

LOS RECURSOS HÍDRICOS EN TENERIFE FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

JUAN JOSE BRAOJOS RUIZ
ISABEL FARRUJIA DE LA ROSA
JOSE D. FERNANDEZ BETHENCOURT
Consejo Insular de Aguas de Tenerife

RESUMEN

Junto con una laboriosa y ordenada puesta al día de toda la información hidrometeorológica de la isla, el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (C.I.A.Tfe.) ha venido desarrollando un modelo distribuido de simulación de hidrología de superficie (MHS) que a su vez es la entrada de un modelo de flujo subterráneo (MFS), como herramientas básicas para la evaluación y planificación de los recursos hídricos. Téngase en cuenta que aún hoy el 90 % de los mismos son de procedencia subterránea.

Recientemente se han completado las series de datos hidrometeorológicos de los últimos 60 años, cuya evolución refleja un aumento progresivo de las temperaturas (a razón de 0,02°C/año en los últimos 20 años) y un descenso de la precipitación total media (- 4 mm/año).

La modelización (MHS) sobre celdas de 1 km² lleva a la conclusión que la precipitación eficaz insular media, que mayoritariamente se traduce en la recarga natural del sistema subterráneo, ha descendido del orden de un 20% en los últimos 20 años.

Del análisis de las magnitudes anteriores no se puede afirmar taxativamente que el cambio climático sea ya una realidad en Tenerife, pero dichos indicadores apuntan que sus efectos en esta isla pueden ser muy trascendentes.

1. INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional del Clima ha previsto para el conjunto del territorio español un cambio climático basado en una ligera disminución de la precipitación media anual y un aumento de la temperatura, lo que supondría una disminución de los recursos hídricos, en general.

En la isla de Tenerife las aguas de escorrentía superficial apenas tienen representación en la oferta hídrica; son las aguas subterráneas las que proporcionan casi el 90% del agua de consumo. Aguas subterráneas que son extraídas de un acuífero cuyo principal aporte es la recarga de la lluvia.

El objetivo de esta comunicación es plantear a medio plazo, en base a las tendencias observadas a partir de la información hidrometeorológica disponible, el previsible escenario climático en Tenerife así como el impacto de sus consecuencias en los recursos hídricos, no sólo superficiales, sino fundamentalmente en los de procedencia subterránea.

Ahora bien, parece oportuno iniciar esta comunicación haciendo una sucinta descripción de aquellas referencias de la isla que nos ayuden a ubicarla en el contexto de un tema tan universal

como es el del Cambio Climático; destacando, a su vez, aquellos aspectos que de alguna forma están vinculados a los recursos hídricos y su disponibilidad.

2. LA ISLA DE TENERIFE. REFERENCIAS Y ASPECTOS GENERALES

La isla de Tenerife, en el centro del Archipiélago Canario, cuenta con una superficie de 2.034 km². Su mayor altura es el Pico del Teide que culmina a los 3.718 metros sobre el nivel del mar. La denominada “cordillera dorsal” es la arista común a las dos pronunciadas vertientes que conforman la isla; ambas surcadas por una bien desarrollada red hidrográfica.

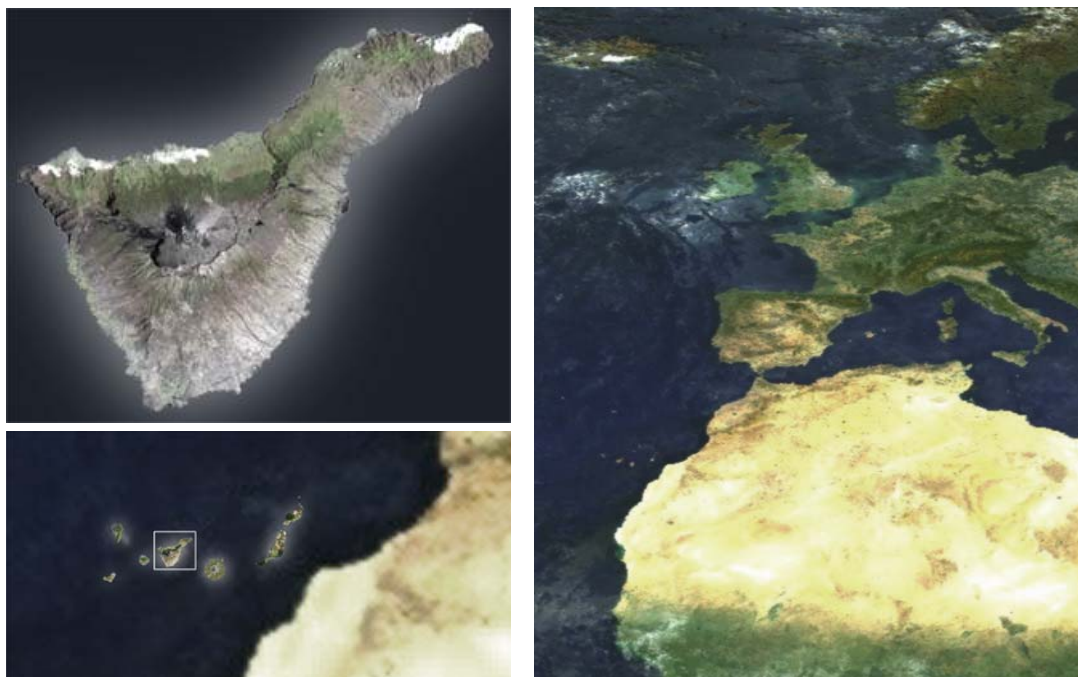


Figura 1. Tenerife en su entorno geográfico

El diverso **relieve insular** se ha ido conformando por el apilamiento progresivo de materiales volcánicos. Aunque en superficie afloran diferentes unidades estratigráficas, las series más modernas ocupan la mayor parte de la superficie insular. Dado sus caracteres primarios favorables y su bajo grado de compactación y alteración, estos materiales componentes son de una alta permeabilidad.

Aunque a Canarias le correspondería por su latitud un **clima** seco y cálido, la presencia de los vientos alisios, otorga a las vertientes septentrionales de las islas de más altura, como es el caso de Tenerife, un clima húmedo y templado. La isla recibe una precipitación anual media de **419 mm** que se reparte de acuerdo al último balance hídrico:

Tabla 1. Balance hídrico

Ref	Magnitud hidrológica	hm3/año	%	mm/año	m3/hab/año
P	Precipitación	853	100	419	1049
EVT	Evapotranspiración	470	55,1	231	578
ES	Escorrentía	20	2,4	10	25
I	Infiltración	362	42,5	178	446

Tenerife ha afrontado en estos últimos años un brusco crecimiento demográfico. La población de derecho según el censo de 2005 asciende a 838.873 habitantes. En estos momentos la

densidad de población es de **412 habitantes/km²**; muy superior a la del Archipiélago y casi cinco veces superior a la de España.

