



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

El cálculo de la recarga como primer paso para una gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos de un sistema acuífero volcánico. El caso de La Gomera.

Autor: Tatiana Izquierdo Labraca

Institución: Universidad Rey Juan Carlos

e-mail: tatiana.izquierdo@urjc.es

Otros Autores: Álvaro Márquez González (Universidad Rey Juan Carlos); Raquel Herrera Espada (Universidad Rey Juan Carlos)

RESUMEN

Las islas volcánicas suelen sufrir una escasez de recursos hídricos superficiales debido a la alta permeabilidad de los materiales volcánicos. En La Gomera (Islas Canarias) las aguas subterráneas son la principal fuente de recursos hídricos, el 70% del total disponible en la isla, a pesar de que sus materiales son más antiguos que los de otras islas del Archipiélago y por lo tanto, menos permeables. El clima de las Canarias occidentales se encuentra principalmente dominado por los vientos alisios que soplan en dirección noreste en la baja troposfera. Debido a una inversión térmica situada entre los 1.000 y los 1.500 metros de altitud generan abundante nubosidad en la vertiente de barlovento con limitado desarrollo vertical, el 'mar de nubes'. Este trabajo es el primero que tiene en cuenta la aportación de la precipitación horizontal que genera el mar de nubes en contacto con la vegetación en el balance hídrico de la isla. En la actualidad, en La Gomera se encuentra vigente el Plan Hidrológico Insular de La Gomera basado en documentos técnicos previos sobre recursos y planificación hídrica: el Proyecto Canarias SPA 15, el Estudio Hidrogeológico General de la Isla de La Gomera, la Actualización del Inventario de Nacientes de la Isla de La Gomera y el Avance del Plan Hidrológico de la Isla de La Gomera. La variación en las cifras de los balances hídricos medios anuales que calculan estos estudios plantea la necesidad de un balance hídrico que aporte valores lo más precisos posibles sobre las variables hidrológicas insulares así como una metodología fiable ya que cada uno de dichos estudios utiliza una metodología diferente para el cálculo del balance hídrico de la isla. Para ello se ha calculado la recarga de la isla de La Gomera mediante dos balances hídricos de forma que se maximice la cantidad de agua evapotranspirada en uno y recargada en otro. Todo ello, a partir de la integración en un Sistema de Información Geográfica de los datos de precipitación y temperatura media mensual de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para una serie temporal de 29 años (1980/81-2008/09). Los resultados obtenidos indican un valor mínimo de recarga de 14 hm³ anuales para la serie temporal utilizada y un máximo de 43 hm³ anuales, inferior al valor calculado por el Plan Hidrológico Insular de La Gomera. Este rango de valores permita conocer un escenario de mínimos y otro de máximos a los gestores del agua en la isla de forma que la extracción de la misma se haga de la forma más sostenible posible.

Palabras Clave: Recarga; balance hídrico; gestión sostenible; acuíferos volcánicos; La Gomera

1. Introducción

Las islas volcánicas suelen sufrir una escasez de recursos hídricos superficiales debido principalmente a la alta permeabilidad de los materiales volcánicos, éste es el caso de las Islas Canarias (Custodio & Cabrera, 2002). En La Gomera (Islas Canarias; Figura 1) las aguas subterráneas son la principal fuente de recursos hídricos, el 70% del total disponible en la isla, a pesar de que la mayor parte de sus materiales son más antiguos que los de otras islas del Archipiélago y por lo tanto, menos permeables.

