero ante futuras situaciones de explotación de las aguas subterráneas. Además, cuantifica los términos del balance hídrico subterráneo, el flujo al mar y la variación de las reservas, tanto para el período histórico como para las prognosis de futuro.

La modelización matemática del sistema se realiza sobre una discretización de la isla en 2.188 celdas de 1 km de lado que en la vertical se dividen en cuatro capas. A cada celda se le asignan datos de tipo geométrico, geohidrológicos e hidrológicos. El MFS es objeto continuo de validación y actualización por parte del CIATF, que permite la incorporación de nuevos datos, la actualización de los datos de extracción y medidas directas, en zonas concretas, de la posición y variación del nivel freático, entre otros.

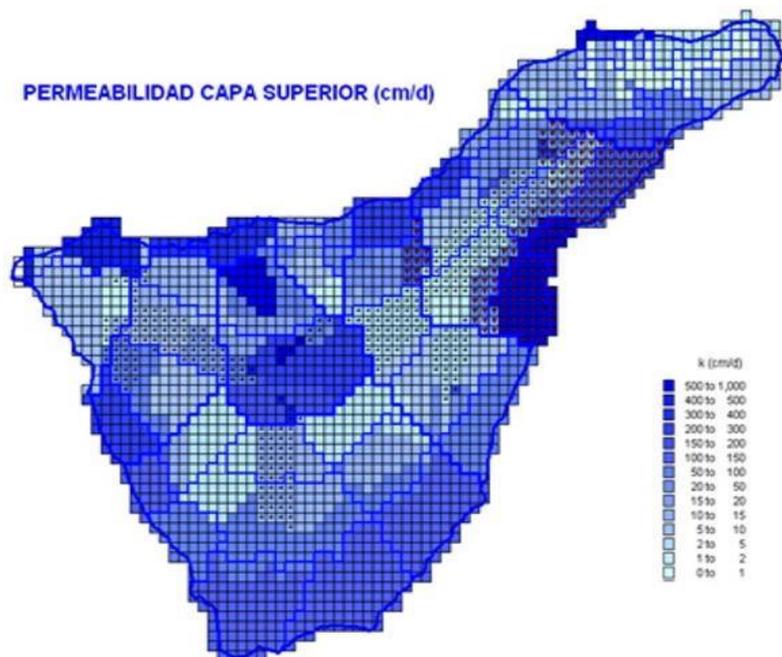


Figura 1. Mapa de permeabilidad (K, en cm/d) de la capa superior del MFS de la isla de Tenerife.

El modelo conceptual en que se basa el MFS parte del supuesto de que el flujo subterráneo de la isla se produce en un sistema acuífero único, el cual recibe como aportes hídricos la recarga de la lluvia y el retorno de riegos y acusa como salidas el flujo al mar y las extracciones de las explotaciones mediante galerías y pozos. Si se producen excedentes se acumulan en las reservas del acuífero; si por el contrario, las salidas superan a las entradas, como viene sucediendo desde hace varias decenas de años, el déficit se cubre detrayendo reservas al sistema. La recarga obtenida con el MFS es uno de los datos de entrada en las celdas del MFS.

Con la finalidad de mostrar en detalle el funcionamiento y estructura del MFS, al final de este anexo se incluye el documento más reciente elaborado al respecto: Revisión crítica de la modelación de la simulación del flujo subterráneo de Tenerife. Líneas de trabajo a futuro (Surge, 2016).

A continuación, se incluye el listado de los documentos, publicaciones y ponencias en jornadas divulgativas acerca del MFS disponibles para consulta en el CIATF:

**Documentos:**

- Modelo de flujo del agua subterránea de la isla de Tenerife (1991)
- Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la isla de Tenerife (2002)
- Análisis de la viabilidad de validar el modelo de simulación del flujo subterráneo 2002 (mFS-02), tras la incorporación de los nuevos datos disponibles (2008)
- Servicio para simular la evolución del sistema acuífero, periodo 2004-2040 usando el modelo del flujo subterráneos (MFS) (2011)
- Revisión crítica de la modelación de la simulación del flujo subterráneo de Tenerife. Líneas de Trabajo a futuro (2016)

**Publicaciones:**

- Información básica para instrumentar la simulación del comportamiento del sistema acuífero de Tenerife mediante un modelo matemático (V Simposio de Hidrogeología. Tomo XVII, pp. 135-150; Farrujia, I., Braojos, J.J. y Delgado, P.; 1992)
- Un nuevo modelo de simulación del flujo en la isla de Tenerife (V Simposio de Hidrogeología; Tomo XVII, pp. 119-134; López, L., Fernández, J. y Anguita, F.; 1992)

**Jornadas divulgativas:**

- Modelo de hidrología subterránea: Revisión (Jornadas sobre impactos del cambio climático en la hidrología de las Islas Canarias; López García, L.; 2005)
- Modelo de hidrología subterránea: Aspectos cuantitativos y cualitativos (Jornadas sobre impactos del cambio climático en la hidrología de las Islas Canarias; Farrujia de la Rosa I.; 2005)
- Modelos de hidrología superficial y subterránea (I Jornadas de Ingeniería Civil; Delgado Melián, P., Farrujia de la Rosa, I.; 2013)
- Modelo de simulación de flujo subterráneo (Estado cuantitativo de las masas de agua subterráneas de Tenerife; López García, L.; 2016)



**Revisión crítica de la modelación de la simulación del flujo subterráneo de Tenerife.  
Líneas de trabajo a futuro**

---

mayo 2016

## índice

---

### MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	1
2	RESUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	2
3	ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MSFS.....	3
3.1	Modelo conceptual y estructura del MSFS .....	3
3.2	Datos del modelo actual .....	5
3.2.1	Datos geométricos .....	5
3.2.2	Datos hidrogeológicos.....	6
3.2.3	Datos de recarga .....	8
3.3	Resultados del modelo .....	9
3.3.1	Introducción .....	9
3.3.2	Planteamiento del análisis: balance de la Isla completa.....	10
3.3.3	Análisis general por sectores y zonas .....	13
3.3.4	Análisis de sectores representativos de distintas tendencias .....	18
3.3.5	Análisis de las variaciones históricas de las recargas y extracciones.....	22
3.4	Balance hídrico.....	27
3.5	Mejora de la metodología numérica del MSFS .....	33
3.6	Discretización de la malla del MSFS .....	34
4	POSICIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE FREÁTICA .....	35
5	CONVENIENCIA DE RECALIBRAR EL MODELO .....	36
6	DESARROLLO DE MODELOS DETALLADOS DE ZONAS DE INTERÉS .....	40
7	POSIBILIDAD DE DESARROLLO DE UNA INTERFAZ ACCESIBLE PARA UN USUARIO NO EXPERTO.....	40
8	JORNADA TÉCNICA DIVULGATIVA DEL 6 DE ABRIL DE 2016 .....	43
9	CONCLUSIONES .....	46

9.1	Conclusiones generales .....	46
9.2	Conclusiones particulares sobre la estabilización de niveles .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.-	Balance general 1925-2300 de la Isla .....	12
Figura 2.-	Diferencia de nivel 2200-2300 (gráfico superior; azul, suben, rojo, bajan, fondo gris variación menor de 0.5 m) y diferencia de gradiente hidráulico 2200-2300 (gráfico inferior; azul gradiente creciente, amarillo decreciente, fondo gris variación menor de 0.01%).....	14
Figura 3.-	Balances 1925-2300 de sectores donde aumentan las reservas: 604, Valle Orotava - Fasnía: Medianías vertiente Sur (gráfico superior) y 723, Dorsal NE Oriental: Medianías y cumbres vertiente Sur (gráfico inferior).....	20
Figura 4.-	Balances 1925-2300 de sectores donde disminuyen las reservas: 303, Las Cañadas – Icod - La Guancha: Anfiteatro Las Cañadas (gráfico superior) y 713, Dorsal NE Occidental: Medianías y cumbres vertiente Sur (gráfico inferior) .....	21
Figura 5.-	Evolución de reservas totales en la Isla y los sectores 303, 604, 713 y 723.....	22
Figura 6.-	Isla completa: medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación global (abajo) .....	25
Figura 7.-	Sector 701, Dorsal NE Occidental: Medianías y cumbres vertiente Sur: medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación (abajo) .....	25
Figura 8.-	Sector 521A, Macizo de Tigaiga Oriental - Porción fuera de Masa TF 004: medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación (abajo).....	26
Figura 9.-	Zonificación actual: sectores y subsectores de agua subterránea .....	29
Figura 10.-	Zonificación actual: masas de agua subterránea.....	30
Figura 11.-	Tablas de balance en periodos determinados: ejemplo de sectores.....	31
Figura 12.-	Tablas de índice de explotación de las masas y la Isla en periodos determinados .....	31
Figura 13.-	Pantalla de selección del sector, zona, masa y periodo a representar en los gráficos .....	32

Figura 14.- Gráfico de balance de una masa de agua subterránea .....	32
Figura 15.- Extracciones en la Isla: previstas y reales 2005-2014 (hm <sup>3</sup> /a).....	39
Figura 16.- Esquema operativo de la aplicación propuesta .....	43
Figura 17.- Convocatoria de la Jornada Técnica Divulgativa .....	44
Figura 18.- Ejemplos de diapositivas de la presentación .....	45
Figura 19.- Evolución de reservas totales en la Isla y los sectores 303, 604, 713 y 723..	48

### **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Balance de la Isla en años seleccionados .....	13
Tabla 2.- Balance resumido de las zonas en 2300 .....	16
Tabla 3.- Balance resumido de los sectores en 2300 .....	17
Tabla 4.- Modificaciones en la zonificación .....	28

## memoria

---

### 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo de este servicio, según se especifica en el contrato de fecha 12 de noviembre de 2015 es hacer una revisión crítica de la modelación de la simulación del flujo subterráneo de Tenerife realizada hasta ahora e identificar los aspectos que se deberían mejorar o modificar y valorar si en el momento actual se pueden y deben abordar dichas tareas.

Para ello, se han revisado los trabajos realizados anteriormente sobre el modelo de flujo subterráneo de la Isla —en adelante citado como MSFS, usando la terminología habitual del CIATF—, desde 1991 hasta 2011.

Además, se ha actualizado la división en sectores y subsectores hidrogeológicos, modificada después del 2011 en el documento Normativa del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Tenerife (art. 114 del Doc. Normas, BOC nº 85 de 6 de mayo de 2015 del PHDHT). Como consecuencia, ha sido necesario repetir las nueve simulaciones de futuro analizadas en 2011 y sus balances por masas de agua subterránea, zonas y sectores.

Esta revisión crítica parte del análisis de los informes de los trabajos realizados en 1992, 2002, 2008 y 2011 titulados:

- “Modelo de flujo del agua subterránea”, Plan Hidrológico Insular (elaborado a través de un convenio entre el Gobierno de Canarias y el Cabildo de Tenerife), 1992
- “Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la Isla de Tenerife”, Consejo Insular de Aguas, Cabildo de Tenerife, junio de 2002
- “Análisis de la viabilidad de validar el modelo de simulación del flujo subterráneo 2002 (MFS-02), tras la incorporación de los nuevos datos disponibles”, Consejo Insular de Aguas, Cabildo de Tenerife, marzo de 2008
- “Servicio para simular la evolución del sistema acuífero, periodo 2004 - 2040, usando el modelo de flujo subterráneo (MFS)”, Consejo Insular de Aguas, Cabildo de Tenerife, enero de 2011

También se han revisado y corregido —para introducir la nueva delimitación de sectores y subsectores hidrogeológicos— los programas de simulación numérica (versión

personalizada para Tenerife del estándar actual, el Modflow del U.S. Geological Survey) y de realización de balances por sectores y zonas desarrollado inicialmente en 1992.

## 2 RESUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

Han sido los especificados en el contrato, que se resumen así:

- **En relación con el MSFS**

- ✓ Datos del modelo actual: se han revisado los datos del modelo (modelo conceptual, mallado, datos hidrogeológicos, recargas, extracciones...), los datos brutos disponibles en cada una de las actualizaciones, los criterios de síntesis y elaboración y su mejora a lo largo del tiempo. Sobre todo, se ha valorado, conjuntamente con los técnicos del CIATF, la posibilidad de mejora a corto y medio plazo
- ✓ Resultados del modelo: se explican algunos problemas que han suscitado dudas, particularmente el aumento del flujo al mar —a pesar de que los niveles bajan— o la dificultad para lograr la estabilización a largo plazo. En este apartado se analizan los aspectos del MSFS que generaron mayor controversia, en el proceso de participación pública del PHT recientemente aprobado.
- ✓ Balance hídrico: se han recalculado los balances hídricos subterráneos, a nivel de masa de agua y sector hidrogeológico, para los años 2012, 2015, 2018, 2021, 2024 y 2027; así como balances medios de los periodos 1925—2005, 2005—2015.
- ✓ Mejora de la metodología numérica: se ha analizado la posibilidad de mejorar la metodología numérica del MSFS.
- ✓ Discretización: se comentan las posibilidades de mejora a través de una reducción de la malla, tanto en planta —bajando a los 200x200 m del modelo de hidrología de superficie— como en la subdivisión de las capas.

- **Posición y evolución de la superficie freática**

- ✓ Se ha estudiado la viabilidad de correlacionar numéricamente la disminución de caudales de las galerías con una hipotética variación de la carga hidráulica en los frentes. Como consecuencia, se hacen recomendaciones sobre una eventual revisión de las isopiezas históricas de 1925, 1985 y 1997 y de realización de unas nuevas para 2015

- **Interfaz accesible para un usuario no experto**

- ✓ Se discuten las posibilidades de desarrollo de una herramienta que permita el uso del MSFS a los técnicos del CIATF y se valora aproximadamente su coste
- **Conveniencia de recalibrar el modelo**
  - ✓ Se discuten las razones que podrían aconsejar una recalibración y se hacen propuestas a la vista de los datos disponibles en el momento actual
- **Jornada Técnica Divulgativa**
  - ✓ Tal como especificaba el contrato, antes de la redacción del informe final, el 6 de abril de 2016 se participó en una Jornada Técnica Divulgativa, organizada por el CIATF. En los materiales entregados al concluir este informe se incluye la presentación realizada

### **3 ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MSFS**

#### **3.1 Modelo conceptual y estructura del MSFS**

Antes de describir la revisión de los aspectos exigidos en el contrato del servicio, es conveniente recordar la estructura actual del modelo. El texto se ha extraído directamente de los informes del modelo original de 1991 y las actualizaciones realizadas en 2002, 2008 y 2011.

En concreto, en el informe de 2008 se decía:

*El modelo conceptual del acuífero supone que recibe sus recursos de la infiltración del agua de lluvia —supuesta variable a lo largo del tiempo—, y de los excedentes o retornos de riego, que generalmente se producen en las zonas costeras. Estos recursos salen al mar, en volumen definido por el gradiente hidráulico y la permeabilidad, o se extraen por galerías y pozos. Cuando hay excedentes, se acumulan en las reservas del acuífero, y cuando hay déficit, estas reservas proporcionan el agua necesaria.*

*La estructura geológica de la isla condiciona notablemente el flujo de agua subterránea. En primer lugar, existe el llamado zócalo impermeable, que limita el acuífero en profundidad. Los ejes estructurales rompen el zócalo y determinan una dirección preferente de flujo en el sentido de la intrusión de los diques. Por otra parte, hay unas zonas, llamadas genéricamente de mortalón, en las que la capa impermeable correspondiente a este tipo de formación separa el acuífero superior libre del inferior confinado. Por último, hay unas zonas, llamadas de baja permeabilidad, que se han introducido para resolver la contradicción de la presencia de nivel de agua en cotas inferiores al zócalo impermeable.*

*El modelo simula el acuífero mediante una malla cuadrada de 1 km de lado, que en vertical se divide en cuatro capas, numeradas de arriba abajo, que en algunas zonas de la isla representan particularidades litológicas o hidrogeológicas. Los criterios para situar las capas — que se sustituyen por una asignación arbitraria en las zonas en que no se presenten las formaciones singulares que se citan a continuación — son los siguientes:*

- En las zonas donde hay mortalones con materiales explotables por debajo de ellos, la capa 1 se reserva para simular los materiales situados por encima; en este caso se considera que el fondo de esta capa es impermeable, como corresponde a la realidad de estas formaciones. A su vez, las capas 2 y 3 representan los materiales situados entre los mortalones y el zócalo impermeable que pueden ser explotados por pozos o galerías.*
- En las zonas donde hay materiales de baja permeabilidad se reserva la capa 3 para representarlos. Por lo tanto el techo de la capa 3 y fondo de la capa 2 coincide con la parte superior de las formaciones de baja permeabilidad, y el fondo de la capa 3 con el zócalo impermeable.*
- La capa 4 se utiliza para representar los materiales profundos situados en las zonas de ejes estructurales y se prolonga artificialmente puesto que se supone que la intrusión de diques rompe el zócalo impermeable en estas zonas.*

*La única condición de contorno es el nivel impuesto igual a cero a las celdas costeras.*

Por otra parte, el objetivo, montaje y funcionamiento del modelo se resume así:

1. Objetivo del modelo de simulación del flujo subterráneo: reproducir el funcionamiento del acuífero a lo largo del tiempo, pasado o futuro, para determinadas condiciones de recarga, retorno de riegos y extracciones. El modelo se ajustó mediante la calibración del periodo 1925-97 del informe 2008, modificando  $k$ ,  $S$  y otros parámetros hasta ajustar a las superficies freáticas de 1985, 1997 y niveles en pozos y piezómetros hasta 2007.
2. Numéricamente aplica a cada celda las ecuaciones del flujo donde la incógnita es el nivel piezométrico y resuelve el sistema de ecuaciones para conseguir balance aceptable (error mínimo) en todas las celdas.

3. Obtiene niveles piezométricos en cada celda, capa e intervalo<sup>1</sup>.
4. Con esos niveles y las permeabilidades y cotas de muro y techo de cada celda se obtiene el balance por sectores hidrogeológicos y, a partir de él, el de zonas y masas

Una vez calibrado el modelo, con la máxima precisión posible, si es aceptable como es el caso del MSFS, se admite que es el instrumento que mejor representa el acuífero en ese momento, ya que incluye todo el conocimiento que se tiene sobre él. Concluido el ajuste, se utiliza el modelo para simular las previsiones de futuro y analizar sus resultados.

### 3.2 Datos del modelo actual

#### 3.2.1 Datos geométricos

Son los que definen las cotas de muro y techo de las estructuras geológicas e hidrogeológicas simuladas en el modelo. En esencia son la cota del zócalo impermeable, la extensión en planta y azimut de los ejes estructurales de la Isla, la situación y cotas de muro y techo de los mortales y la situación y cotas de las llamadas zonas de baja permeabilidad, introducidas en el modelo en 2002 para resolver el problema de la existencia de agua en materiales teóricamente impermeables (por debajo del zócalo).

- Zócalo impermeable: se estableció aproximadamente en 1991 y se corrigió en 2002 porque se disponía de datos más precisos: *“En cuanto a la estructura hidrogeológica, ahora se conoce con cierta precisión la posición del zócalo impermeable, que se establecía cualitativamente en el MOD-92, y también la extensión y espesor aproximado de los mortales del NE de la Isla.”*

Desde entonces no se han realizado modificaciones significativas. En la actualidad, no hay nuevos datos que aconsejen la revisión del zócalo.

- Ejes estructurales: la situación y azimut de la anisotropía principal se fijaron con la información disponible en 2002 (apartado 5.1 del informe). No se han modificado posteriormente ni hay en la actualidad datos que aconsejen corregirlos. Ya en 1991 se indicaba que *“las zonas supuestas anisótropas, corresponden a los tres ejes es-*

---

<sup>1</sup> En la vertical de cada punto del modelo se encuentran tres o cuatro celdas —según que sea una zona de tres o cuatro capas y en cada una se calcula un nivel piezométrico que puede ser ligeramente diferente para reflejar el flujo vertical que se produce en ciertas zonas de la Isla

*estructurales NW, NE y NS, al eje NS de la zona de Fasnia, y a una zona de diques NS de Santiago del Teide, en el extremo NW. Se observa que en las zonas de confluencia de los ejes estructurales principales (Cañadas) y del eje NE con el NS de Fasnia, se supone isotropía producida por la inyección de diques en distintas direcciones”.*

- Mortalones: se introdujeron también en el modelo de 2002, aunque en el 2008 se revisó; *“la extensión del mortalón de los Rodeos, que, a la vista de nuevas evidencias hidrogeológicas, debe recortarse algo en su extremo noroeste”.*

En la actualidad no hay nueva información para modificar la extensión o cota de los mortalones representados en el modelo.

- Zonas de baja permeabilidad: se aplicaron en el modelo de 2002, al introducir el nuevo zócalo para dar al modelo la capacidad de extraer agua por debajo del zócalo impermeable, necesaria para reflejar las galerías existentes en esas zonas. Son las de Cañadas bajo el complejo Teide-Pico Viejo, Vilaflor, por el borde sur de las Cañadas, sectores 411,421 y 431, y Roque del Conde en los sectores 422 y 423.

No existe nueva información sobre zonas de baja permeabilidad.

### 3.2.2 Datos hidrogeológicos

Son la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento. En cualquier modelo se parte de las estimaciones de estos parámetros realizadas en el análisis de los ensayos de bombeo que se asignan a las unidades hidrogeológicas similares a las de los pozos y se ajustan en la calibración del modelo.

Debe recordarse que la permeabilidad obtenida en un ensayo de bombeo no es un valor preciso sino que puede variar según el método usado. Por otra parte, representa la permeabilidad en los alrededores del pozo y los piezómetros donde se mide la variación de niveles durante el ensayo, por lo que las estimaciones obtenidas tampoco se pueden considerar directamente representativas de la permeabilidad media de la celda, que es el valor aplicado al modelo, con celdas de 1x1 km en el caso del MSFS. En Tenerife, no existen métodos de estimar la permeabilidad a partir de los caudales drenados por las galerías y no existen ensayos en los pozos costeros o en los interiores de Los Rodeos.

Dado que en Tenerife no es habitual disponer de datos de ensayos de bombeo, puesto que generalmente no se dispone de piezómetros de control próximos al punto de extracción, no sería necesario añadir esta consideración, pero es conveniente recordar que la estimación del coeficiente de almacenamiento a través de ensayos de bombeo

es muy poco fiable por lo que, en general, el valor aplicado en un modelo es el obtenido en la calibración.