3. LOS RECURSOS HÍDRICOS

3.1. El agua en la isla: un recurso escaso y caro

La escasez de recursos hídricos ha sido una característica común a la mayoría de las islas del Archipiélago y por supuesto a ésta de Tenerife. En esta isla los recursos que fluyen superficial o manan al exterior de forma natural a lo largo de un año medio se estiman en 16 hm³ (escorrentía superficial + manantiales); ello significa que la disponibilidad de agua o el “capital hídrico” de un residente en la isla es de unos 20 m³/habitante/año; cifra ésta muy lejana de los 2.470 m³/habitante/año de que dispone, potencialmente, un ciudadano peninsular.

Ahora bien, circunstancias de desarrollo y supervivencia obligaron en su día al isleño a buscar con su trabajo lo que la naturaleza no le había procurado. En casi todas las islas se ha perforado el subsuelo volcánico mediante galerías horizontales y pozos que en ésta de Tenerife han llegado a alcanzar hasta 6 kilómetros de longitud y más de 500 metros de profundidad respectivamente; todo ello en busca de la extracción de las reservas hídricas acumuladas durante siglos en el acuífero insular.

El difícil y costoso proceso de alumbramiento, extracción y puesta en disponibilidad de este recurso subterráneo ha supuesto, lógicamente, un encarecimiento del coste del agua en las islas respecto al de otras comunidades.

3.2. El sistema acuífero insular: estado inicial de equilibrio

Hasta la segunda década del pasado siglo el acuífero de Tenerife estaba constituido por una **zona saturada general** cuyo límite superior era una superficie piezométrica relativamente cercana a la del territorio, sujeta a las oscilaciones que le ocasionaban las variaciones estacionales o interanuales de la recarga de la lluvia. El límite inferior era y es un zócalo impermeable cuya estructura, posición y geometría son difíciles de definir pues su generación ha sido el resultado de procesos geológicos diversos. Además, suspendidos por encima de este acuífero general existía un buen número de acuíferos colgados sustentados sobre capas impermeables.

El equilibrio general del sistema quedaba establecido de modo que la recarga de la lluvia se compensaba, por un lado, con los derrames subterráneos de agua al mar y, por otro, con las surgencias naturales que se producían desde la zona saturada en aquellos puntos donde la superficie freática interceptaba la superficie del terreno.

3.3. Los inicios de la explotación del sistema acuífero insular

Hasta mitad del siglo XIX las fuentes naturales, también denominadas manantiales o nacientes, constituían casi en exclusiva la base del suministro de agua a la isla. Los pequeños acuíferos colgados que las sustentaban estaban limitados en su producción por la escasa amplitud de sus cuencas receptoras. Por esas fechas la disponibilidad hídrica en la isla era de unos 675 L/s equivalentes a 21,3 hm³/año; ahora bien, cerca de la mitad de estos recursos no se aprovechaban.

Las primeras explotaciones mediante galerías se realizan mediados el siglo XIX, siendo su objetivo el investigar, mediante cortas excavaciones, aquellos lugares donde se localizan los nacientes. Se llegaron a perforar más de 300 pequeñas galerías cuyo único logro fue poner en

aprovechamiento la mayoría de los manaderos existentes, pero sin conseguir aumentos significativos de caudal. A pesar pues de estas explotaciones, se inicia el siglo XX con unas disponibilidades hídricas similares a las históricamente existentes, pero mejor aprovechadas.

3.4. La explotación de la zona saturada general

Circunstancias diversas dan lugar a que en la segunda decena del pasado siglo la dinámica de explotación de las aguas subterráneas se oriente con otras perspectivas; las nuevas galerías no buscarán necesariamente su emplazamiento en las inmediaciones de un manadero, pues su cometido será alumbrar aguas más profundas de las que hasta esa fecha no parecía conocerse su existencia.

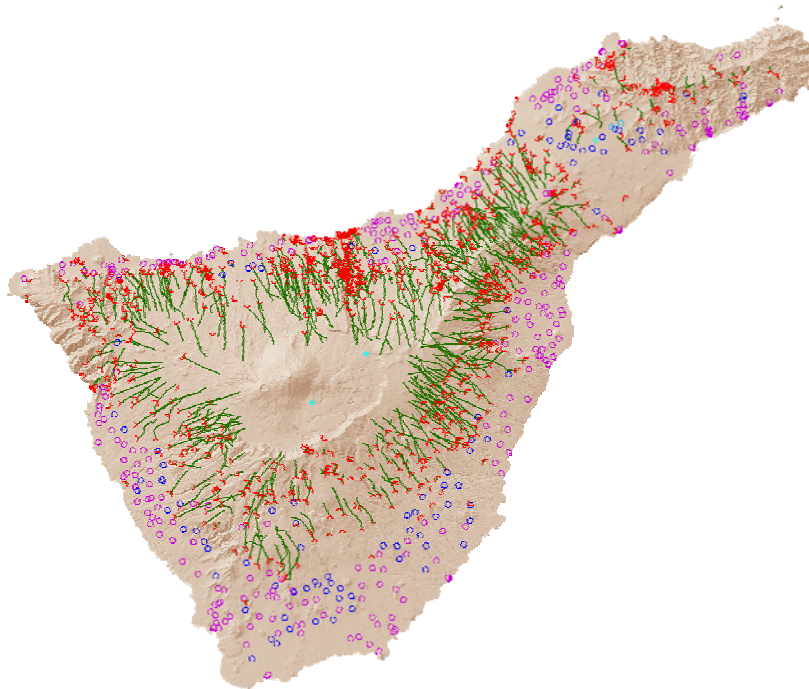


Figura 2. Las galerías y los pozos de Tenerife

Entre 1925 y 1930 se producen los primeros contactos de las galerías con la zona saturada; ha comenzado la explotación del sistema acuífero insular. A partir de 1930 se suscita una inusitada actividad exploradora del subsuelo en busca del agua - únicamente interrumpida durante el periplo de la guerra civil española - y que alcanza su punto culminante en el año 1965 cuando las 474 galerías que por esa fecha han contactado con la zona saturada extraen del acuífero general cerca de 7.000 L/s (221 hm³/año), caudal que ha sido y seguirá siendo el techo histórico de la producción de este tipo de explotaciones.

La exploración del acuífero insular se complementó con las extracciones mediante pozos costeros, denominados tradicionalmente pozos canarios, y más tarde con pozos-sondeo ubicados en las zonas de medianías. Casi todos los pozos costeros interceptan la descarga al mar por lo que, básicamente, explotan recursos renovables.

3.5. Situación actual del acuífero insular

Hasta la fecha las casi 500 galerías convencionales han avanzado con sus frentes de labores una longitud conjunta de más de 1.500 kilómetros, lo que ha supuesto un retroceso medio de la superficie freática de 2.500 metros en planta y, en algunas zonas, más de 500 metros en alzado.