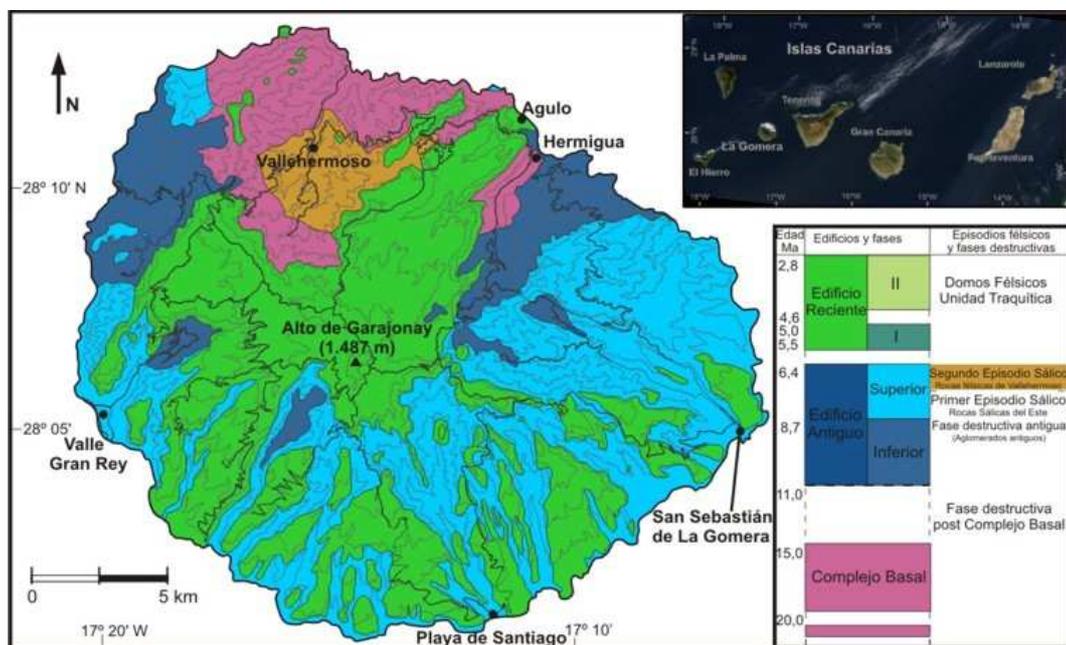


Figura 1. Esquema geológico de La Gomera (Modificado de Ancochea *et al.*, 2004 y Herrera, 2008) y su situación geográfica.

En La Gomera, al igual que en Fuerteventura y La Palma, aflora el Complejo Basal (20–15 Ma; Figura 1) el cual representa principalmente la etapa de crecimiento submarino de la isla y está formado fundamentalmente por rocas plutónicas básicas, además de por lavas y tobas submarinas basálticas y traquíticas, todo ello atravesado por una tupida red de diques (Cendrero, 1971).

Tras un periodo de calma en el que el Edificio Submarino se erosionó, comenzó a formarse el Edificio Antiguo apoyándose discordante sobre el anterior. El Edificio Antiguo (11-6,4 Ma) es la estructura principal de la isla y alcanza un máximo de 1.100 m cerca del centro de la isla extendiéndose hacia el noroeste, oeste, sur y este de la misma (Figura

1). En base a su edad y a los diferentes tipos de coladas basálticas (*pahoehoe* o *aa*), el número de diques y la presencia de brechas se pueden distinguir dos etapas de crecimiento principales en la evolución de este edificio: el Edificio Antiguo Inferior y el Edificio Antiguo Superior (Ancochea *et al.* 2006) (Figura 1). En la reconstrucción de Ancochea *et al.* (2006) el Edificio Antiguo Inferior alcanzaría una altura de entre 1.300 o 1.900 m.s.n.m. y un diámetro de unos 20 km mientras que la cima del Edificio Antiguo Superior quedaría situada aproximadamente en los 2.200 m.s.n.m. y su diámetro habría sido de 25 km.

El Edificio Reciente (5,5–2,8 Ma) se apoya discordante sobre el Complejo Basal en el norte y sobre el Edificio Antiguo en el resto de la isla, ya que entre ellos existió un periodo de reposo en el que los materiales antiguos se erosionaron. Esta unidad está formada por la acumulación de potentes coladas con piroclastos intercalados y por domos sálicos que intruyen en las anteriores (Ancochea *et al.*, 2004). Según Ancochea *et al.* (2006) y Herrera (2008) el Edificio Reciente también puede dividirse en dos etapas diferentes: el Edificio Reciente I y el Edificio Reciente II (Figura 1). El primero incluye los denominados por Bravo (1964) como “Basaltos Subrecientes” mientras que el segundo está formado por los “Basaltos Horizontales”, llamados así por su disposición prácticamente horizontal. Contemporáneo a éste último edificio existe además actividad félsica, por un lado la denominada por Herrera (2008) como Unidad Traquítica y por otro, domos félsicos (Cubas, 1978) formados por materiales más resistentes a la erosión que actualmente son una de las estructuras más características de La Gomera. Alguna actividad residual, local y dispersa ocurrió en la isla hace aproximadamente 2,5 Ma, ésta consistió básicamente en pequeñas coladas *intracanyon* denominadas Episodios Tardíos (Cueto *et al.*, 2004a; 2004b; 2004d; 2004e).