- Permeabilidad:

- ✓ En 1991 ante la inexistencia de estimaciones sobre su valor, se partió de una primera aproximación, celda a celda, por simple cálculo aritmético apoyado en la ley de Darcy, la piezometría inicial, el zócalo y la recarga por infiltración directa. Estos valores se reajustaron en la calibración, con un criterio muy laxo, simplemente numérico, que permitía cambiar valores en celdas individuales atendiendo a las necesidades del ajuste.
- ✓ En 2002 se revisaron los criterios de ajuste usando un criterio más hidrogeológico por el que *“se impiden los cambios de permeabilidad o coeficiente de almacenamiento en celdas individuales, en la idea de que los sectores hidrogeológicos utilizados habitualmente por el CIATFE para sus análisis responden a características más o menos homogéneas, por lo que no se deben permitir cambios bruscos de los parámetros; por otra parte, la permeabilidad debe mantenerse en un rango de valores relativos – zonas de mayor o menor permeabilidad - deducidas de los análisis hidrogeológicos llevados a cabo por los técnicos del CIATFE”*.

Para apoyar este criterio se modificó el Modflow de forma que, en lugar de leer directamente la permeabilidad de cada celda, su valor se obtiene por la combinación de tres factores:

1. F(NG) Valores tipo asignados a zonas homogéneas —generalmente correspondientes a los sectores— con excepciones generalmente en los bordes, según pida la calibración. Negativos, en zonas de mortalón, que indica al programa que la permeabilidad vertical es nula.
2. FC(IHY1,K) Factor de anisotropía de la permeabilidad vertical: dato por sector, o isótropo o anisótropo (factor 1.1, 1, 0.9, 0.8 a capas 1, 2, 3 y 4) para tener en cuenta la disminución de la permeabilidad con la profundidad.
3. FA(NZ) Factores permeabilidades principales para reflejar la anisotropía de los ejes,  $Fk_x$ ,  $Fk_y$ ,  $Fk_z$  según zonas (isótropos 1-1-.08), Eje NW principal (1.4-.1-.1) y secundario (1.0-.1-.1), Eje NS (1.0-.1-.1) y NE Alto (2.1-.02-.1) Cañadas (2.6-.2-.1), Fasnía (4.0-.02-.1) y Eje NE Bajo (2.1-.02-.1). 9 zonas, de la 2 a la 9 200, 300...900 + nº grupo).

- ✓ En 2008 sólo se llevó a cabo una recalibración parcial con el foco en la zona de Las Cañadas y Los Rodeos, para mejorar el ajuste de los niveles calculados a los observados en pozos y piezómetros de esas zonas mediante retoques locales de la permeabilidad.
- Coeficiente de almacenamiento: es un parámetro que como se ha dicho, incluso en acuíferos sedimentarios, suele ajustarse en la calibración, por falta de consistencia de las estimaciones realizadas en el análisis de los ensayos de bombeo. En el MSFS, sin ninguna estimación previa, los coeficientes de almacenamiento se han ajustado en la calibración, partiendo de la suposición hidrogeológica razonable de que a mayor permeabilidad corresponde mayor coeficiente de almacenamiento y que los ejes estructurales deben tener un coeficiente relativamente alto. Su orden de magnitud varía entre el 4 y el 25%.

En la actualidad no hay nueva información sobre parámetros hidrogeológicos que aconsejen revisar la calibración del modelo.

### 3.2.3 Datos de recarga

El MSFS considera dos tipos de recarga, la debida a la infiltración del agua de lluvia y la derivada de los retornos del agua aplicada a los riegos, que se estiman por procedimientos diferentes.

- La recarga por infiltración de agua de lluvia es uno de los términos más importantes del balance de la Isla. Es un dato de entrada al modelo que debe estimarse por métodos hidrológicos. El CIATF ha realizado un gran esfuerzo por cuantificarla de la forma más precisa posible y sus estimaciones se han mejorado sistemáticamente.
- ✓ 1991: No había ningún estudio detallado previo, por lo que se recurrió a considerar una recarga anual constante e igual al promedio estimado para la Isla por el Cabildo. *“La infiltración directa, debida a la precipitación, ha sido evaluada como promedio anual, por lo que actúa en la simulación como recarga permanente.”*
- ✓ 2002: se disponía de la primera versión del modelo hidrológico de superficie de 1x1 km de malla, con la que se había calculado la recarga mensual del periodo 1982-92. Esos valores se extendieron al resto del periodo 1925-1997 con unos coeficientes.
- ✓ 2008: el periodo de cálculo de la recarga con el modelo hidrológico se extendió hasta cubrir los años 1944-2005.

- ✓ 2011: se cambió la recarga por las estimaciones para el mismo periodo 1944-2005 realizadas con el nuevo modelo hidrológico de 200 m de malla en el periodo histórico 1944-2005. La media 1944-2005 aumenta de 367.0 a 377.9 hm<sup>3</sup>/a. También se estimó la recarga a utilizar en el periodo 2008-39 en las tres hipótesis de cambio climático de recarga mínima, media y máxima.
- Recarga por infiltración de agua de riegos: se estima a partir de la distribución de las superficies de riego de distintos cultivos y una hipótesis sobre la magnitud de los excedentes.
  - ✓ 1991: se evaluó para 1985 y a cada año se aplicó esa distribución con unos coeficientes globales variables entre un mínimo de 0.563 para 1930 y un máximo de 2.221 en 1970. *“...ha sido evaluado para 1985 en función del uso agrícola y las características físicas de los suelos.”*
  - ✓ 2002: el CITAF modificó *“el coeficiente a aplicar al retorno de 1985 para obtener el correspondiente a cada año. Dicho coeficiente es función de otros tres, que toman en consideración la cuantía de las extracciones, la eficiencia en el sistema de riegos y el porcentaje de agua aplicada al uso agrícola respecto de los restantes usos”*.
  - ✓ 2008: se disponía de *“estimaciones de la recarga por celdas para 1985 – que cambia ligeramente respecto a la usada en el MFS-02 -, para 2004, e incluso para el 2026, que será utilizada en las simulaciones de pronóstico”*.
  - ✓ 2011: no hubo cambios, únicamente se estimó la recarga de riegos para el periodo 2008-39 en las tres hipótesis de cambio climático.
- Extracciones: es el dato mejor controlado por el CIATF, que dispone de los valores extraídos por celda y capa hasta el momento actual.

### **3.3 Resultados del modelo**

#### **3.3.1 Introducción**

Este apartado responde a la exigencia del servicio contratado que, dentro del capítulo Alcance del trabajo dice: *“Se explicarán mejor algunos problemas que han suscitado dudas, particularmente el aumento del flujo al mar —a pesar de que los niveles bajan— o la dificultad para lograr la estabilización a corto plazo...”*. En concreto, dichos problemas surgen de las conclusiones expresadas en el capítulo 5.2 del informe de 2011:

*“Los análisis de los dos tipos de simulaciones, las realistas de futuro para una combinación de recargas y extracciones y las utópicas a largo plazo para recarga constante y extracción nula han permitido extraer las siguientes conclusiones:*

- La estabilización de niveles en la Isla, entendida como su ajuste a la magnitud de la recarga y la extracción es un proceso muy lento del orden de decenas de años, más o menos largo según la diferencia entre la nueva situación y la anterior*
- La tardanza en el ajuste se debe a la inercia del sistema – consecuencia de su estructura y características hidrogeológicas - que se traduce en una lenta modificación de los gradientes hasta igualar la salida al mar a la recarga neta (recarga menos extracción)*
- La única variable susceptible de modificación mediante la gestión del sistema son las extracciones, mientras que la recarga futura es función de la evolución del cambio climático. Por lo tanto, las conclusiones deben orientarse al análisis del efecto de las extracciones sobre la estabilización de niveles*

*En este sentido, se ha comprobado que un porcentaje muy alto de las extracciones procede de las reservas, tanto mayor cuanto menor sea la recarga. Por lo tanto, la reducción de las extracciones es muy eficaz en términos de reducción de la aportación de las reservas, como indica la tabla adjunta que refleja los valores medios de los 32 años de cada periodo”.*

En particular, se hacían algunas alegaciones al Plan Hidrológico en las que se discutían algunas de estas conclusiones. Como consecuencia, se ha procedido a realizar un análisis exhaustivo sobre la posibilidad de estabilización de los niveles al disminuir las extracciones y su relación con las salidas al mar.

### 3.3.2 Planteamiento del análisis: balance de la Isla completa

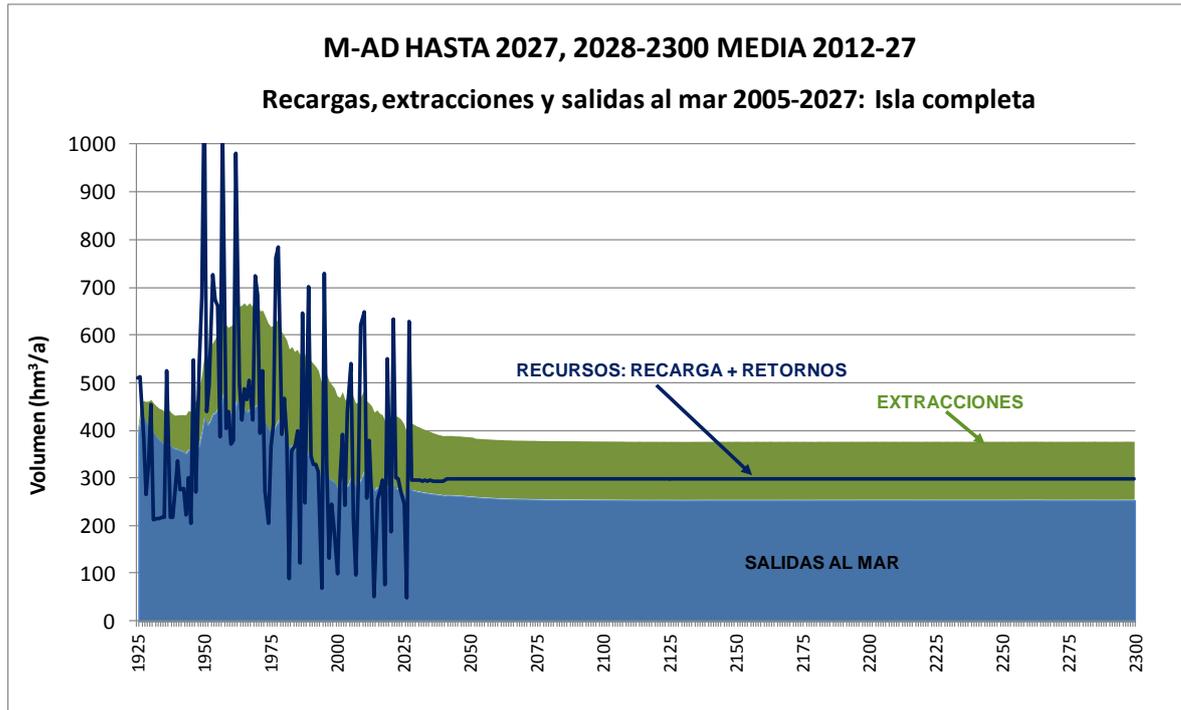
Para realizar estos análisis, se ha ejecutado una simulación teórica a largo plazo, desde 2005 hasta 2300, manteniendo valores constantes de las recargas y extracciones a partir de 2039, último año de las estimaciones de futuro realizadas en el informe de 2011. De esta forma, se puede analizar homogéneamente la tendencia a la estabilización de los niveles y las salidas al mar, ya que los restantes factores no varían.

La hipótesis de recargas y extracciones simulada ha sido la serie histórica hasta 2007 seguida de la de recarga media del informe 2011 (hipótesis M de infiltración y retornos) y la adaptativa de extracciones (AD, que mantiene la tendencia actual). A partir de 2027, la recarga aplicada es la media del periodo 2012-27 representada por la recarga

del año 2023, de 272 hm<sup>3</sup>/a, y los retornos y extracciones del 2039. Por lo tanto, el periodo usado para analizar la estabilización comienza en el 2040, porque, a partir de ahí, los tres factores citados son constantes, con 299 hm<sup>3</sup>/a de recarga y retornos y 124 hm<sup>3</sup>/a de extracciones. En ese año las salidas al mar calculadas ascienden a 254 hm<sup>3</sup>/a por lo que aún se produce una aportación de las reservas de 80 hm<sup>3</sup>/a para cuadrar el balance.

El gráfico de la Figura 1 sirve para sentar las bases del análisis a escala de la Isla. Representa la evolución de los términos del balance para la isla completa, e indica que la situación está aparentemente estabilizada, puesto que tanto las recargas (línea azul) como las extracciones (área verde) y las salidas al mar (área azul) son constantes a partir del año 2100 aproximadamente. Sin embargo, hay que observar que la suma de las salidas al mar y las extracciones supera en unos 73 hm<sup>3</sup>/a a las entradas, déficit que tiene que ser cubierto con una aportación por las reservas, lo que indica que, por término medio, los niveles siguen bajando.

La Tabla 1 recoge los términos del balance en años seleccionados. En ella se puede observar que **la aportación de las reservas a partir de 2100 permanece prácticamente invariable** —salvo por pequeñas variaciones numéricas debidas a la sequía de celdas con extracción y su eventual recuperación en algunos sectores— en los 73-75 hm<sup>3</sup>/a para compensar el déficit de las entradas respecto a las salidas. Para el año 2300 es de 72.8 hm<sup>3</sup>/a debido a los 297.5 hm<sup>3</sup>/a recursos (270.6 de recarga y 26.9 de retornos) respecto a los 376.1 de salidas (122.0 hm<sup>3</sup>/a de extracciones y 254.1 de salidas al mar) con un pequeño error numérico en la resolución del sistema de ecuaciones de 5.8 hm<sup>3</sup>/a. El sistema está casi estabilizado en su balance, ya que los distintos términos permanecen invariables, pero las reservas siguen aportando algo de agua y los niveles descendiendo.



**Figura 1.- Balance general 1925-2300 de la Isla**

La falta de estabilización indicada por la aportación positiva de reservas en el año 2300 se concreta en una **disminución progresiva pero cada vez más lenta del volumen total de reservas<sup>2</sup> de la Isla**. Su valor en el año base 2040 —que es el momento en el que las recargas y extracciones son constantes y por tanto comienza la estabilización de niveles— es de 53334 hm<sup>3</sup>. En 2050 bajan a 53062 hm<sup>3</sup>, un 0.5% menores, en 2100 a 52497, 1.6% inferiores a las de 2040, en 2100 a 52190 (-2.1%) y, finalmente, en 2300 a 52056 hm<sup>3</sup>, 2.4% menores que en el origen de 2040. En los primeros 50 años, de 2040 a 2090 se ha perdido el 1.47% de las reservas totales de 2040 mientras que **en los últimos 50 años, de 2250 a 2300 sólo se pierde el 0.29%, lo que demuestra el lento acercamiento a la estabilidad del balance y los niveles.**

---

<sup>2</sup> Hay que resaltar que el volumen total de reservas —calculado con los niveles simulados en cada año, el fondo de las capas activas y el coeficiente de almacenamiento libre asignado— es el agua almacenada en el acuífero de la Isla, cifra muy superior a las reservas explotables que serían las accesibles mediante galerías o pozos, difíciles de estimar

**Tabla 1.- Balance de la Isla en años seleccionados**

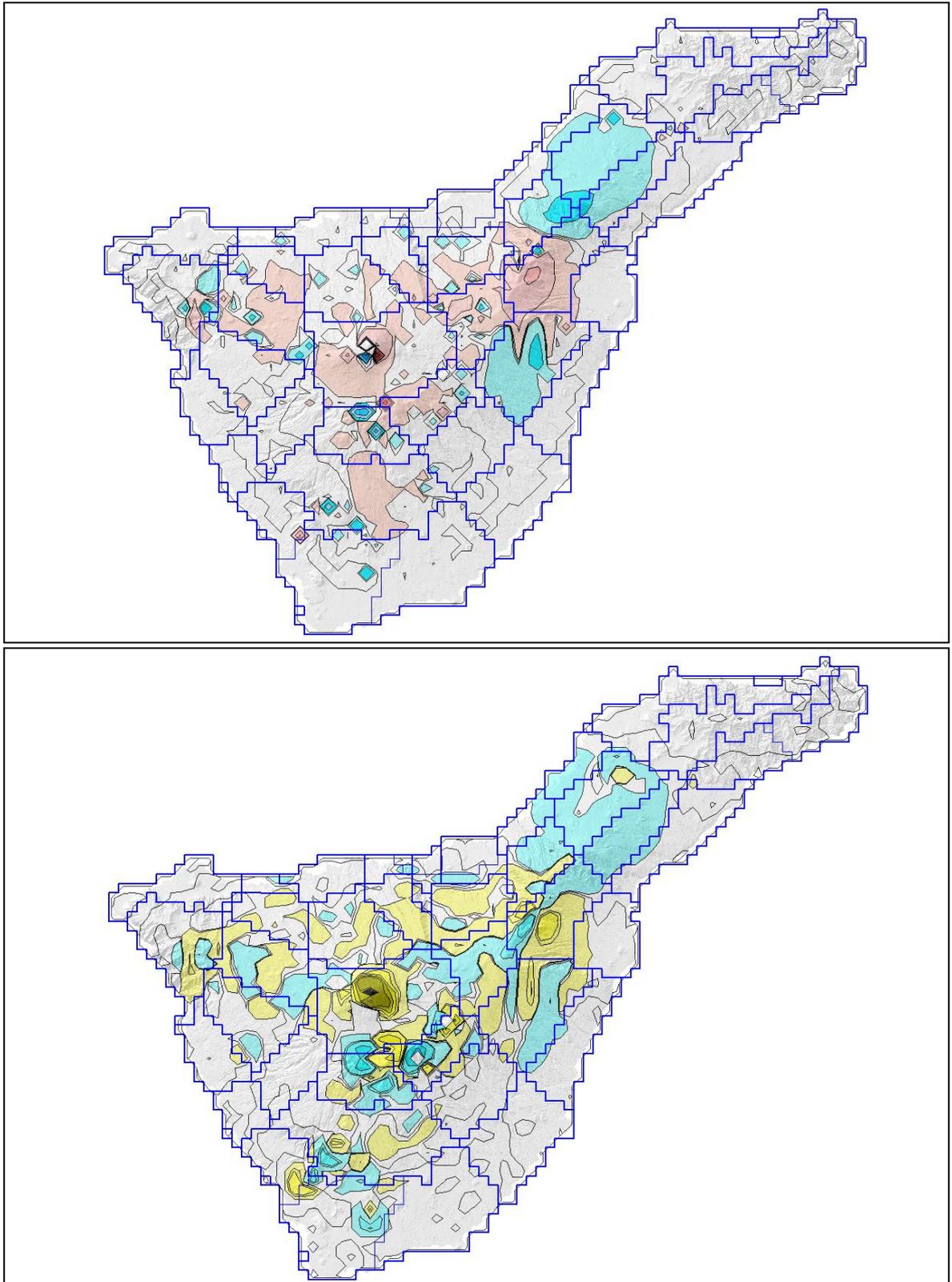
Sector	Año	Recarga	Retornos	Reservas	Extracciones	Salidas al mar	Entrada por Bordes	Entradas	Salidas
Isla	2040	270.7	22.1	89.7	-124.1	-263.7	0.0	292.9	-387.7
	2041	270.8	26.9	87.0	-124.1	-264.2	0.0	297.7	-388.3
	2100	270.6	26.9	75.4	-122.3	-254.3	0.0	297.5	-376.6
	2101	270.6	26.9	74.7	-122.3	-254.2	0.0	297.5	-376.5
	2200	270.6	26.9	74.7	-122.2	-254.1	0.0	297.5	-376.2
	2201	270.5	26.9	74.3	-121.9	-254.1	0.0	297.4	-375.9
	2299	270.6	26.9	74.7	-121.9	-254.1	0.0	297.5	-376.0
	2300	270.6	26.9	72.8	-122.0	-254.1	0.0	297.5	-376.1

Por lo tanto —como era de esperar dada la heterogeneidad hidrogeológica de la Isla— no es posible alcanzar conclusiones generales trabajando con el balance general de la Isla. Hay que realizar un estudio más específico, a escala de zona o de sector, para detectar dónde y por qué se está retardando la estabilización de balances y niveles, que se describe en los siguientes apartados.

### 3.3.3 Análisis general por sectores y zonas

Para comprender la necesidad del análisis por sectores o zonas, se deben observar los gráficos de la Figura 2 que representan las variaciones de nivel y gradiente entre los años 2200 y 2300 y reflejan las tendencias a la estabilización de la superficie freática en las distintas zonas de la Isla.

A primera vista, llama la atención la **correspondencia que existe entre zonas con aumento de nivel (azules, gráfico superior) y de gradiente (azules, gráfico inferior) y zonas con disminución de esas variables (rojas, gráfico superior y amarillas, inferior)**. Sobre todo, hay que destacar la coincidencia de las zonas grises donde **las variaciones de nivel son menores de 0.5 m y las de gradiente de menos del 0.01%, que, por tanto, se pueden considerar estabilizadas.**



**Figura 2.- Diferencia de nivel 2200-2300 (gráfico superior; azul, suben, rojo, bajan, fondo gris variación menor de 0.5 m) y diferencia de gradiente hidráulico 2200-2300 (gráfico inferior; azul gradiente creciente, amarillo decreciente, fondo gris variación menor de 0.01%)**

Analizando en primer lugar las salidas al mar, que, como indica la tabla adjunta, están estabilizadas en 254 hm<sup>3</sup>/a desde el año 2100, se observa en la franja costera sólo presenta variaciones significativas de gradiente (con color azul o amarillo) el sector 721, Dorsal NE Oriental: Franja costera vertiente Norte donde el gradiente está aumentando aunque de forma casi inapreciable, porque la aportación de las salidas al mar pasa de ser de 7.91 hm<sup>3</sup>/a en 2100 a 7.98 hm<sup>3</sup>/a como consecuencia del aumento de gradiente en un escaso 0.04%. En el mismo periodo, el volumen total de reservas del sector ha aumentado de 794.8 a 796.2 hm<sup>3</sup>, debido a una aportación de las reservas negativa, es decir, recuperación de reservas, de -0.01 hm<sup>3</sup>/a. Como consecuencia, se puede decir que las salidas al mar están estabilizadas desde el año 2100, aproximadamente, cuando alcanzaban los 254.3 hm<sup>3</sup>/a muy cercanas a los 254.1 del año 2300.