El volumen total de agua extraído a lo largo de los 80 años de explotación es de unos 11.350 hm³; en su mayoría recursos no renovables. El “coste” de esta explotación ha sido, por tanto, la desaparición de un importante volumen de reservas, no reemplazable ni a medio ni a largo plazo. Se está, pues, en una situación de *agotamiento irreversible*, aunque no generalizada ni homogénea.

3.6. Los recursos superficiales

A la reducida disponibilidad de aguas de escorrentía se une también un bajo nivel de aprovechamiento. Elevadas pendientes, alta permeabilidad de la cobertera insular e inexistencia de cerradas “rentables” en aquellos entornos donde la geología es favorable reducen sensiblemente las posibilidades.

Tabla 2. Los recursos superficiales

LOS RECURSOS SUPERFICIALES					
Precipitación	Escorrentía	Almacenamiento	Aprovechamiento		
hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³	hm ³ /año	% s/P	% s/E
853	20	6	1	0,001	0,05

3.7. Los recursos subterráneos

El último balance realizado (año 2005) aportó los siguientes datos:

Tabla 3. Los recursos subterráneos

LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS							
PRODUCCIÓN				PÉRDIDAS Y APROVECHAMIENTO			
Galerías	Pozos	Nacientes	TOTAL	No usados	Salmuera	Trasvases	APROVECHADOS
hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año
127	70	4	201	0,6	2	13	185,4

3.8. Recursos hídricos no convencionales

Tenerife ha sido precursor en la reutilización en regadío de aguas residuales cuya puesta en uso requiere una adecuada depuración; su producción es en la actualidad equivalente a la de la desalación de agua de mar. Entre ambas se ha incrementado la oferta hídrica en la isla en 25 hm³/año.

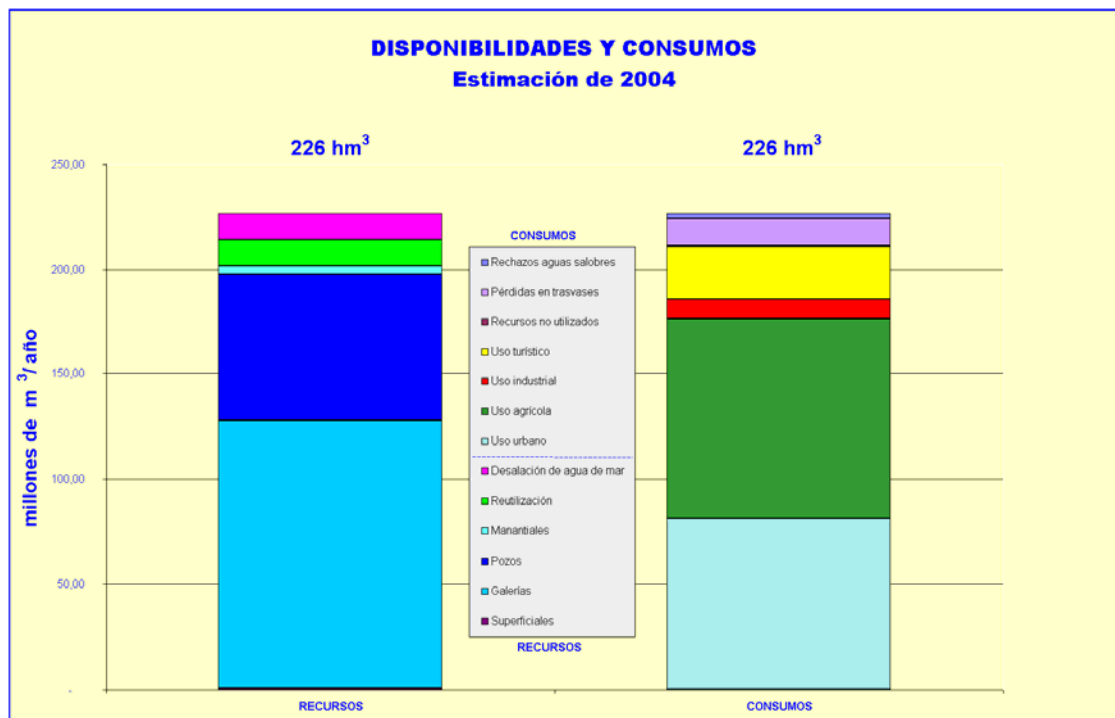
4. LA PLANIFICACIÓN HIDRÁULICA

4.1. Disponibilidades y Consumos

Tradicionalmente la agricultura había venido siendo la principal receptora de los recursos. Una sensible disminución de las superficies de cultivo y una acertada política en busca de la eficiencia del riego han dado lugar a que actualmente el consumo en regadío sea menor que el consumo de abasto humano (poblacional + turístico)

La demanda total es satisfecha por una oferta variada en la que apenas tiene significado el agua de escorrentía superficial; por el contrario, los recursos subterráneos obtenidos a través de los pozos y las galerías son todavía la principal referencia.

Gráfico 1. Disponibilidades y consumos



4.2. Evolución esperada de la demanda

En los últimos años el importante crecimiento demográfico experimentado en la isla ha dado lugar a que la demanda de agua para **consumo urbano** haya crecido por encima de las previsiones. Se espera que esta demanda sectorial siga creciendo no solo en volumen (1,7 hm³/año) sino también porcentualmente en relación con la demanda total.

El consumo de agua por **la agricultura** seguirá creciendo (1,2 hm³/año), pero mantendrá su porcentaje de participación en el conjunto de la demanda (42%). **El turismo** tendrá un comportamiento similar al del sector agrícola aunque con menor significado cuantitativo: 0,6 hm³/año de aumento y un ligero crecimiento de su significado en la demanda total (11,2%). **El consumo industrial**, de baja representación porcentual en la isla (4%), también puede aumentar a razón de 0,4 hm³/año.

Hasta el año 2012, la demanda total de recursos seguirá creciendo a razón de unos 3,5 hm³/año.

4.3. Evolución esperada en la oferta

En Tenerife se ha venido justificando el aprovechamiento de **los recursos superficiales** más que por su cantidad – apenas 1 hm³/año – por su calidad, y ello debido al efecto multiplicador que se deriva de su mezcla con aguas de procedencia subterránea. De cualquier forma, ni cantidad ni calidad compensan el coste de infraestructuras y medios de gestión que conllevan este tipo de recurso, por lo que se estima que se está en el techo de su aprovechamiento.

Por otro lado, se ha diagnosticado para el sistema acuífero insular una situación de agotamiento irreversible. De hecho, los caudales conjuntos extraídos por los pozos y las galerías vienen

descendiendo desde hace más de tres décadas, dando lugar a que **los recursos subterráneos** hayan dejado de monopolizar la oferta, habiendo entrado a participar en el balance la **reutilización de las aguas depuradas** y la **desalación de agua de mar**. En el primer caso, se dispone aún de un amplio margen para aumentar su producción. En cuanto a las aguas desaladas, su implantación ha tenido y seguirá teniendo como objetivo cubrir déficits hídricos comarcales.