En base a la volcanoestratigrafía descrita, el modelo hidrogeológico existente en la isla fue desarrollado en el Avance del Plan Hidrológico Insular de la isla de La Gomera (Soler, 1996). Así, existe un acuífero central en la isla formado por los materiales del Edificio Reciente que solamente actúa como zona de paso del agua hacia la zona saturada general que se encuentra en los materiales del Edificio Antiguo Superior, llegando la mayor parte a descargar de forma submarina en el mar. Parte del agua recargada en el acuífero central se descarga en forma de nacientes en la base del Edificio Reciente con caudales de hasta 30 l/s (Nacientes de Guadá, Valle Gran Rey).

Al no existir actividad cuaternaria en isla, la erosión ha tenido, y sigue teniendo una importancia considerable (Paris *et al.*, 2005; Cendrero & Díaz de Terán, 1985; Miguel, 2010) por lo que, a lo largo de todo el territorio insular, encontramos formaciones sedimentarias recientes en forma de coluviones o derrubios de ladera (debido al

escarpado relieve de la isla), depósitos de barranco como materiales de relleno de los mismos y playas en las desembocaduras de éstos como resultado del arrastre y la redistribución de los aluviones.

Esta erosión se debe principalmente al régimen torrencial de lluvias que tiene la isla ya que durante el invierno se ve afectada por borrascas de latitudes medias. Sin embargo, durante gran parte del año, la atmósfera en la región en la que se encuentra la isla se caracteriza por su gran estabilidad debido a dos procesos de circulación atmosférica a gran escala. Uno es la presencia del anticiclón de las Azores; y el otro es el régimen de vientos alisios que soplan en dirección noreste en la baja troposfera, superficialmente, sobre un océano relativamente frío (Torres, 2002). Sobre la capa de los alisios se encuentra otra, más cálida y seca, normalmente de dirección noroeste; es la llamada inversión del alisio. Esta superposición de masas de aire impide el ascenso de los alisios al chocar con la orografía de las islas más altas (1.487 m.s.n.m. en La Gomera) generando una gran cantidad de estratocúmulos en las vertientes de barlovento, el llamado “mar de nubes” en torno a los 1.500 metros de altitud, es decir, coincidiendo con los sectores más elevados de La Gomera, excepto en verano, cuando el mar de nubes se forma a menor altitud (por debajo de los 1.000 m.s.n.m.).

La precipitación sigue una tendencia altitudinal muy clara siendo 200 mm anuales en la costa y más de 800 en el sector central de la isla (Marzol *et al.*, 1995). Además existe un claro desequilibrio entre la precipitación en la vertiente de barlovento con respecto de la de sotavento (Figura 2). La temperatura media de la isla también varía según la altitud registrándose valores entre 28 y 14 °C en las costas y entre 25 y 5 °C en las zonas de cumbre (Marzol *et al.*, 1995).