Estas diferencias de comportamiento justifican la necesidad de analizar las zonas o sectores por separado. Para mostrar numéricamente esas diferencias, la Tabla 2 resume los términos principales del balance de cada zona en el año 2300, final de la simulación de apoyo, que es cuando mejor se observan las tendencias del flujo subterráneo de la Isla ya que desde 2040 las recargas y extracciones son constantes. A su vez, la presenta el mismo balance por sectores. En la primera se observa que **ninguna zona tiene aportación de reservas negativa (columna Reservas), es decir, que en todas ellas disminuyen las reservas**. Por otra parte, las que más contribuyen a los 72.8 hm<sup>3</sup>/a que aportan en el total de la Isla son las 2 (20%), 3 (34%), 4 (21%) y 6 (15%). El análisis no es tan inmediato, porque, por ejemplo, se podría deducir que la zona 4 está disminuyendo notablemente sus reservas, pero si se comprueba su evolución a lo largo del tiempo se obtiene que en 2040 tiene 10461 hm<sup>3</sup>, 10363 en el 2100 y 10320 en el 2300. Por lo tanto sus reservas totales, de hecho, bajan pero muy poco.

Analizando individualmente los sectores en el 2300 (Tabla 3), se observa que **hay muchos en que la aportación de reservas es nula, es decir que han alcanzado la estabilidad**. En general, estos sectores **coinciden con los de color gris en los gráficos de la Figura 2 como los 412 y 423C**, con una aportación nula de las reservas y niveles estabilizados.

**Tabla 2.- Balance resumido de las zonas en 2300**

Zona	Recarga	Retornos	Reservas	Extracciones	Salidas al mar	Entrada bordes
1	11.6	2.6	2.0	-1.1	-20.0	-7.2
2	34.6	4.2	14.8	-19.5	-28.8	4.8
3	31.5	1.4	24.6	-24.8	-38.1	-4.9
4	54.5	8.5	15.1	-19.5	-53.5	1.2
41	6.6	1.5	0.9	-2.6	-7.7	-4.4
42	31.6	6.2	11.0	-12.0	-32.2	-1.7
43	16.3	0.8	3.1	-5.0	-13.6	2.2
5	8.5	0.9	0.5	-3.2	-8.5	-2.7
51	6.5	0.4	0.4	-1.9	-2.6	4.9
52	2.0	0.5	0.2	-1.3	-5.9	0.7
6	32.1	3.0	11.3	-18.8	-29.1	1.7
7	64.0	3.7	4.2	-23.8	-52.7	1.4
71	32.8	2.0	2.1	-15.7	-23.6	0.3
72	31.2	1.7	2.1	-8.1	-29.0	-2.2
8	33.8	2.7	0.5	-11.3	-23.4	0.0
<b>Isla</b>	<b>270.6</b>	<b>26.9</b>	<b>72.8</b>	<b>-122.0</b>	<b>-254.1</b>	<b>0.0</b>

**Tabla 3.- Balance resumido de los sectores en 2300**

Sector	Recarga	Retornos	Reservas	Extracciones	Salidas al mar	Entrada bordes
101	2.7	2.6	0.0	-0.2	-14.5	9.4
102	8.9	0.1	1.9	-0.8	-5.5	-4.6
201	0.6	0.2	1.0	-1.0	-3.7	2.9
202	6.6	0.1	0.1	-2.6	0.0	-4.6
203	15.4	0.0	10.6	-9.2	0.0	-18.4
204	10.2	0.1	3.2	-1.1	0.0	-12.5
205	1.8	3.7	0.0	-5.8	-25.1	25.4
301	1.9	1.2	0.0	-0.8	-38.1	35.9
302	10.3	0.2	5.4	-4.1	0.0	-12.0
303	19.3	0.0	19.3	-19.8	0.0	-19.1
411	5.6	0.1	0.9	-1.0	0.0	-5.6
412	1.1	1.4	0.0	-1.6	-7.7	6.8
421	6.2	0.0	5.3	-2.3	0.0	-9.4
422	15.6	1.1	3.0	-3.5	0.0	-16.2
423	9.8	5.0	2.7	-6.2	-32.2	21.2
423A	2.1	1.0	0.6	-0.5	-8.2	5.3
423B	3.7	3.4	2.1	-2.2	-8.6	1.8
423C	4.1	0.7	0.0	-3.5	-15.4	14.1
431	4.1	0.0	2.8	-1.0	0.0	-5.9
432	8.2	0.3	0.3	-1.0	0.0	-7.9
433	4.0	0.5	0.0	-3.0	-13.6	12.1
511	0.7	0.3	0.0	-0.4	-2.6	2.0
511A	0.7	0.3	0.0	-0.2	-1.7	0.9
511B	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.9	1.1
512	5.7	0.1	0.4	-1.5	0.0	-4.7
521	1.0	0.5	0.0	-1.2	-5.9	6.0
521A	0.5	0.1	0.0	-0.3	0.0	-0.2
521B	0.5	0.3	0.0	-0.9	-5.9	6.2
522	1.1	0.0	0.2	-0.2	0.0	-1.1
601	3.2	1.6	1.4	-6.1	-12.7	12.7
601A	1.4	0.2	1.5	-1.0	0.0	-2.0
601B	1.8	1.4	0.0	-5.1	-12.7	14.7
602	10.4	0.4	2.1	-3.4	0.0	-9.5
603	4.2	0.0	7.0	-5.8	0.0	-6.5
604	10.6	0.5	0.7	-2.9	0.0	-8.9
605	3.8	0.5	0.0	-0.7	-16.4	12.8
711	1.8	0.3	0.0	-1.2	-12.1	11.3
711A	1.8	0.3	0.0	-1.2	-12.1	11.3
711B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
712	12.3	0.1	0.0	-4.1	0.0	-8.4
713	15.0	0.2	2.0	-3.8	0.0	-14.4
714	3.7	1.5	0.0	-6.7	-11.5	12.9
721	1.2	0.5	0.0	-2.0	-8.0	8.2
722	13.7	0.7	1.3	-1.9	0.0	-15.0
723	11.6	0.3	0.4	-2.0	0.0	-10.8
724	4.7	0.2	0.5	-2.1	-21.1	17.9
801	6.9	2.1	0.0	-4.4	-12.2	7.5
801A	2.3	1.8	0.0	-3.3	-2.9	2.1
801B	4.6	0.3	0.0	-1.1	-9.2	5.4
802	16.6	0.3	0.4	-2.3	0.0	-15.1
803	10.3	0.2	0.0	-4.6	-11.3	5.4
803A	5.4	0.1	0.0	-4.5	-6.0	5.0
803B	4.8	0.1	0.0	-0.1	-5.2	0.4
<b>Isla</b>	<b>270.6</b>	<b>26.9</b>	<b>72.8</b>	<b>-122.0</b>	<b>-254.1</b>	<b>0.0</b>

### 3.3.4 Análisis de sectores representativos de distintas tendencias

El siguiente análisis **se va a centrar en los sectores donde se observa que los niveles no están estabilizados, ya sea porque están subiendo o bajando**. Los gráficos de la Figura 2 indican que hay sectores donde los niveles y gradientes aumentan entre los años 2200 y 2300 (zonas de color azulado), como por ejemplo en los sectores 604, Valle Orotava - Fasnía: Medianías vertiente Sur, y 723, Dorsal NE Oriental: Medianías y cumbres vertiente Sur. Sin embargo, otros como los 303, Las Cañadas – Icod - La Guancha: Anfiteatro Las Cañadas y 713, Dorsal NE Occidental: Medianías y cumbres vertiente Sur, sufren una disminución de niveles (zonas rojas) y gradientes (zonas de amarillo) lo que es señal de una disminución de las reservas.

Los gráficos de balance de estos cuatro sectores permiten analizar las razones de su comportamiento. Comenzando por los dos sectores donde aumentan los niveles, es importante observar la Figura 3, donde se presenta el balance 1925-2300. El sector 604 (gráfico superior) presenta un periodo entre 2030 y 2130 en el que **los recursos (recarga, retornos y entrada por los bordes, línea azul claro) son mayores que la suma de extracciones y salida por bordes (borde superior del área de color verde)**.

En efecto, en 2100 la recarga y los retornos suman  $11.1 \text{ hm}^3/\text{a}$ , que con  $4.8$  de entrada por bordes proporcionan  $15.8 \text{ hm}^3/\text{a}$  de entradas totales, mientras que las extracciones de  $2.9$  y salidas por bordes de  $12.7$  suman  $15.6 \text{ hm}^3/\text{a}$  de salidas, por lo que las reservas aumentan en  $0.2 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Sin embargo, en 2300 las entradas por los bordes bajan a  $4.4$ , las recargas permanecen constantes en  $11.1$ , y **el total de entradas baja algo**, hasta  $15.5 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Por su parte, **las salidas por bordes aumentan** a  $13.3$ , con lo que **las salidas totales, de  $16.2 \text{ hm}^3/\text{a}$  son superiores a las entradas y las reservas tienen que aportar los  $0.7 \text{ hm}^3/\text{a}$  de déficit**. Por lo tanto, **el sector 604 no está totalmente estabilizado porque aún no ha alcanzado el equilibrio de las reservas y niveles en valores por encima de los que se registraban en 2040**. Sin embargo, el gráfico de reservas totales indica **que prácticamente han alcanzado el equilibrio** (ver Figura 5).

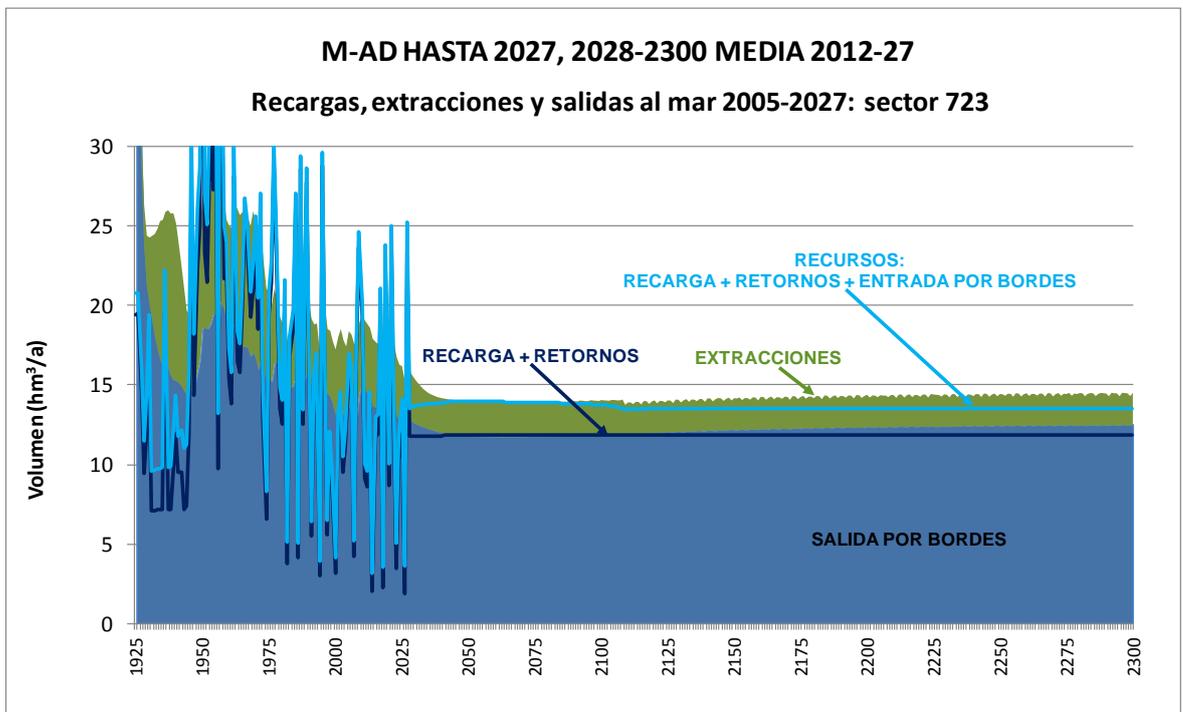
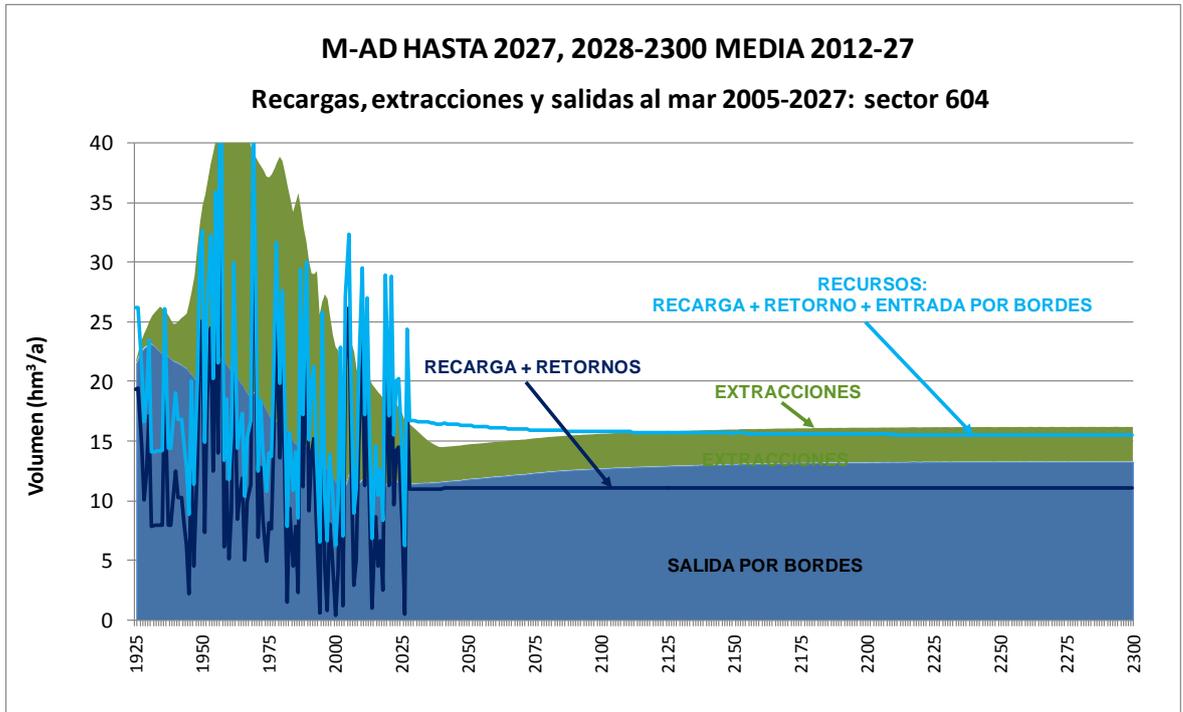
La situación del sector 723, es parecida puesto que tampoco se ha estabilizado porque los niveles y reservas están subiendo (gráfico inferior, Figura 3). Sin embargo, en este caso, las reservas también suben a partir de 2040 aunque sin tanto exceso de entradas sobre las salidas como en el 604. La curva de subida de las reservas es parecida (Figura 5). El balance en el 2300 es de  $13.5 \text{ hm}^3/\text{a}$  de entradas y  $14.5$  de salidas por lo que **las reservas aportan algo de agua para cerrar el balance**. El hecho de que el vo-

lumen de reservas suba se debe a la distribución heterogénea de los coeficientes de almacenamiento —particularmente variados en este sector— que varían entre el 6 y el 25%.

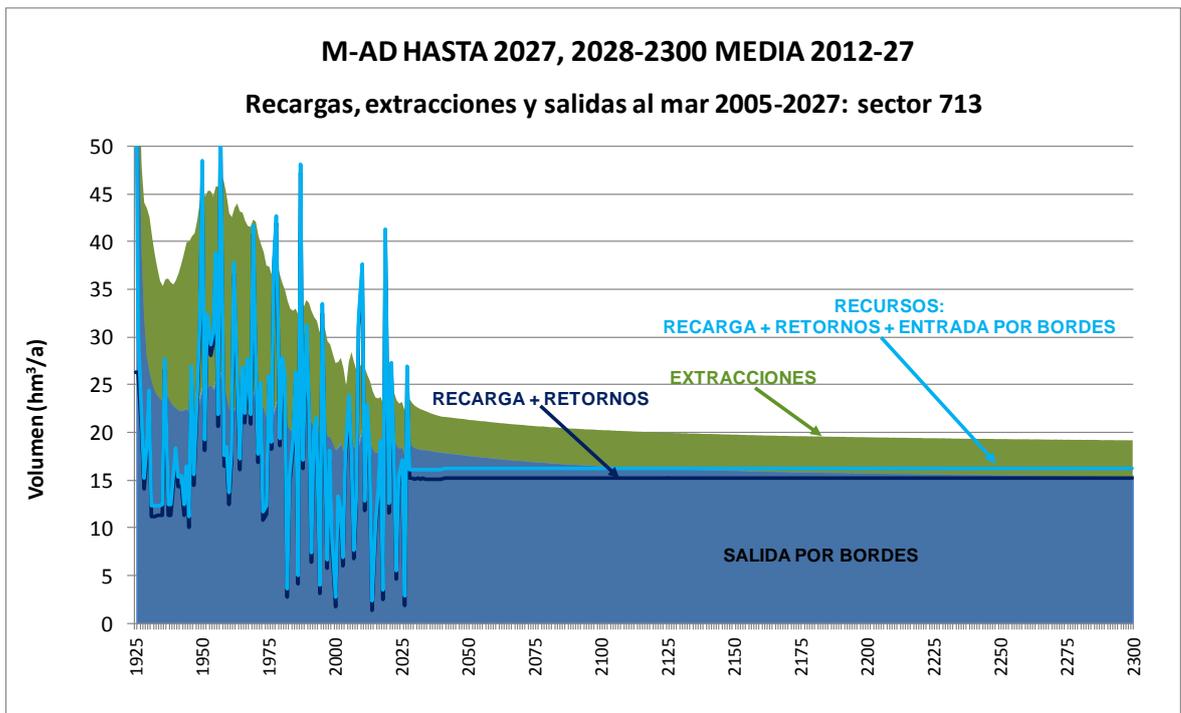
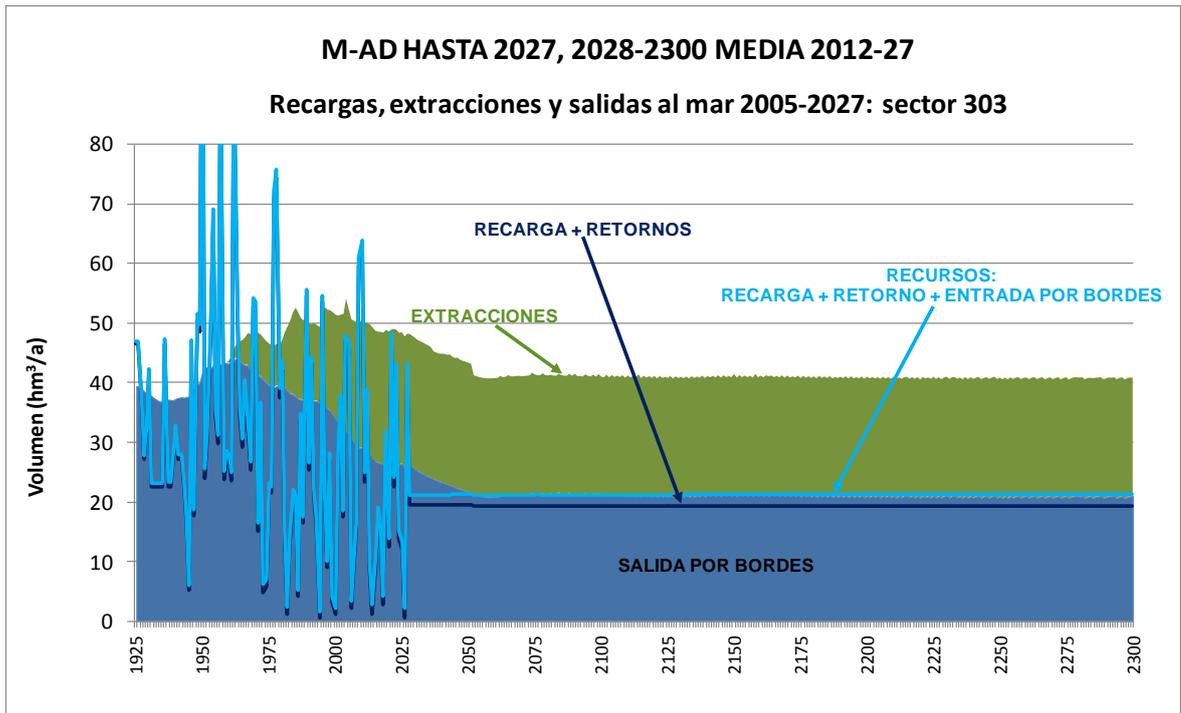
En el caso de sectores en los que bajan los niveles como los 303 y 713, su balance se representa en la Figura 4. Ambos gráficos tienen el mismo aspecto, con unas **salidas (extracciones más salidas por bordes) netamente superiores a las entradas (recargas más entradas por bordes) a partir de 2040**. Concretamente, en el 2300 el 303 tiene 21.3 hm<sup>3</sup>/a de entradas y 40.8 de salidas y el 713 15.2 y 19.3, respectivamente. **Los déficits son cubiertos por una aportación de las reservas elevada de esa magnitud, que da lugar a la tendencia descendente de las reservas totales** que muestra la Figura 5.

En el caso del 303, el problema se debe a que las extracciones previstas en la hipótesis simulada (adaptativa) para el año 2040, de 21,9 hm<sup>3</sup>/a, **son prácticamente iguales a las máximas registradas en el periodo histórico** que se produjeron en el año 2004 por lo que, siendo un sector de cumbres, **la estabilización sólo puede conseguirse bajando mucho los niveles para disminuir el gradiente de salida y el caudal cedido a los sectores de aguas abajo, proceso muy lento**. Por ejemplo, en el año 2040, este caudal neto es de 21.8 con recarga de 19.5 (no hay retornos de riegos) y extracciones de 21.5 hm<sup>3</sup>/a. En 2300, con la misma recarga, el caudal neto de salida sólo se ha reducido a 19 hm<sup>3</sup>/a.