Los recursos subterráneos, pues, representan todavía casi el 90% de las disponibilidades y, a pesar de su tendencia descendente seguirán siendo, durante bastante tiempo, la base de la oferta hídrica en la isla; de ahí la importancia de la componente hidrogeológica en la planificación hidráulica insular.

5. LA PLANIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA

5.1. Introducción

El devenir a corto plazo de los recursos de origen subterráneo parece, en principio, fácil de pronosticar sin más que valerse de la tendencia observada estas últimas tres décadas. Ahora bien, la respuesta del acuífero insular a más largo plazo va a depender fundamentalmente de tres factores: **la intensidad de su explotación, la recarga de la lluvia y el volumen de reservas que todavía almacena**. Nadie duda pues que el conocimiento del sistema acuífero junto con la evaluación más aproximada de sus posibilidades hidráulicas sean fundamentales.

Así fue tenido en cuenta cuando a finales de los años ochenta, dentro del marco del P.H.I., se establecieron las Bases para el Planeamiento Hidrogeológico. En el documento de AVANCE de dicho Plan se proponían una serie de actividades que, a la postre, han derivado en herramientas básicas para la evaluación y planificación de los recursos hídricos:

- *Definir la cartografía del zócalo impermeable*: Las reservas hídricas están limitadas superiormente por la superficie freática, siendo su límite inferior el zócalo impermeable. La evaluación de dichas reservas requería contar con la definición de ambas superficies.
- *Revisar la hidrología de superficie*: Era necesario realizar una laboriosa recopilación, revisión y mejora de la información hidrometeorológica de la isla a fin de definir lo más correctamente posible la infiltración de agua de lluvia hacia el subsuelo, tanto en su componente cuantitativa como en su distribución espacial, ya que se trata del principal aporte al multiacuífero de la isla.
- *Elaborar un modelo de simulación hidrogeológico*: El conocimiento adquirido de la hidrogeología y del sistema acuífero insular impulsó la realización de un modelo de simulación de flujo subterráneo que, entre otras aplicaciones, pudiera predecir el comportamiento de dicho sistema bajo diversas alternativas de explotación.

5.2. El Modelo de Hidrología de Superficie de Tenerife. (MHS)

A principio de los años noventa el C.I.A.Tfe. desarrolló un modelo distribuido de hidrología superficial para la isla de Tenerife (MHS) que ha permitido y permite obtener información, a distintos niveles de agregación temporal y espacial, acerca de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración, la humedad del suelo así como los recursos superficiales captados y almacenados. Determinadas singularidades le diferencian de otros modelos continentales:

- Además de la lluvia convencional: *Existen zonas en la isla que reciben aportes procedentes de la lluvia indirecta u horizontal.*
- Al encontrarse el acuífero general a gran profundidad: *No existe aportación subterránea hacia los cauces, salvo casos aislados de acuíferos colgados.*
- La particular geomorfología de los barrancos da lugar a que: *Los cauces se conviertan en vías de penetración de las escorrentías superficiales hacia el subsuelo.*
- La lejanía de la zona saturada respecto de la superficie del terreno da lugar a que: *La infiltración no se corresponda en el tiempo con la recarga al acuífero.*
- La escorrentía superficial es escasa y además es relativamente sencilla de deducir por lo que: *La infiltración es el elemento indeterminado del balance.*
- Aunque los resultados se ofrecen a nivel mensual: *El modelo opera a nivel diario.*

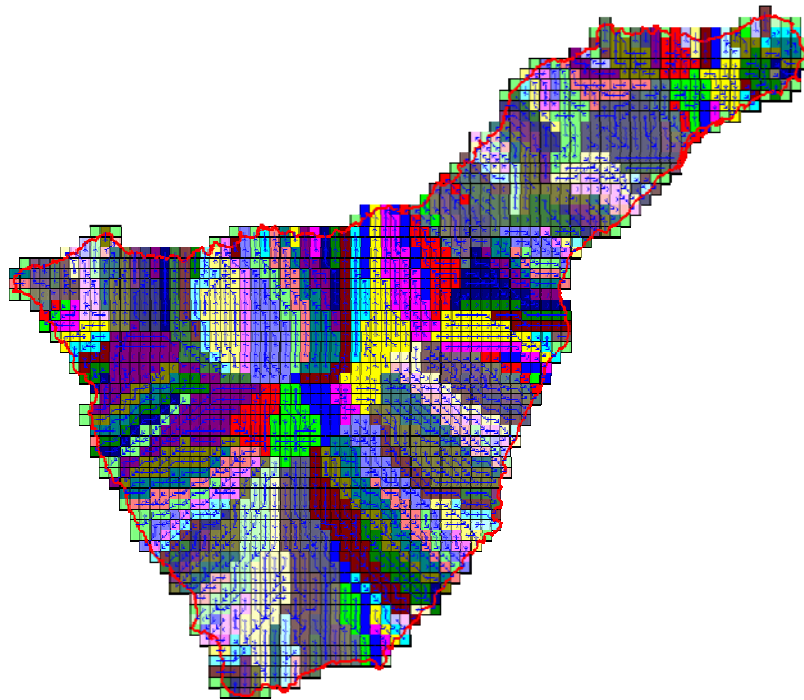


Figura 3. Discretización de la red hidrológica insular

La modelización matemática del sistema parte de la discretización de la isla en mallas formadas por celdas de 1 km^2 relacionadas entre sí en función del camino que sigue el flujo de las aguas superficiales, desde la cabecera de las cuencas hasta el mar, de modo que dentro de cada cuenca quedan perfectamente estructuradas y jerarquizadas sus arterias de drenaje. En cada celda se almacena la información mensual correspondiente a las **variables del clima**, así como los valores de los **parámetros específicos del suelo** y los de **contenido hidráulico**:

- $\text{PM}_{m,n}$: Precipitación mensual del mes “m” en la celda “n” deducida a partir de los registros de las **250** estaciones pluviométricas, con el apoyo de un número similar de estaciones virtuales ubicadas en lugares estratégicos de la isla
- $\text{NP}_{m,n}$: Número de días de lluvia en el mes “m” en la celda “n”. Información extrapolada desde las estaciones pluviométricas de lectura diaria
- $\text{TM}_{m,n}$: Temperatura media en el mes “m” en la celda “n”. Obtenida a partir de los datos facilitados por la red de observación de temperatura (más de 100 estaciones)
- S_n : Superficie del suelo ocupada por la celda “n”
- P_\emptyset : Umbral de escorrentía característico del suelo (mm)