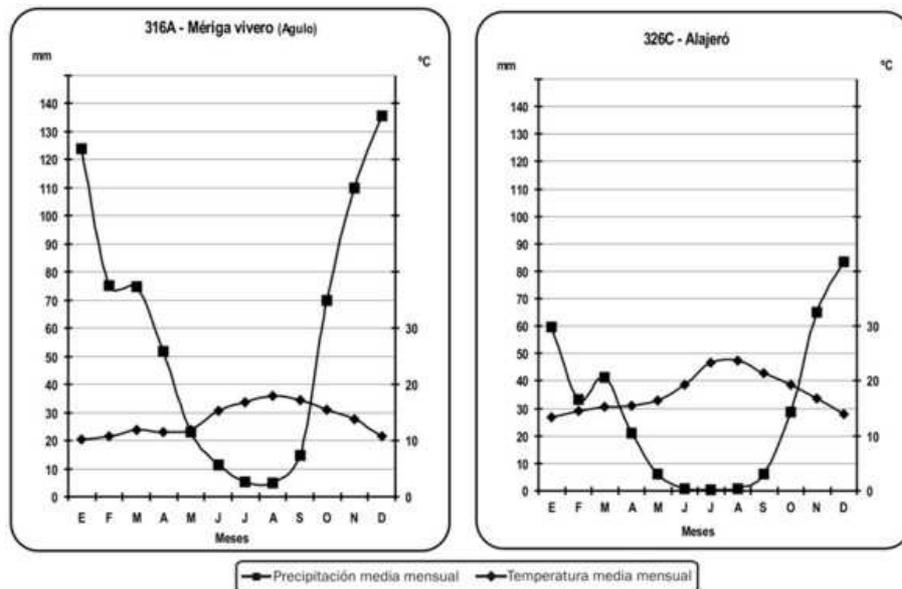


Figura 2.- Climodiagrama de la estación 316A situada a barlovento (Agulo) a 840 m de altitud y de la estación 326C situada a sotavento (Alajeró) a 810 m de altitud.

A la precipitación tradicional hay que sumar el aporte de la precipitación de niebla que genera la condensación del mar de nubes en contacto con la laurisilva. Santana Pérez (1995) zonifica el sector central de la isla en función del comportamiento de las nieblas en él en: 1) zonas de crestas entre las cotas 900-1.200 m; 2) valles abrigados expuestos a la acción de los alisios situados entre 800-1.000 m; 3) laderas expuestas a la acción de los alisios; 4) laderas a sotavento de los alisios; y 5) zona de transición entre las zonas 3 y 4. La importancia de este aporte extra de precipitación se ha cuestionado en la mayor parte de los estudios hidrológicos de la isla (Porrás *et al.*, 1985 o Soler *et al.*, 2002). Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por el personal del Parque Nacional de Garajonay, afirman que la precipitación debida a la influencia del mar de nubes aporta valores iguales o superiores a los de la precipitación convencional dependiendo del tipo de ecosistema (Gómez & Fernández, 2003; Izquierdo *et al.*, aceptado). Además, tanto los balances hídricos realizados en la isla (MOPU, 1975; Porrás *et al.*, 1985; Soler *et al.*, 2002; Izquierdo & Márquez 2008) como las medidas de campo en la zona forestal, muestran cómo los suelos se encuentran prácticamente secos durante los meses de verano a pesar de que la máxima productividad primaria del bosque ocurre en esa época (Izquierdo *et al.*, aceptado) lo cual se explica por el aporte extra de la precipitación horizontal.

Por ello, la vegetación de La Gomera juega un papel importante en la hidrología de la isla. A grandes rasgos, se pueden definir tres pisos de vegetación: costa, medianía y

cumbres. La zona baja abarca desde el nivel del mar hasta los 200 – 300 m en la vertiente norte y los 400 – 500 m en el sur (Fernández, 1998). En este piso encontramos por una parte, vegetación costera adaptada a los acantilados de la isla y por otra, en el interior las formaciones de tabaibales y cardonales que forman la vegetación dominante de este piso ecológico. Estos últimos son matorrales adaptados a la aridez ya que almacenan agua en sus tejidos y, al carecer de hojas, reducen sus necesidades de agua en el periodo seco. La zona media se extiende por encima de la baja hasta aproximadamente los 500 – 600 m en la vertiente norte subiendo hasta 800 – 1.000 m en la sur. En ella, encontramos formaciones arbustivas y arborescentes con claras afinidades mediterráneas de las que la más ampliamente distribuida es el sabinar de *Juniperus phoenicia* junto con el almácigo (*Pistacia atlantica*) y el acebuche (*Olea europea* sp. *ceraiformis*). Por último, la zona alta de La Gomera, por encima de los 500 - 600 m en el norte y de los 900 – 1.200 m en el sur hasta llegar a la cumbre de la isla, está cubierta por el monteverde (Fernández, 1998).

Éste último, es el ecosistema más complejo y heterogéneo de Canarias ya que depende de factores ambientales que cambian bruscamente, como el grado de exposición a los alisios, grado de umbría, diferencias altitudinales, diferencias de suelos, etc. A grandes rasgos, se puede dividir en laurisilva (formaciones mejor conservadas) y fayal-brezal (formaciones alteradas antrópicamente o con tendencia seca) aunque Pérez de Paz *et al.* (1995) hacen una división más precisa en 4 tipos de laurisilva y 4 de fayal-brezal, cada uno de ellos con un grado diferente de efectividad en la captación de lluvia horizontal (Gómez & Fernández, 2003).