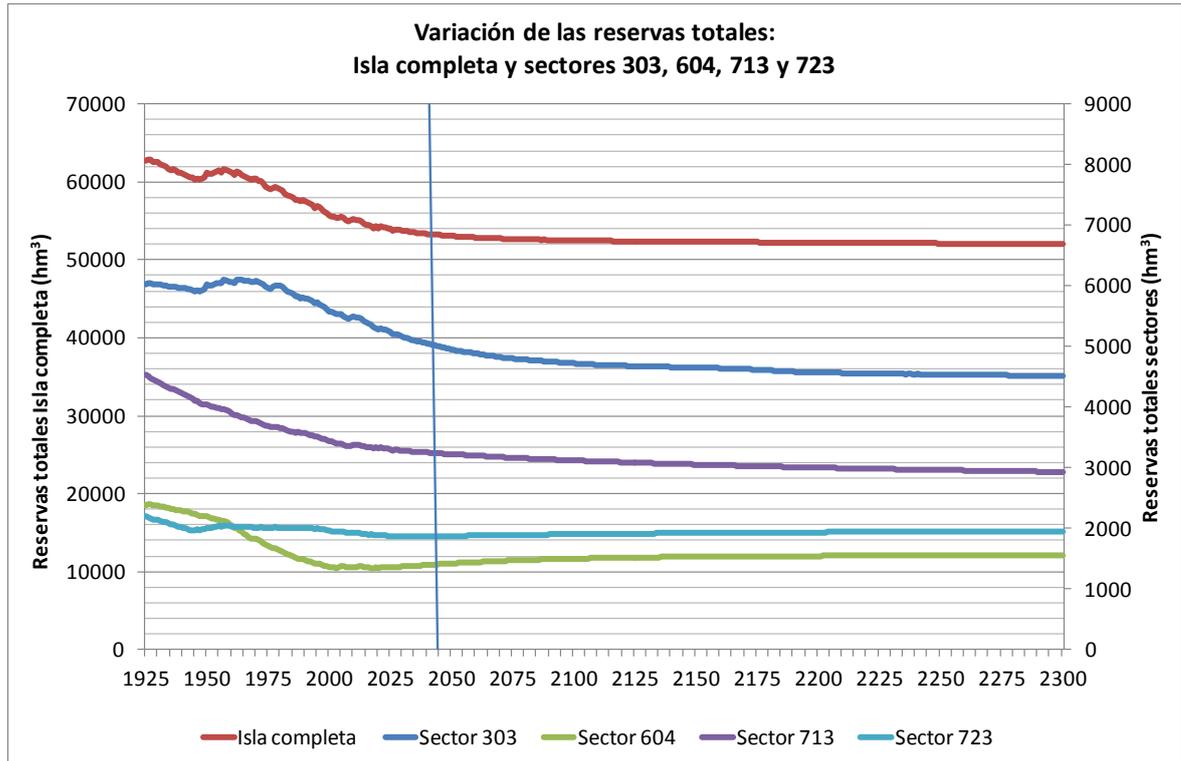
En el sector 713 sucede lo mismo, aunque las extracciones previstas para 2040 **son inferiores a las del periodo histórico**, de 3.8 hm<sup>3</sup>/a frente a los 9 hm<sup>3</sup>/a del año 2000, pero **las salidas hacia los sectores de aguas abajo son muy fuertes**, de 17 hm<sup>3</sup>/a en aquella fecha, que sólo se consiguen reducir a 14.4 en el 2300 con la bajada de niveles.



**Figura 3.- Balances 1925-2300 de sectores donde aumentan las reservas: 604, Valle Orotava - Fasnía: Medianías vertiente Sur (gráfico superior) y 723, Dorsal NE Oriental: Medianías y cumbres vertiente Sur (gráfico inferior)**



**Figura 4.- Balances 1925-2300 de sectores donde disminuyen las reservas: 303, Las Cañadas – Icod - La Guancha: Anfiteatro Las Cañadas (gráfico superior) y 713, Dorsal NE Occidental: Medianías y cumbres vertiente Sur (gráfico inferior)**



**Figura 5.- Evolución de reservas totales en la Isla y los sectores 303, 604, 713 y 723**

### 3.3.5 Análisis de las variaciones históricas de las recargas y extracciones

El último estudio de este apartado tiene por objeto analizar si las variaciones históricas de recargas y extracciones en relación con la capacidad de recuperación de los niveles antiguos de la Isla.

Para ello, se ha calculado la variación de las medias móviles de 25 años de todas las variables del balance de la Isla a lo largo del tiempo y se han representado en los gráficos de la Figura 6. El inferior, que representa la evolución de la media móvil de 25 años del índice de explotación<sup>3</sup> de la Isla, **indica que siempre se ha encontrado en situación deficitaria, puesto que nunca ha bajado de la unidad**. De hecho, ha sido mayor de 1.20 salvo en un corto periodo de 1960 a 1970 (media de 1936-1960 a media de 1946-1970) en que se aproximó a la unidad. El gráfico superior explica estos índices tan altos. Se observa que **las salidas al mar prácticamente coinciden con la recarga por infiltración de agua de lluvia en todo el periodo**. Por lo tanto, **las extracciones sólo**

<sup>3</sup> Es la relación entre salidas (extracciones y salidas por los bordes, incluidas salidas al mar) y entradas (recarga, retornos de riego y entrada por los bordes), que debe ser menor de 0.8 para que la masa o sistema analizado esté en buen estado cuantitativo.

**pueden atenderse con los retornos de riego** que, si bien hasta aproximadamente 1980 son del orden del 50% de aquéllas, tienden a ser de un 20 a 25% debido a la estabilidad de los retornos y el progresivo descenso de las extracciones. **El déficit debe ser cubierto por la aportación de las reservas**, teniendo en cuenta que no sólo es un problema de balance global, sino que es especialmente agudo en determinadas zonas. Como los **retornos de riego se concentran en las zonas bajas de la Isla, en principio el balance sería más desfavorable para las zonas altas que no reciben esa recarga.**

Para ilustrar la diferencia, la Figura 7 presenta los mismos gráficos para el sector 713 analizado anteriormente. Las diferencias son evidentes. Si bien **la recarga sigue siendo parecida a las salidas por los bordes, los retornos de riegos son mucho menores en relación con las extracciones.** Por ello, **el índice de explotación del periodo histórico es mayor de 1.6 y llega a superar el valor 2 en los primeros 50 años, debido a las elevadas extracciones en ese periodo.** En el futuro previsible en la hipótesis analizada, se observa que el índice **se acerca al valor de 1.2 e incluso tiende a disminuir aún más, debido a la gran reducción de las extracciones, muy superior a la que se prevé en toda la Isla.**

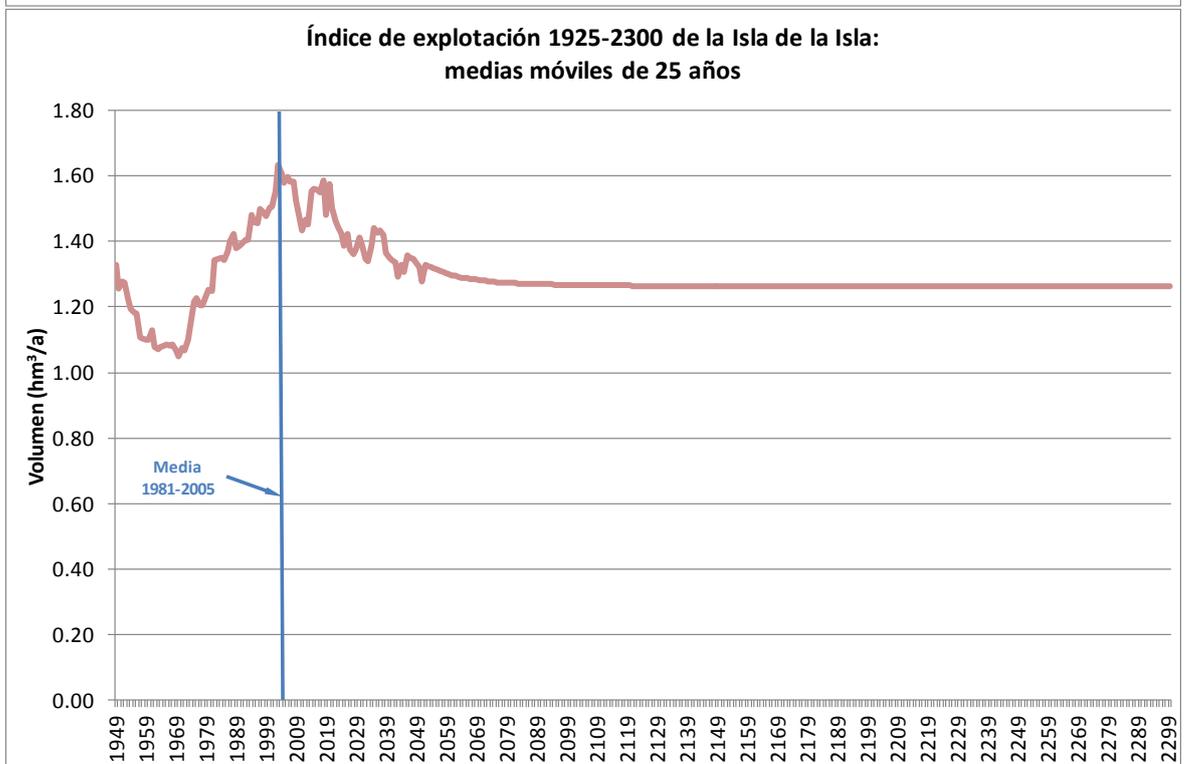
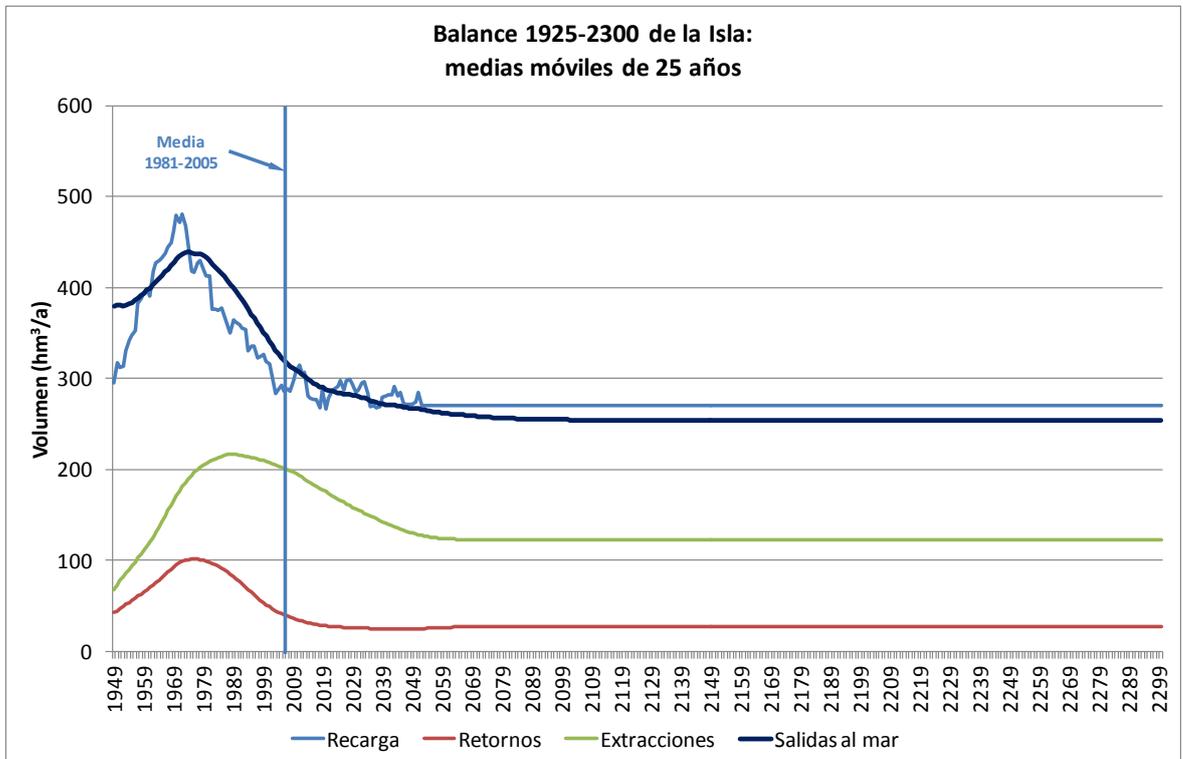
Por último, la Figura 8 representa los mismos gráficos para el sector 521A, Macizo de Tigai-ga Oriental: Porción fuera de Masa TF 004, que es el que presenta **mejor índice de explotación a largo plazo ya que queda en 0.79.** Hasta cerca del año 1960<sup>4</sup> es mayor de 1.7 debido a las **fuertes extracciones —comparadas con la recarga— que no se compensan con los retornos ni las entradas por los bordes que son positivas hasta 1990.** El descenso de las extracciones combinado con la mayor entrada por los bordes hace que el índice baje hasta 0.71 en 1990. A partir de ese momento, el índice vuelve a subir hasta alcanzar 1.33 en el año 2003 porque el sector cede agua a los adyacentes en lugar de recibirla y, a pesar de la disminución de las extracciones, aumenta el déficit de recursos. Sin embargo, desde esa fecha, **las salidas, la recarga y los retornos se estabilizan y como las extracciones siguen bajando, el índice de explotación también lo hace hasta quedar en un valor del orden de 0.80.** En este proceso, la aportación de las reservas se anula hacia 2027, el volumen almacenado permanece constante como resultado de la estabilización de los niveles.

Estos análisis indican que en la hipótesis supuesta, de recarga media y extracción adaptativa (es decir, la máxima de las alternativas supuestas) **no es posible alcanzar la**

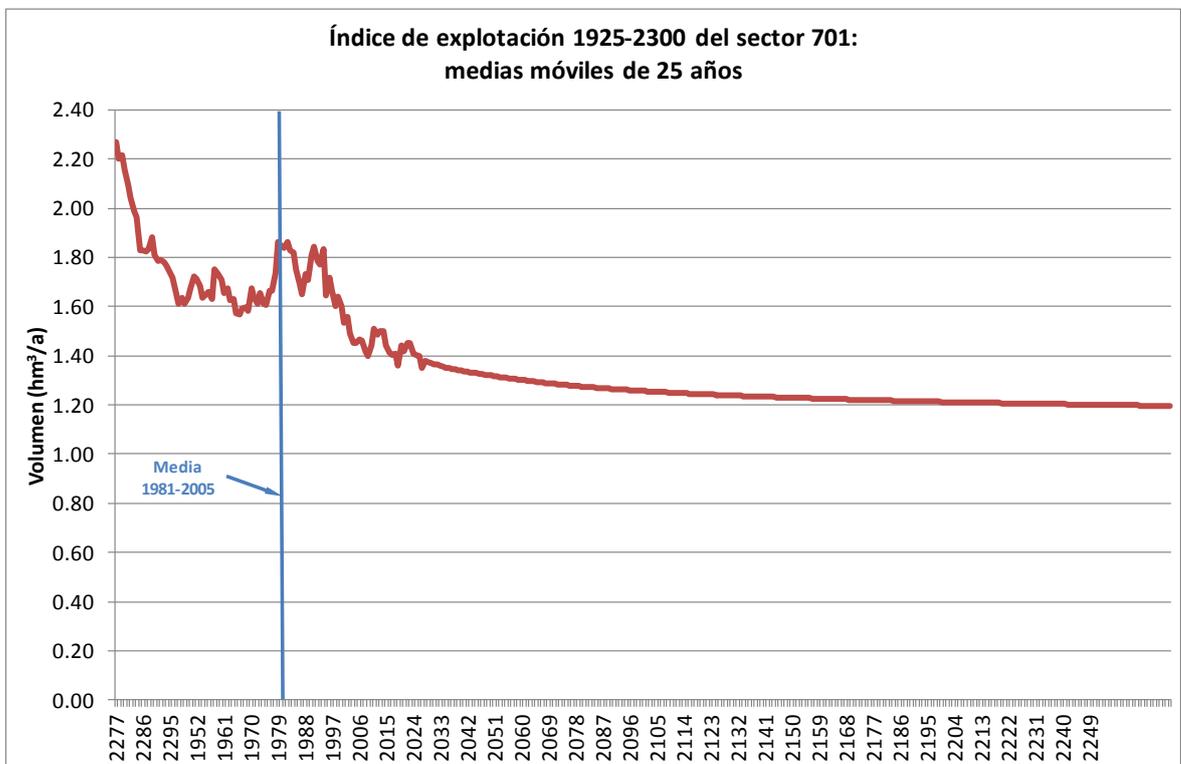
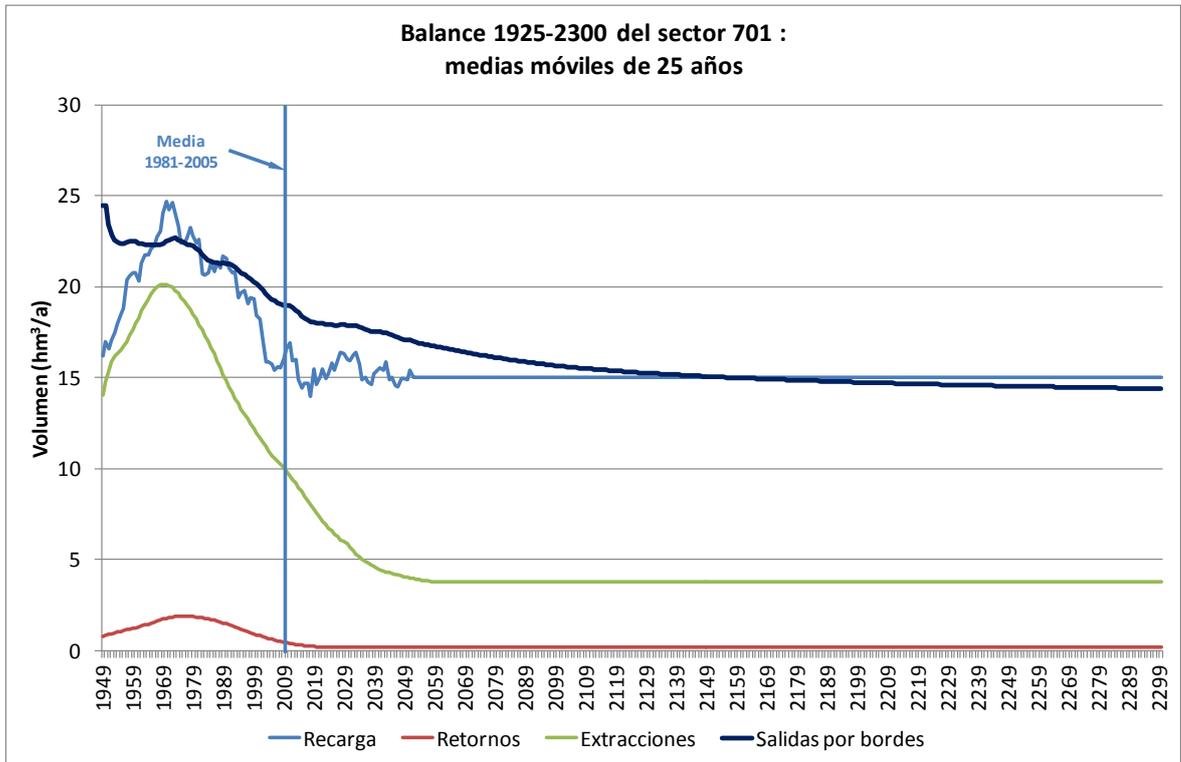
---

<sup>4</sup> Hay que recordar que al citar fechas, se hace referencia a la media de los 25 años anteriores a ella

estabilización general de los niveles debido a que las extracciones superan a los recursos netos disponibles. Sin embargo, en algunos sectores se llega a estabilizar el índice de explotación, es decir, la proporción entre entradas y salidas de agua.