- I_{\emptyset} : Umbral de infiltración sobre cauces ($\text{dm}^3/\text{km}/\text{día}$)
- K_E : Constante de Evaporación
- K_T : Constante de Transpiración
- R_X : Reserva máxima de agua en el suelo (mm)
- CD_n : Capacidad máxima de derivación en la celda “n”
- CA_n : Capacidad de almacenamiento máxima en la celda “n”

La heterogeneidad de las coberteras volcánicas de Tenerife requirió un minucioso proceso de obtención de los valores del **umbral de escorrentía** (P_{\emptyset}), que fue llevado a cabo en dos fases:

- **De verificación y caracterización**
 - ✓ Reconocimiento completo de todas las cuencas
 - ✓ Análisis de gabinete de la información recabada
 - ✓ Representación esquemática de características de cuencas
- **De calibración y definición**
 - ✓ Selección de cuencas piloto para el seguimiento de las escorrentías
 - ✓ Definición de P_{\emptyset} para las coberteras de las cuencas piloto
 - ✓ Extrapolación a otros suelos de la isla
 - ✓ Elaboración de la tabla de valores de P_{\emptyset} para los suelos de Tenerife

Se define el **umbral de infiltración sobre cauces** (I_{\emptyset}) como *el volumen de agua de escorrentía que se filtra por kilómetro de cauce recorrido por la avenida*. Su valoración se ha llevado a cabo a partir de la observación en campo de la geomorfología de los cauces, tramo a tramo; complementando esta labor con el control periódico de las avenidas.

Los valores de la **reserva máxima de agua en el suelo** (R_X) se obtuvieron a partir de la información facilitada por el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna y el Mapa de las Series de Vegetación de España (1987).

Con esta información se inicia el análisis matemático, asumiendo como premisas de partida que:

- Se trata de un modelo de lluvia “convencional” (PC)
- La lluvia “horizontal” (PH) participa en el balance de forma indirecta
- La precipitación no evapotranspirada y no retenida en el suelo es la precipitación “eficaz” ($PE = ES + IN$)
- La infiltración (IN) es el elemento indeterminado del balance
- La escorrentía apenas es afectada por la evaporación

En consecuencia, el “modelo” inicia el proceso con el análisis de la escorrentía (ES), cuenca a cuenca y celda por celda. Una vez desagregada la precipitación del mes “m” en la celda “n” ($PM_{m,n}$) en aguaceros diarios: $P(X)_{m,n} = f(PM_{m,n}; NP_{m,n})$, realiza el cálculo de:

- 1) El P_{\emptyset} y el I_{\emptyset} de cada aguacero: $P_{\emptyset}(X) = f(P_{\emptyset}; X)$; $I_{\emptyset}(X) = f(I_{\emptyset}; X)$
- 2) El flujo de entrada de cada aguacero diario a la celda: $FE(X)_{m,n} = FS(X)_{m,n-1}$
- 3) La escorrentía propia generada en la celda por cada aguacero diario: $EP(X)_{m,n} = f(P(X)_{m,n}; P_{\emptyset}(X))$
- 4) La escorrentía circulante por la celda generada por cada aguacero diario: $EC(X)_{m,n} = FE(X)_{m,n} + EP(X)_{m,n}$
- 5) La infiltración sobre el cauce de la escorrentía generada por cada aguacero diario: $IC(X)_{m,n} = f(I_{\emptyset}(X)_{m,n}; EC(X)_{m,n})$

- 6) El flujo de salida desde la celda generado por cada aguacero diario: $FS(X)_{m,n} = EC(X)_{m,n} - IC(X)_{m,n}$

A continuación procede a agregar a nivel mensual los valores diarios, previamente obtenidos, del flujo de entrada: $FET_{m,n} = \sum FE(X)_{m,n}$; de la escorrentía propia: $EPT_{m,n} = \sum EP(X)_{m,n}$ y de salida: $FST_{m,n} = \sum FS(X)_{m,n}$ en la celda “n” durante el mes “m”.

El proceso ofrece distintas variantes según la posición de la celda dentro del esquema arterial de la cuenca. En las celdas de **cabecera**: $FET_{m,n} = \emptyset$. En las celdas **internas** puede ocurrir que:

- a) No descargue sobre ellas ningún ramal o subramal: $FET_{m,n} = FST_{m,n-1}$
 b) Descargue sobre ellas uno o más ramales: $FET_{m,n} = FST_{m,n-1} + \sum DR_m$
 $FS(X)_{m,n} = EC(X)_{m,n} - IC(X)_{m,n}$
 $FST_{m,n} = \sum FS(X)_{m,n}$

Si en la celda existen **infraestructuras de almacenamiento** los procesos precedentes se complementan con la participación en los cálculos de la capacidad de almacenamiento máximo (CA_n); pudiendo suceder que la presa intercepte sólo las escorrentías de su propio cauce o que, además, reciba las escorrentías derivadas desde otro u otros cauces.

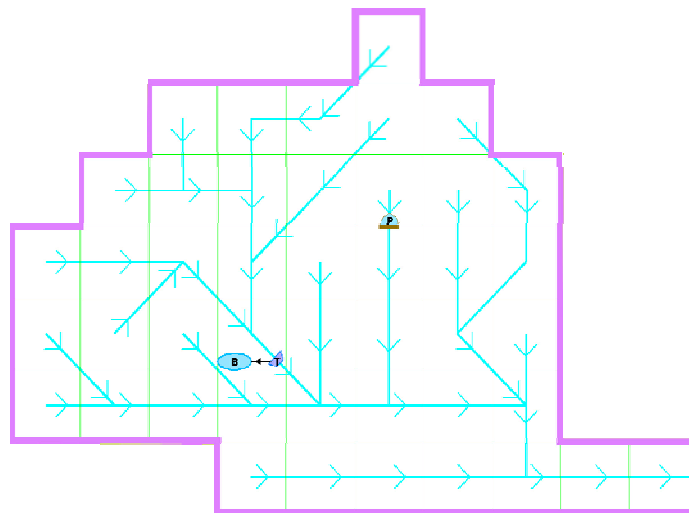


Figura 4. Cuenca discretizada del barranco de Santos

Cuando la escorrentía es interceptada por una **infraestructura de derivación**, intervienen dos nuevos parámetros, la capacidad máxima de derivación (CD_n) y la capacidad máxima de almacenamiento (CA_n) de la balsa de destino. Además, para el cálculo de las aguas derivadas es necesario disponer de los *hidrogramas* de cada uno de los aguaceros considerados. Por otro lado, la casuística espacial de ubicación de una y otra infraestructura es variada y cada una conlleva un tratamiento distinto:

- Tomadero y balsa coinciden en la misma celda
- Tomadero y balsa se ubican en la misma cuenca pero en distintas celdas
- Tomadero y balsa se ubican en cuencas distintas
- Varios tomaderos en distintas celdas derivan hacia el mismo almacenamiento

Existen celdas “**sumidero**” en las que el agua de escorrentía, la propia (EP) y la entrante (FE), no tiene salida por gravedad hacia ninguna celda vecina por coincidir con puntos bajos de la topografía. En éstas se opera de modo que $EC = IC$ para que $FS = EC - IC = 0$

En las celdas **finales** el flujo de salida (**FST_{m,n}**) es la descarga al mar de la escorrentía.