**Figura 6.- Isla completa: medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación global (abajo)**



**Figura 7.- Sector 701, Dorsal NE Occidental: Medianías y cumbres vertiente Sur:**

medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación (abajo)

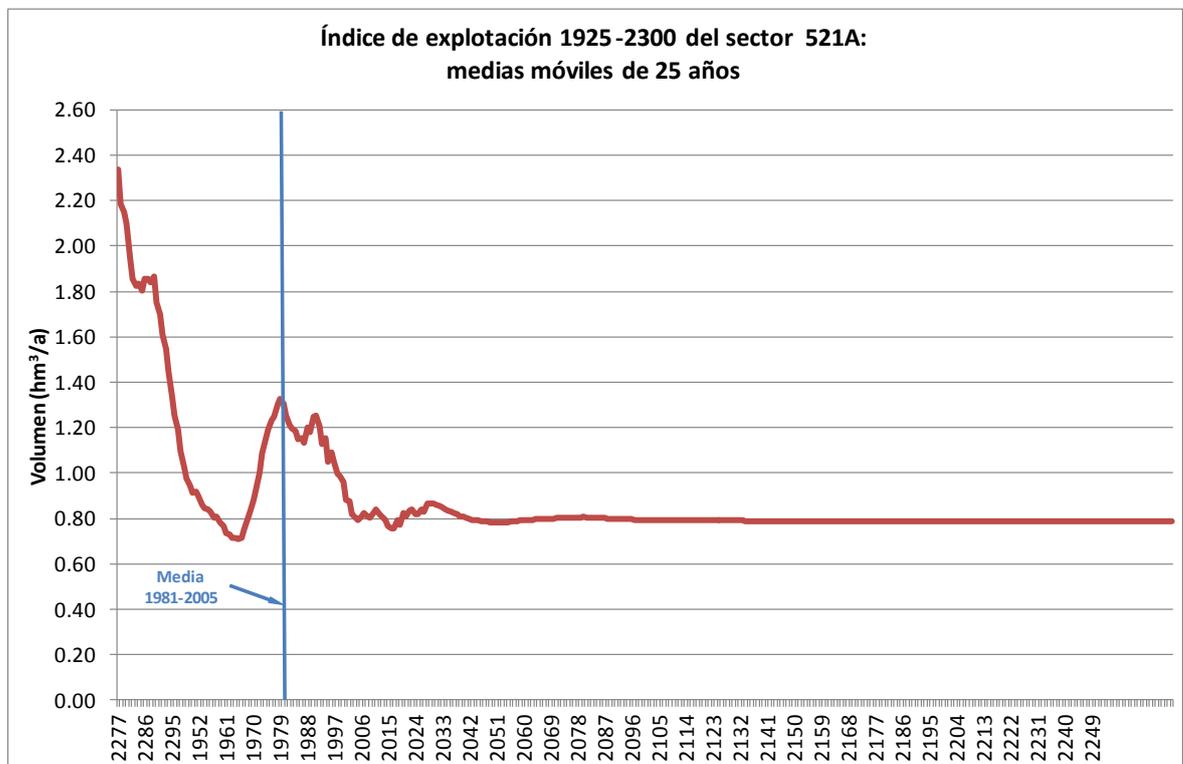
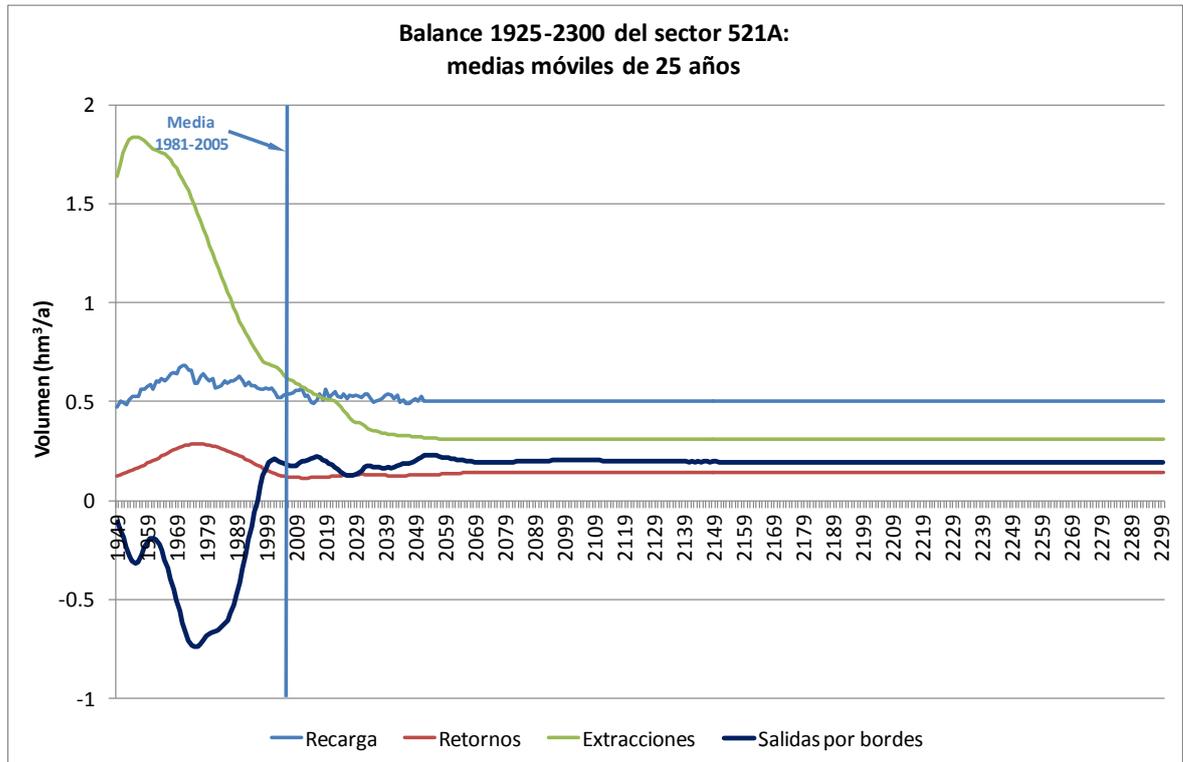


Figura 8.- Sector 521A, Macizo de Tigaiga Oriental - Porción fuera de Masa TF 004:

## medias móviles de 25 años del balance 1925-2300 (arriba) e índice de explotación (abajo)

### 3.4 Balance hídrico

El alcance del trabajo a desarrollar en este servicio indicaba que *“tomando como base el último MSFS disponible se obtendrá el balance hídrico subterráneo, a nivel de masa de agua y sector hidrogeológico, para los años 2012, 2015, 2018, 2021, 2024 y 2027, así como balances medios de los periodos 1925-2005, 2005-2015, entre otros”*.

Para llevar a cabo estos cálculos, ha sido necesario modificar los dos programas base del MSFS, el Modflow modificado, que realiza la simulación propiamente dicha y obtiene los niveles y caudales en cada celda del modelo para cada intervalo de cálculo y el de cálculo de balance por sectores o zonas de agua subterránea.

El modelo de simulación ha sido modificado para incluir los cambios sufridos en los sectores a raíz de la aprobación de la normativa del Primer Ciclo de Planificación del Plan Hidrológico de Tenerife, de noviembre de 2013 (artículo 67) que introduce el concepto de subsectores como mecanismo para calcular las masas de agua subterránea por agregación de sectores. En la zonificación usada hasta el MSFS de 2011, algunos sectores (511, 521, 601...) pertenecían a dos masas diferentes por lo que se han dividido en subsectores (el 511 en 511A y 511B, por ejemplo) que están contenidos íntegramente en la misma masa. También se ha revisado la asignación a sectores de algunas celdas aisladas.

Por la misma razón, se ha modificado el programa de balance, donde, además, se han redefinido las zonas hidrogeológicas, también afectadas por los cambios en los sectores.

La Tabla 4 recoge los sectores y subsectores actuales con sus códigos, la masa y zona a las que pertenecen y su relación con la zonificación antigua. La Figura 9 presenta el mapa de los sectores y subsectores y la Figura 10 el de las masas de agua subterránea.

**Tabla 4.- Modificaciones en la zonificación**

Tipo	Código	Nombre	Nº según MSFS	Código Zona	Masa de agua	Nombre Antiguo	Nº ant. según MSFS
Sector	101	Franja costera de la vertiente norte	1	1	ES70TF001	I-0-1	1
Sector	102	Área de medianías y cumbres	2	1	ES70TF001	I-0-2	2
Sector	201	Franja costera de la vertiente norte	3	2	ES70TF001	II-0-1	3
Sector	202	Área de medianías de la vertiente norte	4	2	ES70TF001	II-0-2	4
Sector	203	Área de cumbres	5	2	ES70TF002	II-0-3	5
Sector	204	Área de medianías de la vertiente sur	6	2	ES70TF001	II-0-4	6
Sector	205	Franja costera de la vertiente sur	7	2	ES70TF003	II-0-5	7
Sector	301	Franja costera del Valle de Icod-La Guancha	8	3	ES70TF002	III-0-1	8
Sector	302	Valle de Icod-La Guancha	9	3	ES70TF002	III-0-2	9
Sector	303	Anfiteatro de Las Cañadas	10	3	ES70TF002	III-0-3	10
Sector	411	Área de cumbres y medianías	11	41	ES70TF001	IV-1-1	11
Sector	412	Franja costera	12	41	ES70TF003	IV-1-2	12
Sector	421	Área de cumbres	13	42	ES70TF001	IV-2-1	13
Sector	422	Área de medianías	14	42	ES70TF001	IV-2-2	14
Sector	423	Franja costera	15	42	ES70TF003		
Subsector	423A	Porción occidental	16	42	ES70TF003	IV-2-A	15
Subsector	423B	Porción central	17	42	ES70TF003	IV-2-B	16
Subsector	423C	Porción oriental	18	42	ES70TF003	IV-2-C	17
Sector	431	Área de cumbres	19	43	ES70TF001	IV-3-1	18
Sector	432	Área de medianías	20	43	ES70TF001	IV-3-2	19
Sector	433	Franja costera	21	43	ES70TF003	IV-3-3	20
Sector	511	Franja costera	22	51			
Subsector	511A	Porción no incluida en la Masa TF 004	23	51	ES70TF001	V-1-1	21
Subsector	511B	Porción incluida en la Masa TF 004	24	51	ES70TF004		
Sector	512	Área de cumbres y medianías	25	51	ES70TF001	V-1-2	22
Sector	521	Franja costera	26	52			
Subsector	521A	Porción no incluida en la Masa TF 004	27	52	ES70TF001	V-2-1	23
Subsector	521B	Porción incluida en la Masa TF 004	28	52	ES70TF004		
Sector	522	Área de medianías y cumbres	29	52	ES70TF001	V-2-2	24
Sector	601	Franja costera de la vertiente norte	30	6			
Subsector	601A	Porción no incluida en la Masa TF 004	31	6	ES70TF001	VI-0-1	25
Subsector	601B	Porción incluida en la Masa TF 004	32	6	ES70TF004		
Sector	602	Área de medianías de la vertiente norte	33	6	ES70TF001	VI-0-2	26
Sector	603	Área de cumbres	34	6	ES70TF001	VI-0-3	27
Sector	604	Área de medianías de la vertiente sur	35	6	ES70TF001	VI-0-4	28
Sector	605	Franja costera de la vertiente sur	36	6	ES70TF003	VI-0-5	29
Sector	711	Franja costera de la vertiente norte	37	71			
Subsector	711A	Porción no incluida en la Masa TF 004	38	71	ES70TF001	VII-1-1	30
Subsector	711B	Porción incluida en la Masa TF 004	39	71	ES70TF004		
Sector	712	Área de medianías y cumbres de la vertiente norte	40	71	ES70TF001	VII-1-2	31
Sector	713	Área de medianías y cumbres de la vertiente sue	41	71	ES70TF001	VII-1-3	32
Sector	714	Franja costera de la vertiente sur	42	71	ES70TF003	VII-1-4	33
Sector	721	Franja costera de la vertiente norte	43	72	ES70TF001	VII-2-1	34
Sector	722	Área de medianías y cumbres de la vertiente norte	44	72	ES70TF001	VII-2-2	35
Sector	723	Área de medianías y cumbres de la vertiente sur	45	72	ES70TF001	VII-2-3	36
Sector	724	Franja costera de la vertiente sur	46	72	ES70TF001	VII-2-4	37
Sector	801	Franja costera de vertiente norte	47	8	ES70TF001		
Subsector	801A	Porción occidental	48	8	ES70TF001	VIII-1-1	38
Subsector	801B	Porción oriental	49	8	ES70TF001	VIII-2-1	41
Sector	802	Área de medianías y cumbres	50	8	ES70TF001	VIII-0-2	39
Sector	803	Franja costera de la vertiente sur	51	8	ES70TF001		
Subsector	803A	Porción occidental	52	8	ES70TF001	VIII-1-3	40
Subsector	803B	Porción oriental	53	8	ES70TF001	VIII-2-3	42

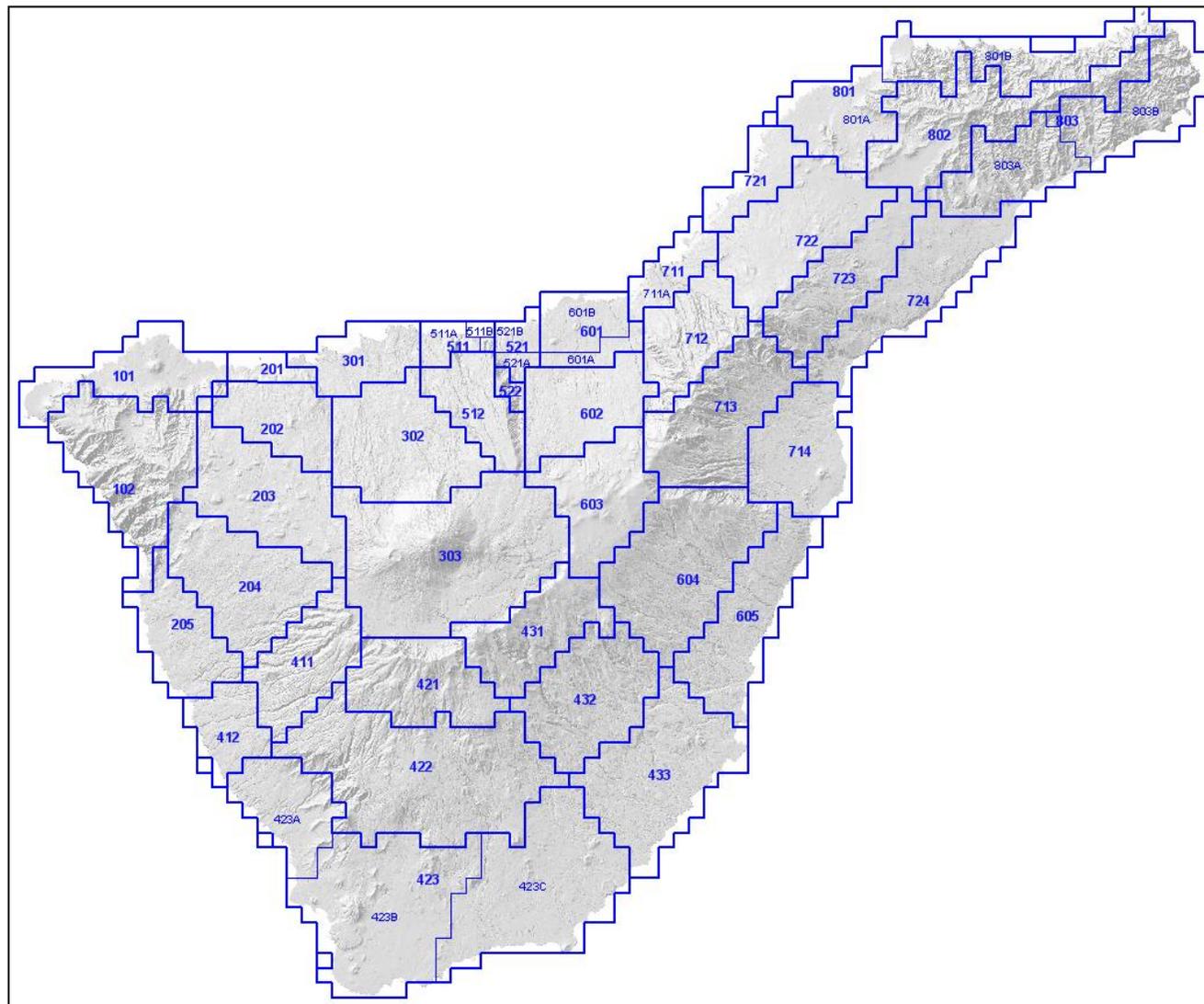


Figura 9.- Zonificación actual: sectores y subsectores de agua subterránea

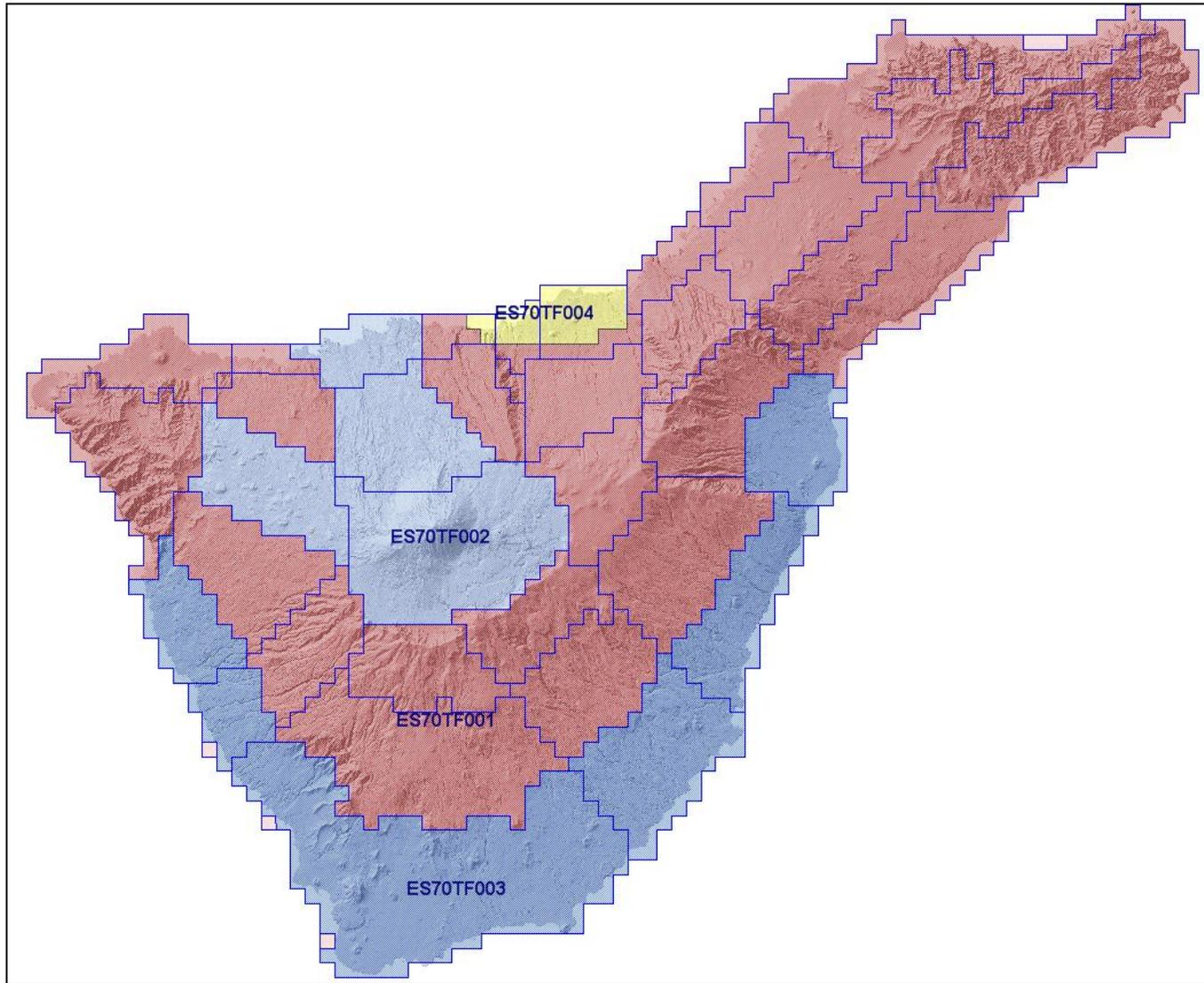


Figura 10.- Zonificación actual: masas de agua subterránea

Una vez modificados los programas se han repetido las simulaciones de calibración y de las nueve hipótesis de futuro, para recalculer los balances de los sectores con la nueva zonificación, se ha desarrollado una aplicación en Excel que permite al usuario obtener los siguientes resultados:

- Tablas de balance para un sector, zona o masa determinada, o para la Isla completa, para cualquier rango de años entre 1925 y 2027. La Figura 11 muestra un ejemplo de la hoja de selección de tabla de balance de un sector entre 2012 y 2027, similar a la usada para calcular el balance por zonas y masas de agua subterránea.

HIPÓTESIS M-TR: RECARGA MEDIA Y EXTRACCIÓN MEDIA (TRANSICIÓN)														SELECCIÓN SECTOR A CONSULTAR:		ENTRE LOS AÑOS:					
BALANCE DEL SECTOR 604														604		2012		Y 2027		Consultar	
Valle Orotava-Fasnia: Medianías vert. Sur																					
Año	Recarga	Retornos	Reservas	Extracciones	Salidas al mar	Entrada por Bordes	Caudal Borde 1	Caudal Borde 2	Caudal Borde 3	Caudal Borde 4	Caudal Borde 5	Caudal Borde 6	Caudal Borde 7	Caudal Borde 8	Volumen Reservas	Descenso Medio					
2012	20.59	0.45	-5.96	-9.91	0	-5.22	0.84	0.98	-0.98	3.13	-8.91	1.08	-1.36	0	1368.3	4.3					
2013	8.95	0.48	5.09	-9.44	0	-5.16	0.83	0.97	-0.98	3.1	-8.79	1.06	-1.35	0	1365.1	4.9					
2014	0.5	0.45	12.56	-8.49	0	-5.02	0.84	0.95	-0.98	3.07	-8.69	1.09	-1.3	0	1354.9	7					
2015	8.21	0.45	4.79	-8.38	0	-5.03	0.85	0.96	-0.99	3.05	-8.74	1.11	-1.26	0	1352.2	6.9					
2016	4.1	0.45	9.84	-8.52	0	-4.98	0.84	0.94	-0.99	3.03	-8.55	1.12	-1.23	0	1346.1	8					
2017	6.19	0.47	6.55	-8.41	0	-4.78	0.84	0.93	-0.98	3.01	-8.47	1.13	-1.23	0	1341.6	9.1					
2018	2.05	0.45	10.44	-8.25	0	-4.66	0.83	0.91	-0.98	2.99	-8.36	1.15	-1.2	0	1333.9	10.6					
2019	22.57	0.47	-9.96	-8.06	0	-5	0.83	0.92	-0.98	2.98	-8.65	1.18	-1.28	0	1345.4	7.5					
2020	10.81	0.45	1.85	-7.8	0	-5.28	0.8	0.92	-0.99	2.96	-8.78	1.14	-1.33	0	1344.7	7.7					
2021	22.53	0.47	-9.89	-7.52	0	-5.98	0.79	0.94	-0.99	2.95	-8.99	1.12	-1.38	0	1355.4	5.7					
2022	9.24	0.44	2.98	-7.15	0	-5.51	0.76	0.93	-0.99	2.94	-8.9	1.11	-1.36	0	1354	6.1					
2023	13.72	0.48	-1.91	-6.75	0	-5.51	0.76	0.94	-0.98	2.92	-8.94	1.12	-1.32	0	1357.7	5.3					
2024	14.02	0.44	-2.47	-6.41	0	-5.54	0.75	0.93	-0.99	2.9	-8.95	1.12	-1.31	0	1361.5	5					
2025	7.29	0.46	3.89	-6.12	0	-5.52	0.75	0.92	-0.99	2.89	-8.93	1.14	-1.29	0	1360.4	4.4					
2026	0.02	0.44	10.45	-5.51	0	-5.4	0.75	0.89	-1	2.87	-8.82	1.15	-1.24	0	1352.9	6					
2027	18.15	0.44	-7.82	-5.27	0	-5.5	0.78	0.91	-1	2.84	-8.93	1.15	-1.24	0	1361.9	4.5					
<b>MEDIA</b>	<b>10.56</b>	<b>0.45</b>	<b>1.84</b>	<b>-7.62</b>	<b>0.00</b>	<b>-5.22</b>	<b>0.80</b>	<b>0.93</b>	<b>-0.99</b>	<b>2.98</b>	<b>-8.78</b>	<b>1.12</b>	<b>-1.29</b>	<b>0.00</b>	<b>1353.50</b>	<b>6.44</b>					

Figura 11.- Tablas de balance en periodos determinados: ejemplo de sectores

- Tablas de índice de explotación de las masas de agua subterránea y la Isla completa para cualquier periodo entre 1925 y 2027. Son las tablas que debe incluir el Plan Hidrológico en sus informes (Figura 12).