Una vez calculada la escorrentía el modelo inicia el cálculo de la precipitación eficaz (**PE_{mn}**) a partir del establecimiento del “balance en el suelo”. Previamente se habrá calculado la evapotranspiración potencial (**ETP**) como agregación de la transpiración y la evaporación; esta última ajustada a los días de lluvia del mes en cuestión.

- **ETPA_{m,n}** = EVA_{mn} + TRA_{mn}
- **EVA_{m,n}** = f(K_E; ETPC_{mn}; NP_{mn})
- **TRA_{m,n}** = f(K_E; K_T; ETPC_{mn})

En la estimación de la **ETP** se ha empleado la metodología de Thornthwaite salvo en la zona de Las Cañadas del Teide donde las horas de insolación superan muy por encima el standard de aplicación de la citada metodología. Con el apoyo de los datos de la estación meteorológica completa de Izaña se acudió a la fórmula de Penman-Monteith.

Al establecer el balance del agua en el suelo intervienen las siguientes variables y parámetros:

- **PM_{m,n}** : Precipitación ocurrida en el mes “m” sobre la celda “n”
- **EP_{m,n}** : Escorrentía propia generada en el mes “m” en la celda “n”.
- **ETPA_{m,n}**: Evapotranspiración potencial ajustada al número de días de lluvia
- **RX_n** : Reserva máxima del suelo correspondiente a la celda “n”
- **RI_{m,n}** : Reserva de agua al inicio del mes “m” en la celda “n”
- **RF_{m,n}** : Reserva de agua al final del mes “m” en la celda “n”

El proceso se inicia el mes de octubre del primer año con la reserva nula en toda la isla: **RI = 0**. Tratándose de celdas "normales" el modelo opera mes a mes con tres alternativas:

1. $PM_{m,n} - EP_{m,n} = ETPA_{m,n}$
2. $PM_{m,n} - EP_{m,n} > ETPA_{m,n} \quad \Rightarrow \quad PE_{m,n} = PM_{m,n} - EP_{m,n} - ETR_{m,n} - \Delta R_m$
3. $PM_{m,n} - EP_{m,n} < ETPA_{m,n}$

En las celdas "sumidero" el proceso es más complejo; intervienen nuevas variables y parámetros:

- **FE_{m,n}** : Flujo de entrada a la celda “m” en la celda “n”.
- **NEV_{m,n}** : Número de días efectivos de evaporación ; f(NP_m; EC_{m,n}; P_{0n}).
- **NPT** : Número de días del mes “m”.
- **ΔS** : Excedente de agua en la celda no consumida ni por ETR ni por I el mes anterior

Una vez que se dispone en cada celda “n” de la Precipitación Eficaz (PE_{m,n}) y de los Flujos de Entrada (FET_{m,n}) y salida (FST_{m,n}) que se producen en ella durante el mes “m” el cálculo de la infiltración es inmediato: **IN_{m,n} = PE_{m,n} - EP_{m,n} + IC_{m,n} = PE_{m,n} + FE_{m,n} - FS_{m,n}**

5.3. El Modelo de Flujo Subterráneo de Tenerife (MFS)

La recarga obtenida con el MHS es uno de los datos de entrada en las celdas del MFS.

El modelo conceptual en que se basa el MFS desarrollado por el C.I.A.Tfe. 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 los derrames 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.

El modelo se ha calibrado en régimen permanente y en transitorio, tomando como referencia inicial la superficie freática en 1925, fecha en que comienza la explotación de la zona saturada por las galerías y como año de ajuste final 1997. Se le incorporaron los datos históricos de extracciones, de recarga y de retorno de riego y se le ajustó de forma que a lo largo del período considerado se reprodujeran las isopiezas históricas deducidas a partir de la información facilitada por las captaciones que explotan o han explotado el acuífero. La recarga usada se obtuvo a partir de la simulación del período hidrológico 1986/87-1992/93 en un modelo de hidrología de superficie previo al actual. A partir de este modelo y usando una serie de coeficientes se estimaron las entradas al acuífero para el período 1925-1997 (recarga media: 366 hm³/año), y se realizó una prognosis al 2012.

Con el nuevo MHS se han analizado series temporales de hasta 60 años, lo que ha permitido precisar la recarga del período 1944/45-2003/04 y a partir de ésta, estimar su posible evolución a medio plazo. Tomando en consideración estos nuevos datos y resultados del MHS está previsto revisar el MFS.

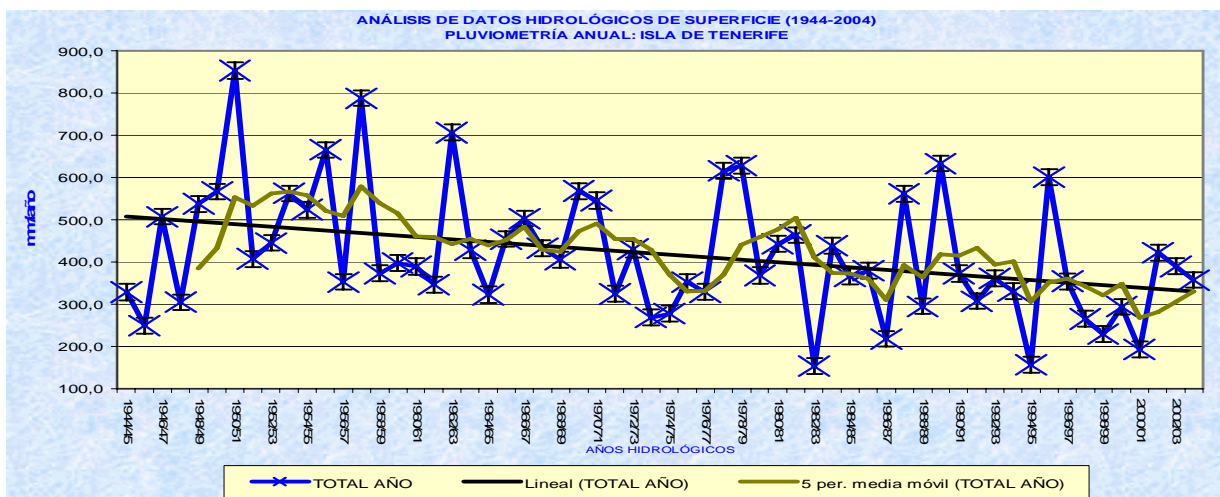
6. LOS INDICADORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

6.1. Tendencias observadas en la isla

El C.I.A.Tfe. ha realizado un exhaustivo y ordenado proceso de recopilación y revisión de la información meteorológica histórica existente, con lo que se han logrado componer series de registros de lluvia y temperatura para el conjunto de la isla de hasta 60 años de extensión (1944/45-2003/04). La última simulación realizada con el MHS ha contemplando éste y otros períodos de trabajo y tuvo como objetivo, precisamente, averiguar la tendencia del clima en la isla a partir del análisis de los parámetros precipitación y temperatura.

En relación con la **precipitación media insular** relativa al período de los últimos **60 años** los gráficos de evolución muestran que estamos ante un descenso tendencial de **- 3 mm/año**.

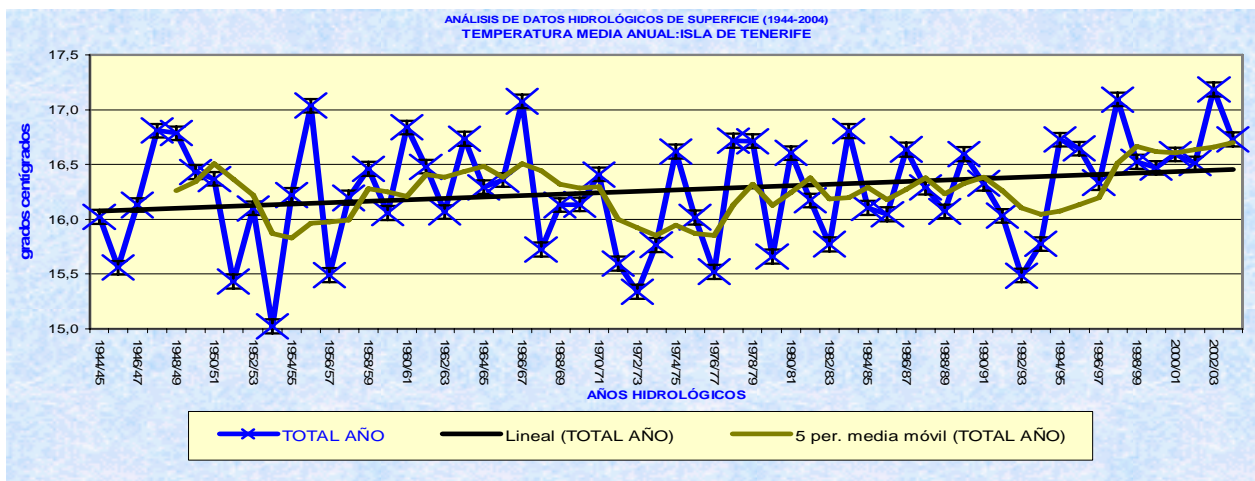
Gráfico 2. Tendencia de la pluviometría insular



El mismo análisis, realizado con la serie de datos pluviométricos de estos últimos **20 años**, deduce una tendencia descendente de **- 4 mm/año**.

En la **temperatura media insular** correspondiente a los **60 años** analizados se ha observado una tendencia ascendente de **0,01° C/año**. Estudiado el período de los últimos **20 años** la tendencia al ascenso es de **0,03° C/año**.

Gráfico 3. Tendencia de la temperatura media a nivel insular



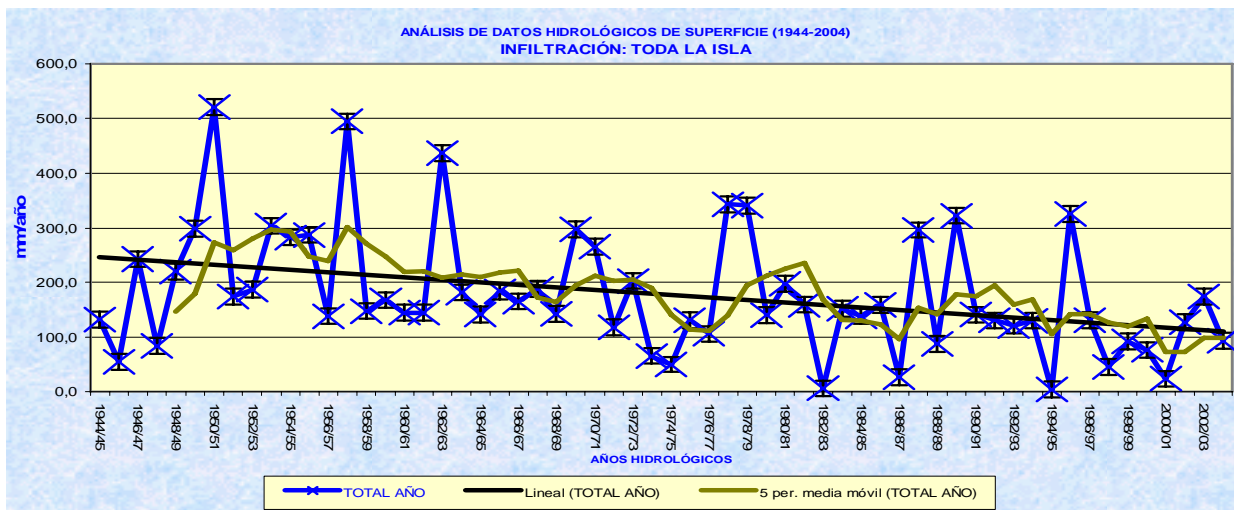
6.2. Efectos en las variables hidrológicas

El descenso de **- 3 mm/año** en la pluviometría media insular y el ascenso de **+ 0,01 °C** en la temperatura que se acusa en los últimos 60 años, han afectado de muy diferente forma al resto de las variables hidrológicas. La cuantificación así como la distribución territorial y temporal de cada una de ellas han sido deducidas a partir de la modelización de esos 60 años en el MHS.

En la **evapotranspiración real** el déficit pluviométrico se ha compensado con el incremento que ha experimentado la **evapotranspiración potencial (+ 44 mm/año)** como consecuencia de la tendencia ascendente de la temperatura. Tampoco la **escorrentía superficial** acusa una tendencia descendente significativa: **- 0,18 mm/año**.

La **infiltración** ha sido, a la postre, la más afectada por los cambios en la climatología insular. Los gráficos revelan, entre otros, una tendencia descendente, cuantificada en **- 2,3 mm/año**; es decir, el 75% del descenso medio anual de la precipitación ha repercutido en la infiltración.

Gráfico 4. Tendencia de la infiltración media insular



El mismo análisis realizado para el período 1984/85-2003/04 incrementa la tendencia descendente de la pluviometría a - 4 mm/año, de los cuales - 3,79 mm/año (95 %) afectan a la infiltración, - 0,26 mm/año a la evapotranspiración y, paradójicamente, la escorrentía acusa un ligero incremento + **0,05 mm/año**.

Circunstancia esta última que para nada contradice los postulados del cambio climático en esta isla, sino todo lo contrario. Téngase en cuenta que, dada la gran permeabilidad de los suelos, sólo se generan aguas de escorrentía cuando la intensidad de la lluvia supera los umbrales de infiltración; es, por tanto, más operativa la intensidad que la cantidad. Se han percibido durante las pasadas décadas menores cantidades de lluvia, pero también aguaceros de gran intensidad.