HIPÓTESIS M-TR: RECARGA MEDIA Y EXTRACCIÓN MEDIA (TRANSICIÓN)										SELECCIÓN PERIODO A CONSULTAR:	
Balance medio del periodo 1925-2005										DESDE 1925 HASTA 2005	
Código Masa		Recarga	Retornos	Reservas	Extracciones	Salidas al mar	Entrada por Bordes	Índice de explotación (Extracciones/R cursos)		Consultar	
ES70TF001	Masa compleja de Medianías y Costa N-	240.0	23.0	99.3	-118.0	-119.9	-128.3	1.39			
ES70TF002	Masa Cañadas Valle de Icod La Guancha Dorsal	83.0	3.4	13.1	-19.9	-59.0	-20.3	1.15			
ES70TF003	Masa costera Vertiente Sur	22.0	27.9	4.2	-11.6	-163.3	121.7	1.02			
ES70TF004	Masa Costera Valle de La Orotava	2.2	8.5	1.4	-8.6	-30.0	27.0	1.03			
Isla	Isla Completa	347.2	62.7	118.0	-158.2	-372.2	0.0	1.29			

Figura 12.- Tablas de índice de explotación de las masas y la Isla en periodos determinados

- Gráficos para un sector, zona o masa determinada, o para la Isla completa, para cualquier rango de años entre 1925 y 2027. La Figura 11 muestra un ejemplo de la hoja de selección de tabla de balance de un sector entre 2012 y 2027, similar a la

usada para calcular el balance por zonas y masas de agua subterránea. Se obtienen tres gráficos:

- Gráfico de balance anual, representando las recargas, extracciones, entradas y salidas por bordes, salidas al mar y aportación de las reservas (Figura 14).
- Gráfico de balance acumulado: igual al anterior, con valores acumulados.
- Gráfico de recargas y extracciones.

**HIPÓTESIS M-TR: RECARGA MEDIA Y EXTRACCIÓN MEDIA (TRANSICIÓN)**

**SELECCIÓN DE DATOS PARA LA CONSULTA DE GRÁFICOS**

1) Seleccione una de las tres opciones (Sector, Zona o Masa):

Sector a consultar:  ó Zona a consultar:  ó Masa a consultar:

2) Seleccione los años a consultar:

Entr los años:  y

Figura 13.- Pantalla de selección del sector, zona, masa y periodo a representar en los gráficos

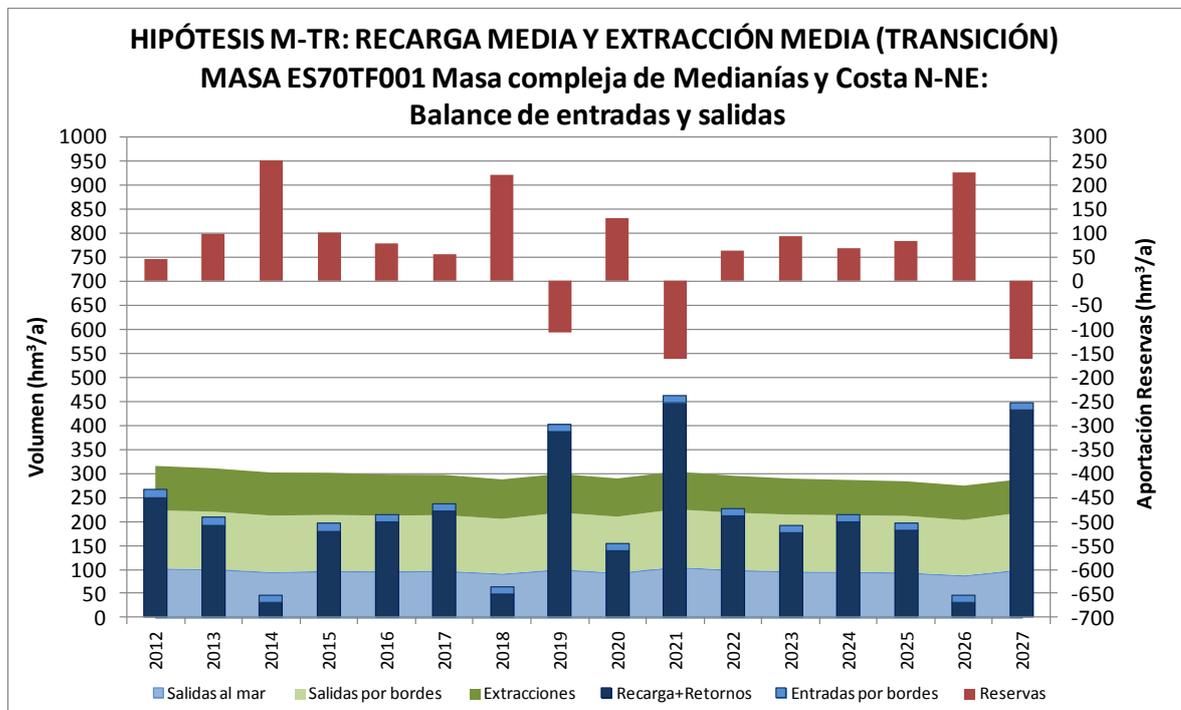


Figura 14.- Gráfico de balance de una masa de agua subterránea

Se han entregado al CIATF en formato digital nueve hojas Excel, en las que se han cargado los resultados de las distintas hipótesis de futuro hipótesis de futuro. Con ellas, sus técnicos podrán obtener en cualquier momento las tablas y gráficos que necesiten para los análisis o los informes que estén realizando.

### **3.5 Mejora de la metodología numérica del MSFS**

La respuesta a la posibilidad de mejora de la metodología numérica del MSFS estaba clara desde el primer momento, debido a que era muy improbable que algún software comercial incluyera las opciones singulares que se requieren para simular el flujo en Tenerife.

Aún así, se ha realizado una búsqueda de metodologías que han confirmado esta impresión. El argumento básico es que, en este momento, el MODFLOW del USGS sigue siendo el estándar usado en todo el mundo para realizar modelos de flujo subterráneo. Se utiliza tanto en forma de las versiones gratuitas proporcionadas por el USGS como de versiones comerciales que añaden mucha capacidad de preproceso de datos y postproceso de resultados, manteniendo el núcleo de cálculo original del MODFLOW. La búsqueda tampoco se ha detectado ningún programa comercial con mejoras que aconsejaran su uso en Tenerife, por lo que los análisis se han centrado en las nuevas versiones de MODFLOW y sus derivados.

Se ha confirmado que no existen programas comerciales basados en MODFLOW que puedan mejorar los cálculos del MSFS porque desde su lanzamiento en 1982 sólo se ha producido una mejora conceptual en la metodología original. Se trata del desarrollo del llamado módulo Stream que realiza un balance conjunto de la interacción aguas superficiales – subterráneas que mejora el módulo original RIVER, válido para ríos con caudal permanente. Este módulo no es necesario en Tenerife, donde no se produce esa conexión hidráulica en régimen saturado, diferente de la infiltración ya calculada con el modelo de hidrología de superficie.

Es interesante observar que el USGS presentó en 2011 el MODFLOW – NWT, desarrollado específicamente para tratar el problema de secado y recuperación de celdas a lo largo de la simulación, problema ya resuelto en la personalización del MSFS para Tenerife. Probablemente es un método más potente que el usado en el MSFS, que incluso cambia la formulación del sistema de ecuaciones, pero si se adoptara para sustituir el modelo actual tendría que ser modificado a fondo para introducir el resto de las personalizaciones introducidas, fundamentalmente el tratamiento del tensor de anisotropía, el de

la reprofundización de las galerías y el tratamiento diferenciado de los retornos de riego que, en los MODFLOW normales se trata como un componente más de la recarga.

No se ha encontrado ningún método que permita tratar de forma más correcta la extracción de agua por galerías, donde es necesario definir el caudal extraído en cada momento en cada celda. Si se trataran como drenes habría que ajustar una a una las conductividades de cada una para que el caudal calculado por el modelo coincidiera con el registrado en los datos, tarea prácticamente imposible.

Como conclusión, se puede afirmar que no existe en el momento actual ningún software que mejore el cálculo del flujo realizado por el MODFLOW personalizado que usa el MSFS. Quizás se podría probar con el citado MODFLOW – NWT, pero exigiría un trabajo muy laborioso para incorporar el necesario tratamiento de las singularidades de Tenerife, y no se puede garantizar a priori que los resultados fueran más correctos.

### 3.6 Discretización de la malla del MSFS

Se ha analizado la posibilidad de mejora del MSFS mediante la reducción del tamaño actual de la malla, de 1000x1000 m, a los 200x200 m de la malla usada por el modelo de hidrología de superficie.

A este respecto, hay que recordar que en el informe de 2002 se decía:

*“**Sobre la estructura del modelo:** La calibración del modelo no ha indicado la conveniencia o la necesidad de emplear una malla más detallada. De hecho, se realizaron algunas pruebas con malla de 500 m, que multiplica por cuatro el número de celdas, pero se obtuvieron resultados muy similares a los de la malla de 1 km, sin solucionar el problema que se analizaba. Tampoco se ha planteado la necesidad de trabajar con mayor número de capas o con un tratamiento diferente de los ejes, los mortales o las zonas de baja permeabilidad”.*

Este comentario sigue siendo válido en la actualidad. Los mayores interrogantes del MSFS, cuya resolución, incluso parcial, podría mejorar la respuesta del modelo son el escaso conocimiento de la hidráulica de las galerías según su tipología —como se comentó en el apartado anterior— y la posición de la superficie freática que se discute en el siguiente. Esto implica que, en opinión del autor de este informe, la aparente mayor precisión derivada del uso de una malla más pequeña no aportaría más conocimiento del flujo subterráneo ni daría mejor capacidad de predicción al modelo.

Por otra parte, aunque es un problema menor, el tiempo de cálculo aumentaría exponencialmente porque la reducción del ancho de malla de 1000 a 200 m multiplicaría por 25 el número de celdas. Para mantener la coherencia dimensional, habría que aumentar también el número de capas, como mínimo subdividiendo las tres superiores en dos, con lo que el número de ecuaciones y el tiempo de cálculo se multiplicaría por 50. Además, la masa de datos y resultados manejada por el modelo sería mucho mayor.

En cualquier caso, el argumento principal contrario a la reducción de la malla es el basado en el principio general de que **el nivel de detalle de cualquier modelo debe ser coherente con el nivel de conocimiento de los datos y sus objetivos**. En el caso del flujo subterráneo de Tenerife, ni los datos geométricos (muro y techo de las formaciones) ni los hidrogeológicos (permeabilidad y almacenamiento) tienen mayor precisión que esa.

Sólo los datos de recarga, generados por el modelo de hidrología de superficie vienen expresados en malla de 200 m. En este sentido, hay que recordar que en este modelo se redujo de 1000 a 200 m la malla para representar con mayor detalle la infiltración en los barrancos —se daba el caso de que con celdas de 1000 m coincidían hasta cinco— y la lluvia horizontal. Además, el CITAF consideraba que era necesario dar los resultados para barrancos individuales, por lo que se decidió pasar a celdas de menor tamaño. Sin embargo, en el modelo de flujo subterráneo no es necesario llegar a tanta precisión en la infiltración, porque se repartirá por el terreno de alrededor durante el tiempo y recorrido necesario para alcanzar el nivel freático e incorporarse la circulación en la zona saturada, que es la simulada con el MSFS.

La conclusión es que no se recomienda reducir la malla del MSFS porque no garantizaría la obtención de resultados más precisos.

#### **4 POSICIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE FREÁTICA**

En el momento actual se dispone de las superficies freáticas de 1985 y 1997 y está a punto de terminarse la definición de la de 2015. Por lo tanto, en las últimas calibraciones —realizadas en 2008 y, parcialmente, en 2011—, se han utilizado aquéllas. Ambas superficies coinciden en su planteamiento: son superficies de mínimos, porque el nivel freático se sitúa, a falta de información, en el frente de las galerías.

Sin embargo, la de 2015 se ha beneficiado de la existencia de datos sobre la ubicación de los alumbramientos de las galerías, lo cual permite situar el nivel algo más alto que si se colocara en el frente. No se tiene información sobre si se ha hecho una comparación entre las superficies obtenidas con los dos métodos —nivel en el frente o en el

primer alumbramiento— porque es muy probable que haya diferencias significativas en algunas zonas. En cualquier caso, los datos y el método usado en el dibujo de la superficie de 2015 supone un avance cualitativo respecto a las superficies de mínimos de 1985 y 1997.

Al parecer, no existen esos datos de situación de alumbramientos en 1985 y 97. Sin embargo, sería posible utilizar los de 2015 para reestimar sus respectivas superficies freáticas. En efecto, si, en aquellas fechas, el frente de una galería se encontrara más profundo que el primer alumbramiento de 2015, sería correcto suponer que el nivel en esos años no estaba en el frente sino, como mínimo, en el primer alumbramiento. Por lo tanto, en todas las galerías en que se diera esa circunstancia se podría reestimar con mayor precisión el nivel freático mínimo. Por supuesto, no servirían los datos de alumbramiento de las galerías en que en 1985 o 1997 el frente aún no hubiera alcanzado el primer alumbramiento según los datos de 2015.

Por otra parte se ha analizado la posibilidad de relacionar numéricamente el caudal drenado por una galería y la carga hidráulica. Si se pudiera definir esa relación, con carácter general o por zonas o tipos de obra, se podría asignar un nivel diferente en 1985, 1997 y 2015 a una galería en la que no se ha reperforado que, con el criterio de la cota del frente lo tendría igual. La idea es traducir el descenso de caudal a un descenso de carga hidráulica. Sin embargo, no se ha llegado a conclusiones optimistas. Es improbable que partiendo del dato objetivo del caudal y el conocimiento subjetivo sobre el tipo de galería y sus alumbramientos y la hidrogeología de la zona sea posible obtener esa relación carga – caudal sin hacer demasiadas hipótesis sobre parámetros intermedios que conducirían a resultados muy poco fiables.

La conclusión es que sería recomendable revisar las isopiezas de 1985 y 1997 usando el criterio empleado en el dibujo de las de 2015, basándose en el empleo de los datos de alumbramientos disponibles. De esta forma se conseguirían unas isopiezas menos extremas —recordemos que ahora representan la cota mínima a que se encuentra la superficie freática— y, por otra parte, se dispondría de isopiezas obtenidas con criterio homogéneo.

## **5 CONVENIENCIA DE RECALIBRAR EL MODELO**

En cualquier modelo de flujo subterráneo, la recomendación sobre la conveniencia de recalibrarlo responde a dos tipos de razones, la existencia de nuevos datos hidrogeológicos y la prolongación del anterior periodo de calibración hasta la actualidad. En el

caso de Tenerife, aparece un tercer factor que es la eventual revisión de las superficies freáticas usadas en la anterior calibración. Por lo tanto, en lo que se refiere al MSFS, la situación es la siguiente:

1. Nuevos datos: no parecen existir nuevos datos hidrogeológicos o estructurales que aconsejen revisar el modelo porque cambian significativamente las características de la Isla o de alguna zona concreta. Si se consiguiera redefinir mejor la posición de los mortales y/o del zócalo impermeable sería necesario proceder a la recalibración. En cualquier caso, hay que insistir en la necesidad de mejorar sistemáticamente el conocimiento sobre las características hidrogeológicas de la Isla.
2. Actualización del periodo de calibración: el CIATF dispone, o puede disponer a corto plazo, de los datos de recargas, retornos de riego y extracciones desde 2008 hasta 2015 celda a celda, de las nuevas isopiezas de 2015 y de la evolución de nivel en los sondeos S-1 y S-2 de Las Cañadas y en varios pozos de Los Rodeos. En vista de ello, **se recomienda realizar una recalibración del modelo** por dos razones:
  - Porque permitiría hacer las simulaciones de pronóstico de futuro **a partir de la situación de 2015 en lugar de la de 2005** como se hace hasta el momento.
3. Porque esta recalibración permitiría **comprobar el ajuste del modelo en 2015, fecha mucho más reciente que la de 1997** con la que se realizó la última recalibración general<sup>5</sup>. De este modo se contestaría a las eventuales críticas de que **se trabaja con información obsoleta** puesto que en 2016 aún se maneja la calibración realizada con las isopiezas de 1997. Hay que observar que el nuevo ajuste se debería hacer sólo con las isopiezas del 2015, puesto que se han trazado con un criterio diferente al de las anteriores, menos conservador. En todo caso, se podría comprobar si, en general, los niveles calculados en 1985 y 1997 quedan por encima de las isopiezas de mínimos estimadas en estas fechas.

Los trabajos a realizar para la recalibración exigirían, en primera instancia, actualizar los datos del modelo, introduciendo los datos de recarga, retornos de riego y extracciones desde 2006 hasta la fecha más reciente con valores conocidos de estas variables —2015 o 2016—, sin olvidar los cambios derivados de los nuevos datos hidrogeológicos

---

<sup>5</sup> Hay que recordar que la recalibración de 2011 fue parcial puesto que se centró en Las Cañadas y Los Rodeos, donde se disponía de datos de evolución de nivel en sondeos y pozos

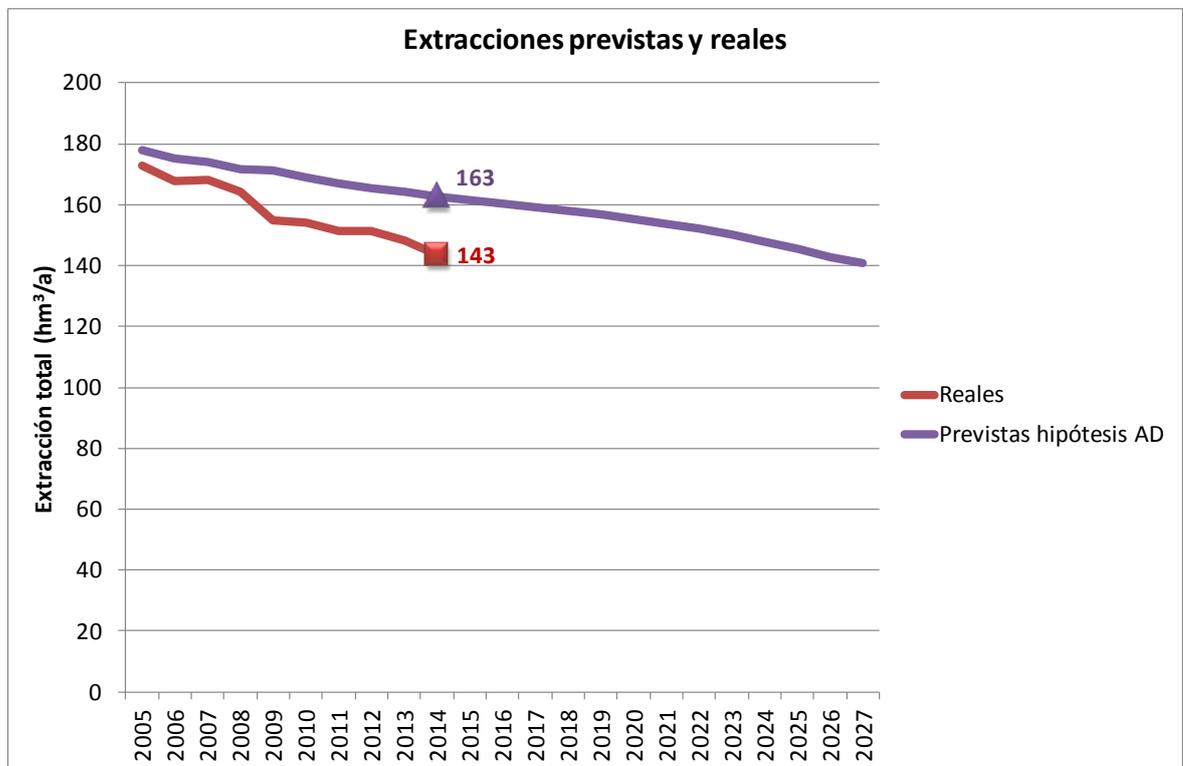
disponibles, si fuera necesario. A continuación, habría que actualizar las series de niveles observados en pozos y piezómetros en las hojas Excel de comprobación de ajuste y la superficie piezométrica de 2015 en el GIS. Entonces se procedería a simular el periodo 1925- 2015 (o 2016) y, por tanteos, ajustar de los parámetros del modelo. Para ello, será preciso retocar principalmente las permeabilidades, sin olvidar los coeficientes de almacenamiento, hasta conseguir que la superficie piezométrica calculada en 2015 se ajuste lo mejor posible a la observada en esa fecha y la evolución de los niveles observados en pozos y piezómetros se reproduzca correctamente.

El proceso de ajuste debería retocar no sólo el valor asignado a los grupos de permeabilidad de las distintas zonas, También se deberían revisar las permeabilidades y coeficientes de almacenamiento en las zonas singulares introducidas en la calibración actual para mejorar el ajuste en áreas específicas —como los bordes del Valle de Icod o las zonas de baja permeabilidad—, en la idea de minimizar los cambios bruscos dentro de cada sector no justificados por razones hidrogeológicas.

Con estos trabajos concluiría la recalibración propiamente dicha pero, a continuación, **sería necesario actualizar el modelo de simulación de alternativas de futuro.** Hay que recordar que, en el momento actual, estas simulaciones de futuro parten de la superficie piezométrica de 2005 en cada capa calculada por el modelo en su simulación histórica y estiman la evolución del flujo subterráneo en la Isla hasta 2039 aplicando las recargas y extracciones reales 2005-07 y las estimadas para las tres hipótesis de futuro de recargas y las tres de extracciones para 2008-39.