6.3. Eventos climatológicos extraordinarios

Sucesos tales como las invasiones de aire africano, las olas de calor, las lluvias copiosas o las tormentas tropicales, que no sólo afectan a esta isla sino a todo el Archipiélago, se están produciendo con más frecuencia e intensidad.

7. LOS RECURSOS HÍDRICOS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Dado la poca representación de los **recursos superficiales** en la oferta hídrica insular, la afección del cambio climático a la escorrentía superficial apenas ha tenido repercusión.

A partir de 1970 el caudal extraído por las explotaciones de **aguas subterráneas** ha sufrido un descenso medio de unos 0,9 hm³/año. En concreto, el caudal de las galerías ha venido decreciendo a razón de 2,2 hm³/año; descenso éste, compensado en parte por la producción *in crescendo* de los pozos. El último balance hídrico subterráneo (1997) ofrece los siguientes datos:

Tabla 4. Balance hídrico subterráneo (1997)

BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO				
		hm ³ /año	% s/E	% s/S
ENTRADAS	Recarga de la lluvia	358	87	68
	Retorno de Riegos	53	13	10
	TOTAL	411	100	78
SALIDAS	Extracciones: 140 (Galerías) + 70 (Pozos)	210	51	40
	Flujo al mar	320	78	60
	TOTAL	530	129	100
RESERVAS EXTRAÍDAS : Entradas – Salidas		-119		-22
RECURSOS EXPLOTADOS: Extracción – Reservas		91	22	

La mencionada caída de los caudales se debe, sobre todo, a la disminución de carga hidrostática en el acuífero como consecuencia del retroceso que experimenta la superficie freática. Ahora bien, a lo largo de las tres décadas anteriores se ha observado el descenso más pronunciado de la pluviometría insular y de la infiltración. Los - 3,8 mm/año de recarga han supuesto 7,7 hm³/año menos de entradas de recursos al sistema acuífero que, de alguna forma, han tenido que afectar a los restantes elementos del balance.

Los caudales de recursos renovables captados por las galerías y extraídos por los pozos han acusado, incluso de forma directa en algún caso, el descenso generalizado de la recarga experimentado estas pasadas décadas. Así se desprende de los aforos históricos de las galerías cuyos alumbramientos se alimentan mayoritariamente de aguas meteóricas. En el Valle de La

Orotava los aportes de la lluvia después de atravesar la zona de tránsito de la superficie de cobertera son interceptados en su descenso por la capa impermeable denominada "mortalón" para reconducirlas hasta el mar. Varias galerías con sus frentes estacionados desde hace varias decenas de años en esta formación captan estos recursos. Pues bien, el caudal conjunto de estas captaciones, acusan una merma paulatina que debe ser atribuida al descenso de la recarga que los indicadores climáticos nos viene denunciando.

Tomando como referencia los valores de los últimos balances podría deducirse que la disminución de la recarga observada estas últimas décadas ha podido suponer un descenso en las disponibilidades de recursos renovables de $7,7 \text{ hm}^3/\text{año} \times 0,22 = 1,7 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Además de recursos, las galerías y algunos pozos extraen reservas (recursos no renovables) del acuífero; la cuantía de los caudales alumbrados depende fundamentalmente de la carga piezométrica existente en el frente de labores de la captación. En la desestabilización de la superficie freática provocada por las extracciones está colaborando, lógicamente, el descenso de la recarga; averiguar de forma directa el alcance de esta afección y sus consecuencias en los recursos es hartó complejo. La inercia del sistema acuífero y la propia estructura del sistema de explotación no permiten disponer de observaciones puntuales y concretas de las respuestas del acuífero a los posibles cambios en las solicitudes de extracción y/o de recarga.

De lo que sí se tiene constancia es de la afección de la recarga de la lluvia a la posición del nivel freático. El C.I.A.Tfe. dispone de dos sondeos en Las Cañadas del Teide, de 504 y 404 metros de profundidad respectivamente, que están en contacto con los niveles saturados; en uno de ellos, perforado muy alejado del ámbito de las extracciones, se acusan de forma directa y casi inmediata las aportaciones de la lluvia, las cuales llegan a hacer disminuir e incluso invertir la pendiente de la curva de descenso del nivel freático. La incidencia de la disminución de la recarga en el retroceso de la superficie freática del acuífero insular y, por ende, en la disminución de carga hidrostática, factor determinante en el caudal de las captaciones, debe ser una de las cuestiones a averiguar en la próxima revisión del MFS.

8. CONCLUSIONES

La evolución de las series de datos hidrometeorológicos de los últimos 60 años muestran un aumento progresivo de las temperaturas, a razón de $+ 0,03^\circ \text{ C/año}$ en los últimos 20 años, y un descenso de la precipitación total media de $- 4 \text{ mm/año}$ que, a su vez, ha dado lugar a una disminución de la recarga natural al sistema subterráneo de un 20%.

Todos estos datos, que si bien no son determinantes de que ya ha operado un cambio climático, no dejan de ser indicadores a tener en cuenta para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hidráulicos cuando se planteen posibles escenarios de actuación. Dichos indicadores, se correspondan o no con el cambio, han puesto en evidencia unos efectos negativos en las disponibilidades hídricas.

Desde hace algunas decenas de años parece pues que estamos inmersos en un cambio climático tendencial que, en algún momento, cambiará de signo o se estabilizará. Por ahora, la planificación hidrológica a medio plazo deberá contar con esta situación, planteándose estrategias y políticas al respecto.

Mientras tanto, en Tenerife se va a realizar una nueva simulación de pronóstico en el MFS que tendrá en cuenta la disminución de la recarga de lluvia deducida del MHS, caso de mantenerse la tendencia de los últimos 20 años, y analizar sus repercusiones en el sistema acuífero insular.

BIBLIOGRAFÍA

Libro Blanco del Agua en España. (1998). Documento de Síntesis. 006.

Plan Hidrológico Insular de Tenerife. (1995). 2-26.

Brajos, J.J. (1992) Análisis estadístico de la evolución histórica de los alumbramientos de agua mediante galerías en la isla de Tenerife. Documentación de base del Plan Hidrológico Insular de Tenerife. Memoria. 002-020.

ICONA. (1987). Mapa de las Series de Vegetación de España.. Estaciones bioclimáticas en las Islas Canarias.

Consejo Insular de Aguas de Tenerife (2002). Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la isla de Tenerife. Surge, S.A. Memoria. 030.

Farrujia, I., Brajos, J.J., y Fernández, J. (2001). Ejecución de dos sondeos profundos en Las Cañadas del Teide, VII Simposio de Hidrogeología DE la Asociación Española de Hidrogeólogos. Murcia: VOL XXIII, 661.