Por lo tanto, el modelo de futuro actualizado no sólo debería incluir los parámetros hidrogeológicos reajustados sino que debería partir de la nueva superficie piezométrica calculada con el modelo recalibrado en 2015 o 2016 y aplicar las recargas y extracciones reales hasta 2015 o 2016 y, a continuación, las hipótesis de futuro de recargas y extracciones que plantee el Plan Hidrológico en ese momento.

Como ejemplo, es interesante observar la Figura 15, donde se comparan las extracciones reales totales entre 2005 y 2014 y las previstas en la hipótesis adaptativa —que es la que reflejaba la tendencia estimada en la hipótesis de futuro del informe 2011. Como se ve, las extracciones reales en 2014 fueron de sólo el 88% de las previstas y corresponden a las que se suponían para el año 2026. Por lo tanto, es necesario actualizar esas proyecciones ante la evidencia de que la realidad indica una reducción de extracciones mayor de la prevista.



**Figura 15.- Extracciones en la Isla: previstas y reales 2005-2014 (hm³/a)**

Este nuevo modelo de futuro debería utilizarse para las revisiones exigidas por los sucesivos Ciclos de Planificación y sería el que debería manejar la aplicación informática cuya viabilidad se analiza en el capítulo 7, en caso de desarrollarse. Cabría la posibilidad de no recalibrar el modelo y limitarse a actualizar las previsiones de recarga y extracción en el modelo de futuro, pero no tendría mucho sentido porque seguiría apoyándose en el ajuste a la superficie de 1997.

## **6 DESARROLLO DE MODELOS DETALLADOS DE ZONAS DE INTERÉS**

El CIATFE ha planteado la posibilidad de realizar submodelos de zonas donde se necesite un análisis más detallado. Hay que partir de la base de que la versión del Modflow en que se sustenta el modelo está personalizada para simular la Isla, por lo que la realización de cualquier submodelo con ese método implicaría, en principio, el desarrollo de una versión específica para la zona modificando no sólo los datos sino también el programa. En tal caso habría que descartar la posibilidad de realización de submodelos por ser demasiado complicada.

Sin embargo, si la zona a simular no está afectada por los ejes estructurales ni la reprofundización de galerías, se podría utilizar una versión estándar del Modflow, por ejemplo la aplicación comercial Visual Modflow o la gratuita del USGS ModelMuse.

Las zonas en que se puede asegurar a priori que se cumplen las condiciones citadas son las zonas costeras. Zonas interiores, por ejemplo la de Los Rodeos, deberían ser analizadas en detalle para comprobar si es posible usar la metodología estándar. Desde luego, hay que descartar las zonas claramente afectadas por los ejes estructurales, como Las Cañadas o la Dorsal NE.

En esas zonas costeras sería posible desarrollar con cierta facilidad el submodelo de una zona rectangular con malla todo lo fina que fuera necesario, imponiendo en su contorno los niveles o caudales calculados con el modelo general para el periodo en que se quiere realizar el análisis con el submodelo.

En zonas interiores no es posible estimar el plazo porque, como se ha dicho, sería necesario analizar previamente si es posible desarrollar un modelo con metodología estándar y, en caso de encontrar alguna anomalía, investigar la forma de tratarla.

## **7 POSIBILIDAD DE DESARROLLO DE UNA INTERFAZ ACCESIBLE PARA UN USUARIO NO EXPERTO**

El objetivo de la aplicación a desarrollar es permitir a los técnicos del CIATF la realización de nuevas simulaciones de futuro con el Modelo de Simulación del Flujo Subterráneo de la isla de Tenerife (MSFS).

Se parte de la idea de que no es recomendable que la aplicación permita recalibrar del modelo. Primero, porque es una labor de expertos y para realizarla dentro del CIATF,

se debería formar a alguno de sus técnicos en el desarrollo y utilización de modelos de flujo o contratar un especialista, Además, sería una aplicación muy complicada, que debería incluir numerosas opciones no contempladas en la valoración que se hace al final de este capítulo.

Las razones sobre la conveniencia de desarrollar una aplicación específica es doble. Primero, porque han transcurrido más de 35 años desde la formulación de la primera versión del modelo de la Isla (1980) y 23 desde el primer modelo detallado (1991). A lo largo de este período la complejidad de manejo del modelo ha aumentado hasta el punto de que la ejecución de una nueva simulación de futuro aconseja la “limpieza” y automatización del proceso. Segundo, porque en su estado actual es muy difícil que pueda ser utilizada por técnicos no especializados, ya que requiere necesariamente la intervención de personas con conocimientos profundos sobre el uso y la historia de la herramienta.

En las más de dos décadas transcurridas se han producido cambios tecnológicos muy profundos, desde la aparición de los ordenadores personales basados en el sistema operativo MS-DOS hasta la irrupción de los sistemas de cálculo interactivo basados en las diferentes y numerosas versiones de Windows. Con estos antecedentes, la ejecución de una nueva simulación exige el uso de numerosas herramientas auxiliares escritas en lenguajes diferentes y que periódicamente quedan obsoletas por problemas de incompatibilidad con los nuevos sistemas operativos.

El objetivo de la aplicación a desarrollar es automatizar los procesos de preparación de datos de simulación y postproceso de datos hasta lograr un instrumento que permita a los técnicos del CIATF ejecutar nuevas hipótesis sin apoyo externo. Con esta filosofía, la aplicación integraría —y en su caso renovarían con código moderno— los procedimientos de tratamiento de ficheros de datos que se necesita ejecutar para preparar los ficheros de datos que permiten simular nuevas hipótesis con el MSFS. El Anejo adjunto resume los procedimientos actuales y analiza las posibilidades de incorporación a una aplicación informática.

Con la nueva aplicación, el usuario se limitaría a preparar los datos externos que el modelo precisa (recarga por infiltración, extracciones y retornos de riego) y seleccionar las hipótesis a simular. Una vez elegida, la aplicación arrancarían un proceso cuyo final es la generación del fichero de datos de simulación correspondiente a la hipótesis deseada. A continuación ejecutarían —previa aceptación con complementos visuales de los datos de partida— el MSFS y los procesos posteriores sobre los resultados para analizar en detalle los efectos sobre el acuífero, particularmente los balances de agua.



La aplicación presenta dos ventajas fundamentales para el uso de la herramienta y su futura supervivencia:

- La autosuficiencia de los técnicos del CIATF para simular de nuevas hipótesis de cálculo
- La modernización de los procedimientos de preparación de datos, lo que garantizaría la conservación de la operatividad del modelo en futuros cambios tecnológicos (los procedimientos programados serían entregados al Cabildo para garantizar la actualización futura)

La actualización presupone entre otros condicionantes:

- El MSFS se ejecutará en su versión actual, basado en la última calibración.
- Las opciones adicionales a la modificación de los datos externos de recargas y extracciones serán limitadas, a discutir antes del desarrollo.
- Los datos generados en la actualidad por el CIATF —generalmente en formato Access— serán revisados para prefijar los más convenientes para sus técnicos y el futuro de la aplicación.
- Debe determinarse el procedimiento para la visualización de datos previa a la simulación o posterior a la simulación.

En esencia, la aplicación realizaría las funciones que muestra el esquema siguiente:

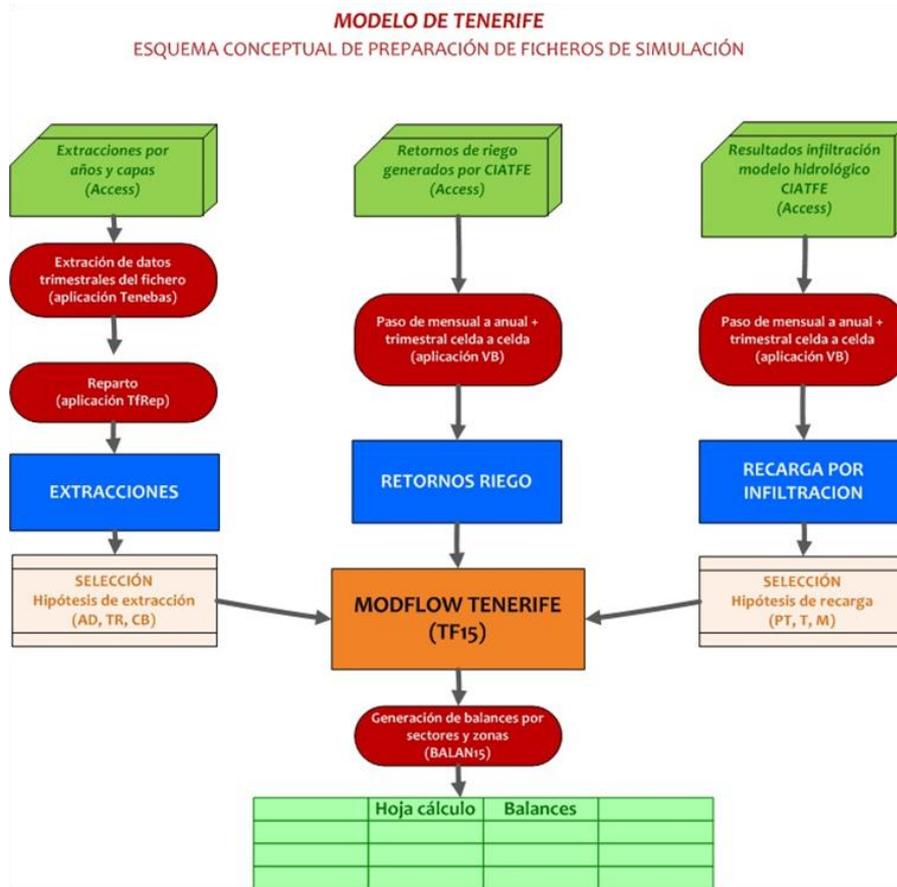


Figura 16.- Esquema operativo de la aplicación propuesta

## 8 JORNADA TÉCNICA DIVULGATIVA DEL 6 DE ABRIL DE 2016

El día 6 de abril de 2016, en el auditorio del Museo de la Naturaleza y el Hombre se celebró una Jornada bajo el título “Estado cuantitativo de las Masas de Agua Subterránea de Tenerife” (ver Figura 17 adjunta) en la que se hizo una presentación sobre el Modelo de Simulación del Flujo Subterráneo.

**Plan Hidrológico de Tenerife**  
2º Ciclo de planificación

**Estado Cuantitativo de las Masas de Agua Subterránea de Tenerife**  
6 de abril de 2016

En abril de 2015 se aprobó definitivamente el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Tenerife (Decreto 49/2015, BOC nº 85) que, entre otros aspectos, evalúa el estado de las masas de agua superficiales y subterráneas de la Demarcación.

En el proceso de participación pública que acompañó la tramitación de este 1º Ciclo de Planificación se generó cierta controversia en relación con los indicadores usados para determinar el estado cuantitativo de las masas de agua subterráneas y, en particular, la validez del Modelo Matemático para la Simulación del Flujo Subterráneo en Tenerife (MFS) como herramienta para obtener balances y predecir la evolución del sistema acuifero ante distintas alternativas de recarga y extracción.

En este momento el Consejo Insular de Aguas de Tenerife está inmerso en la elaboración del 2º Ciclo de Planificación Hidrológica (2015-2021) y, en este contexto, se promueve una jornada divulgativa y de debate de los indicadores usados para clasificar el estado cuantitativo de las masas de agua subterránea, el resultado del programa de seguimiento y control y la conveniencia de abordar, en su caso, la revisión y actualización del MSF.

<b>PROGRAMA</b>		
<b>Apertura.</b>	Manuel Fernando Martínez Álvarez Consejero de Aguas del Cabildo de Tenerife	18:00 a 18:05
<b>Introducción.</b>	Javier Davara Méndez Gerente del CIATF	18:05 a 18:10
<b>Segundo ciclo de la Planificación Hidrológica.</b>	Yazmina León Martínez Jefa Secc. de Gestión Admva. del Área de Infra. del CIATF	18:15 a 18:30
<b>Evaluación del estado cuantitativo.</b>	Isabel Farrujia de La Rosa Jefa Dpto. Recursos Subterráneos	18:30 a 19:00
<b>Modelo de simulación de flujo subterráneo.</b>	Luis López García SURGE Estudios Hidráulicos e Hidrológicos S.L.	19:00 a 19:45
<b>Debate</b>		

**Lugar de celebración**  
Museo de La Naturaleza y El Hombre  
c/ Fuente Morales, 1  
Santa Cruz de Tenerife

**Colabora:**

**Información y preinscripción**  
Consejo Insular de Aguas de Tenerife  
c/ Leoncio Rodríguez nº 3, 2ª Planta  
Santa Cruz de Tenerife  
Tno 922 208827

Entrada Libre, aforo limitado  
[www.aquastenerife.org](http://www.aquastenerife.org)

**Figura 17.- Convocatoria de la Jornada Técnica Divulgativa**

En la citada presentación se expuso el concepto del MSFS, la historia de su desarrollo desde 1980 a la actualidad, su utilidad, fortalezas y debilidades, y las posibilidades de mejora a corto plazo . En el coloquio posterior no se planteó ninguna pregunta crítica con lo expuesto. La presentación se entrega en forma de archivo digital.

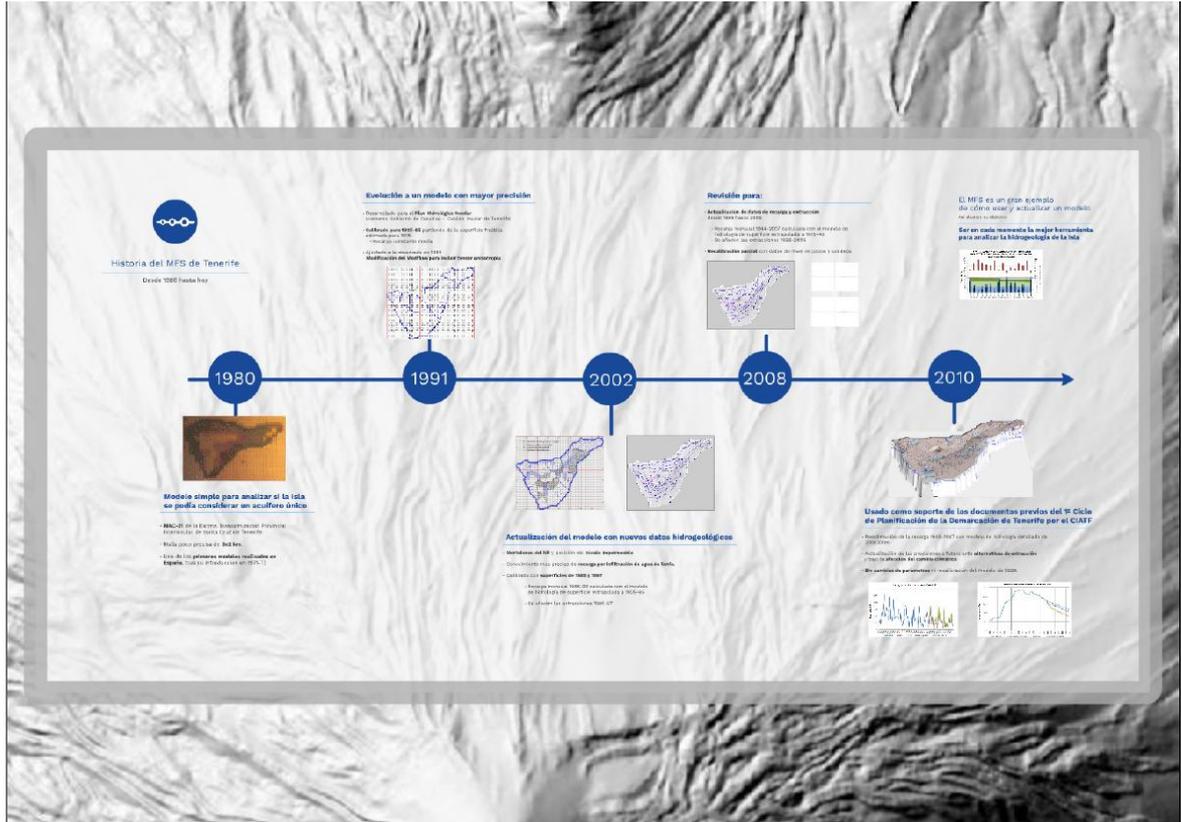


Figura 18.- Ejemplos de diapositivas de la presentación

## **9 CONCLUSIONES**

### **9.1 Conclusiones generales**

Los capítulos anteriores describen los trabajos realizados para cumplir las especificaciones del servicio contratado con fecha 12 de noviembre de 2015 para hacer una revisión crítica de la modelación de la simulación del flujo subterráneo de Tenerife.

Los aspectos más importantes son los siguientes:

- Se ha revisado la evolución del MSFS definiendo los cambios más importantes realizados en las sucesivas versiones.
- Se ha realizado un extenso análisis de la evolución futura de los niveles y variables del balance apoyado en una simulación utópica de largo plazo que explica las afirmaciones puestas en cuestión en algunos ámbitos. Las conclusiones alcanzadas se resumen en la página siguiente.
- No se recomienda cambiar la discretización del modelo —ni reduciendo el tamaño de malla ni aumentando el número de capas, por no estar justificado con la información hidrogeológica disponible a corto y medio plazo.
- Se propone recalibrar el modelo, aunque los nuevos datos hidrogeológicos disponibles a corto plazo no lo exige. Pero el hecho de disponer de la superficie freática de 2015 implica que convendría reajustarlo tanto por apoyarse en una superficie mucho más moderna que la última de 1997, como porque la de 2015 está dibujada con un criterio menos conservador. De este modo, las simulaciones de futuro se realizarían a partir de la situación real de 2015 en lugar de la de 2005 usada ahora.
- Se podrían desarrollar submodelos de zonas de interés, con cierta facilidad, a condición de que no se sitúen en zonas interiores afectadas por los ejes estructurales.
- Se propone un planteamiento y presupuesto de desarrollo de una aplicación informática que permita a los técnicos del CIATF realizar simulaciones de futuro. No se considera posible una aplicación que permita la recalibración, tarea reservada a especialistas en modelos de flujo subterráneo.
- Se comenta la Jornada Técnica realizada el 6 de abril de 2016.

### **9.2 Conclusiones particulares sobre la estabilización de niveles**

Es conveniente insistir en las conclusiones alcanzadas en el análisis de resultados realizado en el apartado 3.3. para explicar la evolución de los niveles en distintas zonas.

Se trata de un capítulo difícil de entender debido a la complejidad de la hidrogeología de la Isla. Por lo tanto es oportuno resumirlas.

La primera conclusión de esos análisis es que la evolución de los términos del balance de la Isla y de sectores heterogéneos está bien explicada por el modelo, como muestran las comprobaciones hechas sobre su valor relativo en distintos momentos. Esto quiere decir que si el **índice de explotación es menor que la unidad**, porque las salidas totales —extracciones más salidas al mar o a otros sectores— son menores que las entradas —recarga más retornos más entradas de otros sectores— **la aportación de reservas será negativa y los niveles subirán. En caso contrario, bajarán.**

Otro problema es la velocidad con la que los niveles suben o bajan hasta alcanzar el equilibrio, es decir, el índice igual a la unidad. La única variable que utiliza el sistema para ello son las entradas y salidas por los bordes y las salidas al mar. Efectivamente, **si entra más agua de la que sale los niveles tenderán a subir para así aumentar el gradiente de la superficie piezométrica y por tanto, las salidas hasta conseguir que éstas se igualen a las entradas.** Ese reajuste de niveles, siempre lento en un medio de tan baja permeabilidad, será tanto más rápido cuanto más fuerte sea la reducción de extracciones en relación con la variación de recargas.

Para ilustrar estos conceptos, se debe observar la Figura 19, igual a la Figura 5 salvo que incluye una tabla que indica las medias móviles de 25 de los años anteriores a las fechas indicadas de recarga total, extracciones e índice de explotación. Los años seleccionados son 1981-2005, dentro del periodo histórico, 2040-2064, periodo en el que se estabilizan las recargas y extracciones y 2076-2100 para comprobación de la evolución del índice de explotación tras la estabilización.

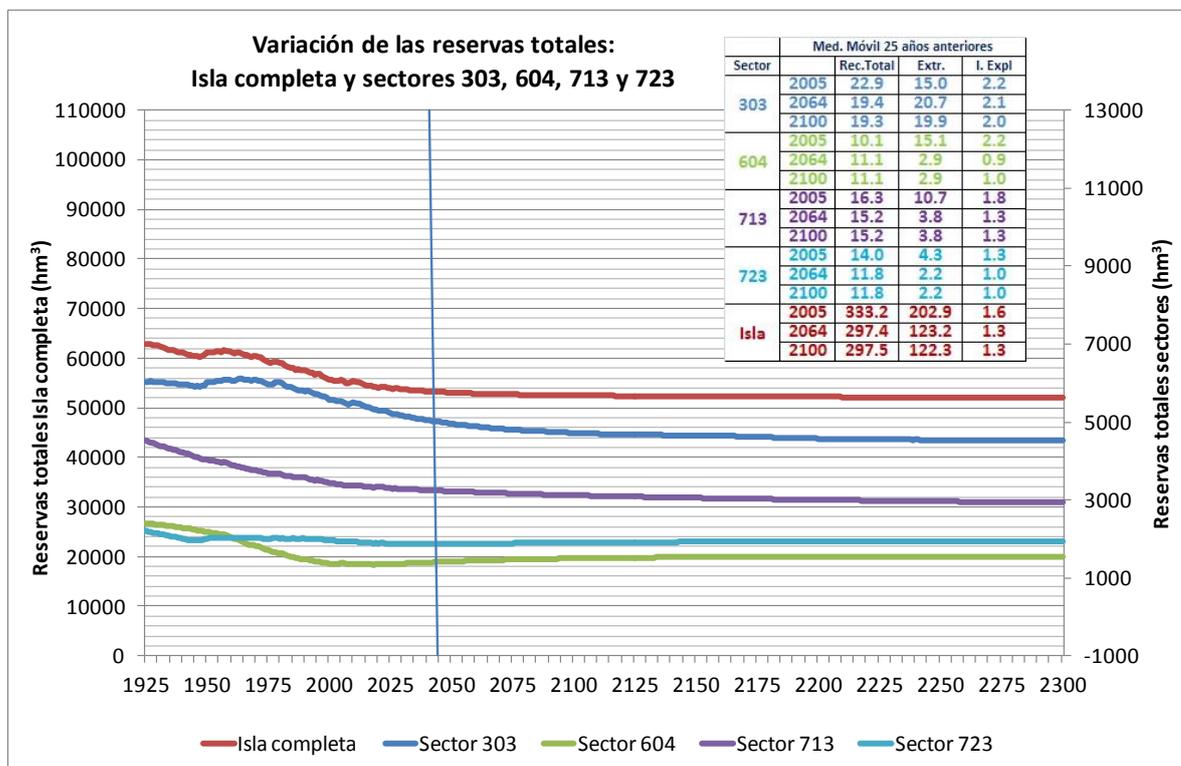
Es inmediato observar que en los sectores 604 y 723, donde se produce **una fuerte reducción de las extracciones y una pequeña variación de la recarga, el índice baja a valores cercanos a la unidad en el primer periodo y se estabiliza en el segundo.** Consecuentemente, las reservas en esos sectores —como muestran las dos líneas inferiores del gráfico— aumentan a partir de 2040 **reflejando una subida de los niveles, y al final tienden a estabilizarse puesto que el índice de explotación es la unidad**, es decir, las entradas y salidas están en equilibrio.

Sin embargo, los sectores 303 y 713 funcionan de forma distinta. En el primer caso, las extracciones son muy grandes e incluso aumentan, por lo que **el índice de explotación es excesivo, mayor que dos, y las reservas y niveles bajan continuamente**

(línea azul oscuro). El índice tiende a bajar por la reducción de los caudales de salida y por la sequía de galerías, como indica la bajada de las extracciones de 20.7 a 19.9.

El 713 tiene unas extracciones altas que se reducen mucho y una ligera bajada de la recarga (cifras en morado) pero **su índice de explotación es alto porque las salidas por los bordes son grandes. Por ello, las reservas bajan continuamente** hasta que se reajusten los gradientes de salida.

En el caso de la Isla completa, la situación es parecida a la del sector anterior aunque no tan grave. Las extracciones bajan mucho pero el índice de explotación es alto, de 1.6, que **lentamente baja hasta 1.3 debido a la reducción de las salidas al mar inducida por los descensos de gradiente costero, que son muy lentos.**



**Figura 19.- Evolución de reservas totales en la Isla y los sectores 303, 604, 713 y 723**

Por lo tanto, la velocidad de estabilización de niveles depende tanto de la relación entre las recargas y extracciones futuras supuestas como de la situación de los sectores analizados, donde la reducción de salidas a otros sectores o al mar para bajar el índice de explotación a la unidad puede ser más o menos lenta en función de las características del sector y su situación en la Isla.

**Anejo:**

**Procedimientos actuales para la simulación de alternativas y análisis de las posibilidades de uso a través de una aplicación informática manejable por usuarios no expertos**



## 1 PROGRAMAS DE SIMULACIÓN Y BALANCE: EJECUCIÓN, DATOS Y RESULTADOS

Requiere la ejecución de dos programas, el Modflow personalizado para Tenerife Tf15 y el Balan15 para calcular balances por sectores y zonas hidrogeológicas.

### 1. Tf15:

- Las simulaciones de futuro se realizan mediante un fichero batch que lee un txt con los nombres de los ficheros de entrada y salida.

- ✓ Hp\_YY\_XX.bat: XX es la hipótesis de extracciones y retornos, que van asociadas (hay tres, AD, TR y CB) e YY la de recarga (hay tres, PT, T y M)

*TF15<Hp\_YY\_XX.txt*

*copy nivel Nv\_YY\_XX.res*

*copy balance Bl\_YY\_XX.res*

*copy balan.res bl\_YY\_XX.re2*

*copy infprof.txt Pr\_YY\_XX.res*

*copy secos.txt Sc\_YY\_XX.res*

- ✓ Hp\_YY\_XX.txt:

*Sl\_YY\_XX.res*

*H\_YY\_XX*

*ZFBAS.dat*

*ZFBlo.dat*

*W\_TR.dat*

*RRG\_TR.dat*

*R\_PT.dat*

*SORT.dat*

*SALTF.dat*

*Q\_YY\_XX.res*

*H\_YY\_XX.res*

- Datos: siete ficheros ASCII que corresponden a módulos del Modflow original y a alguno desarrollado para Tenerife

- ✓ ZFBAS.dat: módulo básico del Modflow.

- Condición de contorno, invariable
- Estado inicial: se podría ofrecer la posibilidad de cambiarla (usando las tablas de niveles en cada capa producida por otra simulación)
- Última ficha con años en los que se desea tener tablas de niveles: se deberían poder cambiar por menú

- ✓ ZFBLO.dat: datos hidrogeológicos. No se debería cambiar nada, sólo en la calibración que no deben hacer en el CIATF

- Grupos de permeabilidad
- Variación vertical de la permeabilidad por capas

- Grupos de anisotropía
- Para cada capa (hay cuatro capas, la última inactiva para el flujo): coeficiente de almacenamiento libre, azimut de anisotropía, número de sector (sólo en la primera capa), número de grupo de k de cada celda, cota del muro, cota del techo, coeficiente de almacenamiento confinado
- La última tabla especifica la celda vecina a la que se trasladan las extracciones en caso de sequía de la celda original, para simular la profundización de las galerías. Opcional si en penúltimo registro de ZFBas.dat NPROF>0
- ✓ W\_XX: fichero de extracciones de la hipótesis de futuro simulada XX (hay tres, AD, TR y CB)
 

Sería uno de los datos a modificar, bien para actualizar desde el 2005 inicial hasta el año en cuestión con datos reales que se vayan obteniendo o para hacer nuevas hipótesis de futuro.

Formato: los años en que hay dato se da una cabecera especificando el año, seguido de las cuatro matrices que indican las extracciones en cada capa para cada celda. Las extracciones de cada trimestre simulado se obtienen por interpolación entre las de los años en los que se dan datos.

OJO: estas tablas son el resultado de pasar el programa TfRep15 para repartir las extracciones originales en cada celda en las de alrededor en algunos casos, con criterio especificado por el CIATF.
- ✓ RRG\_XX: fichero de retornos de riego de la hipótesis de futuro simulada XX (hay tres, AD, TR y CB). Dato a modificar, como las extracciones.
 

Formato: se da una cabecera especificando el año, seguido de una matriz con los retornos que se aplican en la capa 1 o superior
- ✓ R\_YY: fichero de recarga por infiltración de la hipótesis de futuro simulada YY (hay tres, PT, T y M). Dato a modificar, como las extracciones y los retornos, para actualizar o crear nuevas hipótesis de futuro con los resultados del modelo hidrológico.
 

Formato: el original de Modflow, con una cabecera para cada trimestre con un doble cero que indica que se leen datos, el año, seguida de una matriz con las recargas que se aplican en la primera celda activa (no seca) que encuentre.
- ✓ SORT.dat: fichero fijo con los parámetros de convergencia del método numérico.
- ✓ SALTf.dat: fichero de configuración de los resultados “de impresora”. No lo usarán y no se debería modificar.
- Resultados:
  - ✓ SI\_YY\_XX.res: salida de impresora de la hipótesis XX de extracciones y retornos y la YY de recarga, que no usarán. Esperemos que no salga nunca error de convergencia.
  - ✓ H\_YY\_XXZZ: matrices de niveles en cada celda en los años pedidos en ZFBAS.dat, con encabezamiento para pasar el GridImport de Mapinfo y obtener el grd. ZZ son las dos últimas cifras de los años pedidos. Se podría cambiar para grabar las cuatro cifras pero no es necesario.
  - ✓ Q\_YY\_XX.res: fichero auxiliar para calibración con los términos de balance de cada celda en años determinados. No lo usarán nunca
  - ✓ Nv\_YY\_XX.res (el programa produce el fichero genérico NIVEL): fichero auxiliar para calibración con los niveles en celdas seleccionadas, importable a Excel para comparar niveles calculados y observados. Podría ser útil para comparar la evolución de niveles en varias alternativas, aunque dudo que lo usaran.
  - ✓ BI\_YY\_XX.res (el programa produce el fichero genérico BALANCE): fichero **importante**. Es la entrada al programa de balance Balan15 para calcular balances por sectores y zonas.

- ✓ BI\_YY\_XX.re2 (el programa produce el fichero genérico BALAN.RES): fichero auxiliar para calibración con los términos de balance de determinadas celdas en años determinados. No lo usarán nunca
- ✓ Pr\_YY\_XX.res (el programa produce el fichero genérico INFPROF.TXT): fichero auxiliar con el registro de las galerías que se profundizan. Podría ser útil, pero no creo que lo usen.
- ✓ Sc\_YY\_XX.res (el programa produce el fichero genérico SECOS.TXT): fichero auxiliar con el registro de las celdas que se secan (celda, tiempo y caudal). Podría ser útil, pero no creo que lo usen.

## 2. Balan15:

- Los balances de las hipótesis de futuro se realizan mediante un fichero batch que lee un txt con los nombres de los ficheros de entrada y salida. En este ejemplo se calcula tanto el balance por sectores como por zonas, en pasadas sucesivas
- ✓ BI\_YY\_XX.bat: XX es la hipótesis de extracciones y retornos, que van asociadas (hay tres, AD, TR y CB) e YY la de recarga (hay tres, PT, T y M)

*del BZ\_PT\_AD.tab*

*\tene15\futu15\Balan15<bZ\_PT\_AD.txt*

*del BS\_PT\_AD.tab*

*\tene15\futu15\Balan15<BS\_PT\_AD.txt*

- ✓ BZ\_YY\_XX.txt:

*BI\_PT\_AD.res*

*BS\_PT\_AD.tab*

*S*

*BALS\_EXC.RES*

*2005*

*2027*

*1*

*N*

- Datos: el ficheros ASCII producido en la simulación de esta hipótesis, BI\_YY\_XX.res
- Resultados:
  - ✓ B<sub>z</sub>\_YY\_XX.tab: donde *z* es S para sectores y Z para zonas. Ficheros ASCII formateados en forma de tablas imprimibles
  - ✓ BAL<sub>z</sub>\_EXC.RES: fichero ASCII encolumnado para su importación desde las hojas Excel estándar de manejo de resultados de balance

## 2 DATOS MODIFICABLES POR LA APLICACIÓN

### 2.1 Planteamiento

La aplicación no debe permitir la recalibración del modelo, que es una cuestión de especialistas. Debe estar orientada a realizar simulaciones de las hipótesis de futuro del Plan Hidrológico.

En la actualidad esas simulaciones se realizan desde 2005 hasta 2027 (fecha final del Plan), partiendo de la superficie freática inicial calculada en 2005 la calibración, con datos reales de recarga, retornos de riegos y extracciones hasta 2007 y previstos a partir de ahí hasta 2039. Por tanto, quizás merecería la pena que la aplicación pidiera la fecha del fin de la simulación porque a

medida que se acerque el 2027 el CIATF podría tener necesidad de prolongar las previsiones. Las Excel están preparadas para importar los resultados 2005-2027.

También se deberían poder modificar los años para los que se pide superficie freática ASCII para crear grd con GridImport (datos en dos últimas filas de ZFBas.dat). No creo que se deba dejar quitar la opción de profundización (penúltimas fila de ZFBas.dat).

Los datos primarios que se deberían modificar son las recargas, los retornos de riego y las extracciones. También podría pensarse en cambiar la tabla de profundización de las galerías del ZFBlo.dat.

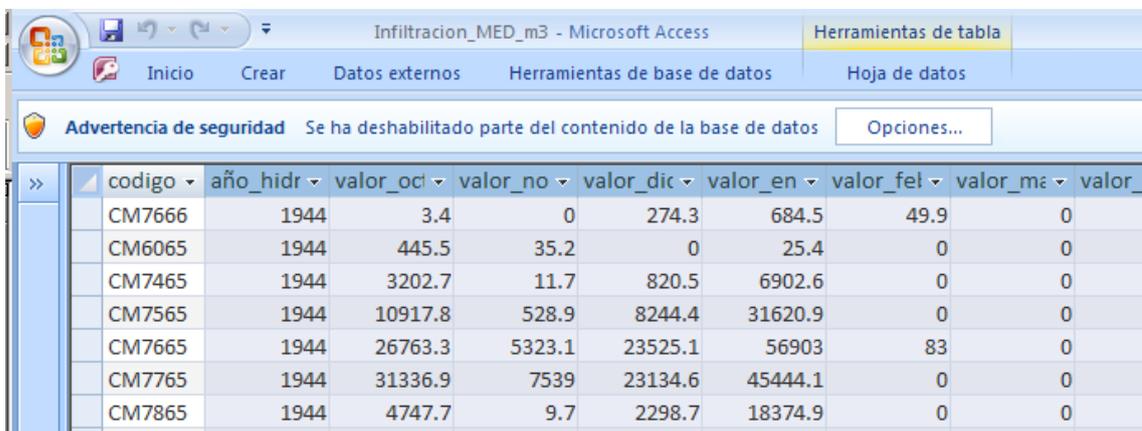
En resumen, se debería proponer que, en esencia, la aplicación debería ser capaz de realizar simulaciones de futuro con nuevos datos de recarga, retornos y extracciones en un periodo de años determinado para los que previamente tendrán que preparar las mdb correspondientes. Los cambios pueden ser una mezcla de actualización con datos reales de las previsiones realizadas en el pasado y nuevas previsiones a partir de la fecha actual (pero eso se debe trabajar aparte, al crear las mdb).

Opcionalmente (aunque es improbable que se utilice) se podría permitir:

- Ampliar la simulación hasta 2040 (o hasta donde se diga)
- Cambiar los años para los que se piden tablas de niveles para crear los grd
- Usar o no la profundización de galerías y/o modificar la tabla de profundización, muy improbable y no recomendable que se use esta opción

## 2.2 Datos de recarga

Proceden de los resultados del modelo hidrológico de superficie. Los datos venían en una mdb Access con la infiltración mensual en cada celda del modelo (la malla tiene 66 filas y 80 columnas). El código CMXXYY indica que es la celda de la fila 66 – YY +1 y columna XX.



codigo	año_hidr	valor_oct	valor_no	valor_dic	valor_en	valor_fel	valor_ma	valor
CM7666	1944	3.4	0	274.3	684.5	49.9	0	
CM6065	1944	445.5	35.2	0	25.4	0	0	
CM7465	1944	3202.7	11.7	820.5	6902.6	0	0	
CM7565	1944	10917.8	528.9	8244.4	31620.9	0	0	
CM7665	1944	26763.3	5323.1	23525.1	56903	83	0	
CM7765	1944	31336.9	7539	23134.6	45444.1	0	0	
CM7865	1944	4747.7	9.7	2298.7	18374.9	0	0	

Parece que la transformación a tablas trimestrales de recarga en cada celda en el format Modflow se hace mediante un programa VB. Hay un fichero Instrucciones programa.txt que dice:

- Opera sobre la Base de datos Infiltra.mdb (ver ejemplo) en Access 97
- Al ejecutar se genera un fichero Prueba.txt de 1943 a 2050 o algo así, pero sólo rellena con valores los años y trimestres con dato

Por lo tanto, para introducir una nueva previsión de recarga el CIATF debería entregar la mdb correspondiente, pasarle el programa VB y pegar las tablas ASCII generadas en el fichero de recarga, nuevo o antiguo modificado.

## 2.2 Datos de retorno de riegos

Proceden de unas mdb Access parecidas, con un campo inicial de valor anual

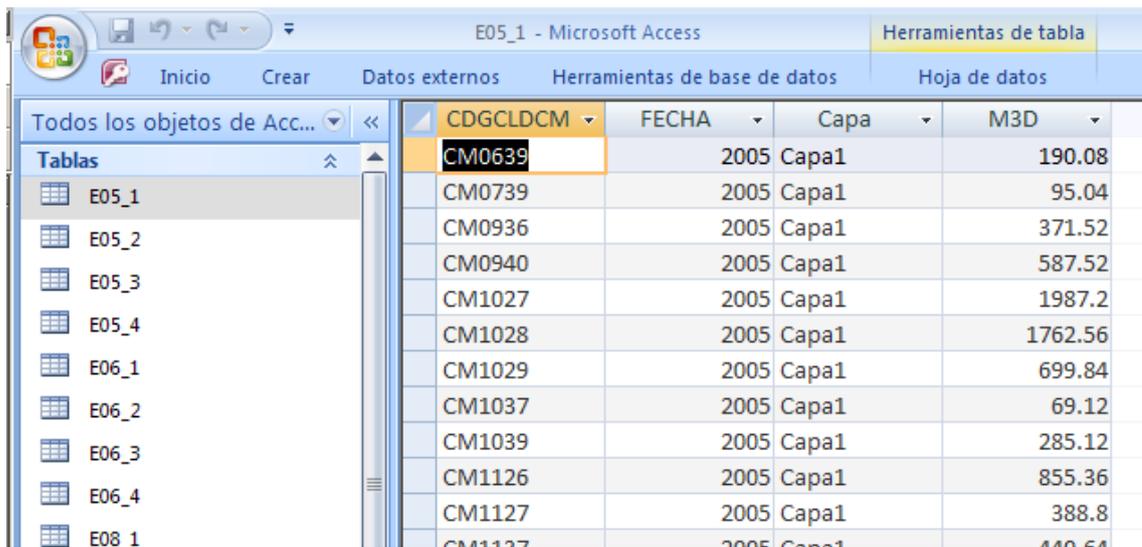


codigo_celd	año_hidrolc	RRAño	valor_enerc	valor_febre	valor_marzoc	valor_abril	val
CM2601	2004		0	0	0	0	0
CM1711	2004		0	0	0	0	0
CM1718	2004	633.39211124	27.326459762	35.831953775	45.332835443	53.838329456	6.
CM3240	2004	130.96276700	6.5481383501	7.8577660201	9.8222075251	11.131835195	1.
CM1722	2004	40.37907191	0	0	3.2303257528	4.8454886292	6.
CM2532	2004		0	0	0	0	0
CM1721	2004	12311.51232	825.67886485	956.21838291	1124.0914221	1230.2682822	1.
CM2533	2004		0	0	0	0	0

La creación de las tablas trimestrales de datos se hace con el mismo programa VB que la recarga, porque salvo el valor anual tiene los mismos campos.

## 2.3 Datos de extracciones

Los datos del CIATF vienen también en mdb de Access, pero con un formato distinto. Quizás ahora haya cambiado. Ya viene el dato trimestral pero en tablas independientes para cada año (en este caso, los trimestres se interpolan entre años consecutivos porque la extracción . Es importante observar que, al revés que las recargas, que van a la capa superior, las extracciones pueden proceder de cualquier capa por lo que para cada año hay que dar cuatro matrices de datos, una por capa. La mdb es:



CDGCLDCM	FECHA	Capa	M3D
CM0639	2005	Capa1	190.08
CM0739	2005	Capa1	95.04
CM0936	2005	Capa1	371.52
CM0940	2005	Capa1	587.52
CM1027	2005	Capa1	1987.2
CM1028	2005	Capa1	1762.56
CM1029	2005	Capa1	699.84
CM1037	2005	Capa1	69.12
CM1039	2005	Capa1	285.12
CM1126	2005	Capa1	855.36
CM1127	2005	Capa1	388.8
CM1127	2005	Capa1	440.64

Donde M3D es el caudal extraído en m<sup>3</sup>/d.

Las tablas se extraen mediante un programa de Vallejo llamado Tenebas. Creo que producía tablas individuales por año y capa que luego se pegan en DOS con Crear.bat:

```
copy e05_1.txt+e05_2.txt +e05_3.txt+e05_4.txt +e06_1.txt+e06_2.txt
+e06_3.txt+e06_4.txt +e08_1.txt+e08_2.txt +e08_3.txt+e08_4.txt
+e10_1.txt+e10_2.txt +e10_3.txt+e10_4.txt +e12_1.txt+e12_2.txt
+e12_3.txt+e12_4.txt +e14_1.txt+e14_2.txt +e14_3.txt+e14_4.txt
+e15_1.txt+e15_2.txt +e15_3.txt+e15_4.txt +e16_1.txt+e16_2.txt
+e16_3.txt+e16_4.txt +e18_1.txt+e18_2.txt +e18_3.txt+e18_4.txt
+e20_1.txt+e20_2.txt +e20_3.txt+e20_4.txt +e22_1.txt+e22_2.txt
+e22_3.txt+e22_4.txt +e24_1.txt+e24_2.txt +e24_3.txt+e24_4.txt
+e26_1.txt+e26_2.txt +e26_3.txt+e26_4.txt +e27_1.txt+e27_2.txt
+e27_3.txt+e27_4.txt +e28_1.txt+e28_2.txt +e28_3.txt+e28_4.txt
```



```
+e30_1.txt+e30_2.txt +e30_3.txt+e30_4.txt +e32_1.txt+e32_2.txt  
+e32_3.txt+e32_4.txt +e34_1.txt+e34_2.txt +e34_3.txt+e34_4.txt  
+e36_1.txt+e36_2.txt +e36_3.txt+e36_4.txt +e38_1.txt+e38_2.txt  
+e38_3.txt+e38_4.txt +e40_1.txt+e40_2.txt +e40_3.txt+e40_4.txt W_AD.txt
```

Podría pedirse al CIATF que diera los datos en otro formato más cómodo.

Sin embargo, una vez creado el fichero de los datos originales hay que pasarlos por el programa de reparto TfRep.exe, un fortran que:

Abre WelRep.res, ZFBas.rep, ZFBlo.dat, ZFWel.rep, Reparto.fin

- Basado en Reparto.fin traslada extracciones

- **Las lee en ZFWel.rep y las reparte y graba en WelRep.res**

- Obtiene directamente el fichero de extracciones que, previo cambio de nombre, debe leer el de simulación Tf15

### 3 RESULTADOS

Los resultados básicos que se consultarán son los ficheros de balance, ejecutando las macros de la hoja Excel estándar para importar los ficheros de balance por sectores y zonas BALS\_EXC.RES y BALZ\_EXC.RES de nombre fijo.

Opcionalmente se podría dar acceso a GridImport para crear los grd a partir de las tablas ASCII H\_YY\_XXZZ.txt comentadas antes. Otra posibilidad es la apuntada de dar acceso a las Excel de representación de evolución de niveles en celdas seleccionadas previa importación del fichero Nv\_YY\_XX.res.