En la actualidad, en La Gomera se encuentra vigente el Plan Hidrológico Insular de La Gomera (en adelante, PHIG; Soler *et al.*, 2002) el cual, constituye un instrumento administrativo imprescindible para la misma ya que, aunque La Gomera no sufre una escasez de recursos hídricos tan importante como la de otras islas del archipiélago, una gestión inadecuada podría tener consecuencias muy negativas para el futuro de la isla. Los documentos técnicos sobre recursos y planificación hídrica en los que se basa el PHIG son el proyecto Canarias SPA 15 (MOPU, 1975), el Proyecto MAC 21 (MOPU, 1980), el Estudio Hidrogeológico General de la Isla de La Gomera (Porrás *et al.*, 1985), la Actualización del Inventario de Nacientes de la Isla de La Gomera (Navarro *et al.*, 1993) así como en el Avance del Plan Hidrológico de la Isla de La Gomera (en adelante, APHIG; Soler, 1996). Por último, en los últimos años Izquierdo & Márquez (2007; 2008) han realizado trabajos acerca de la hidrometeorología de la isla.

En principio, La Gomera no debería tener problemas de disponibilidad de recursos hídricos en términos globales ya que los recursos de la isla se evalúan en unos 14,6 hm³

anuales, mientras que la demanda actual no llega a los 10 hm³, y que las previsiones de máximo crecimiento para el año 2012 son del orden de 12 hm³ (Tabla I; Soler *et al.*, 2002). Sin embargo, el aislamiento y la desigual distribución y características de los recursos hídricos de los barrancos no permite garantizar la disponibilidad del agua en todas las poblaciones de la isla, provocando problemas de suministro bien por causas estructurales o de sequía.

Tabla I. Recursos y demandas hídricas de La Gomera (modificado de Soler *et al.*, 2002).

| Recursos (hm³/año) | | | |
|--------------------------------------|-----------|-------------------------|-------|
| Escorrentía superficial | Nacientes | Escorrentía subterránea | Total |
| 3,4 | 6,7 | 4,5 | 14,6 |
| Demandas (hm³/año) | | | |
| Abastecimiento | Riego | Total | |
| 1,9 | 7,8 | 9,8 | |

Además, la eficiencia global del sistema insular de utilización de los recursos hídricos debe hallarse entorno al 50% debido, tanto el mal estado de las infraestructuras de captación y transporte por falta de conservación y antigüedad, como a las deficiencias en la gestión (en gran parte como consecuencia de la naturaleza de los derechos históricos sobre el agua que no permiten un aprovechamiento racional de los recursos; Soler *et al.*, 2002).

La variación en las cifras de los balances hídricos medios anuales que calculan los estudios citados anteriormente (Tabla II) plantea la necesidad de un balance hídrico que aporte valores lo más precisos posibles sobre los recursos insulares. Debido a que los recursos subterráneos son los más importantes en La Gomera, el conocer el valor de la recarga de los acuíferos se hace imprescindible para una correcta y sostenible gestión de los mismos.

Tabla II.- Comparación entre los diferentes balances hídricos publicados para La Gomera (valores en hm³/año).

| | Precipitación | ETR | Escorrentía | Recarga |
|--|---------------|-----|-------------|---------|
| SPA-15 (MOPU, 1975) | 185 | 122 | 26 | 37 |
| IGME (Porrás <i>et al.</i> , 1985) | 160 | 127 | 7 | 26 |
| PHI (Soler <i>et al.</i> , 2002) | 137 | 65 | 7 | 65 |
| Método I 1 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 119 | 11 | 7 |
| Método I 2 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 103 | 22 | 12 |
| Método II 1 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 100 | 19 | 18 |
| Método II 2 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 64 | 19 | 54 |
| Método III 1 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 107 | 19 | 11 |
| Método III 2 (Izquierdo & Márquez 2008) | 137 | 95 | 19 | 23 |

Para ello, en este trabajo se modelizan la precipitación, la precipitación horizontal y la evapotranspiración potencial para después calcular la escorrentía, la evapotranspiración real y la infiltración o recarga para La Gomera mediante un balance hídrico mensual de la serie temporal comprendida entre los años hidrológicos 1980/81 y 2004/09, es decir, 29 años hidrológicos.

El balance hídrico fue usado por primera vez por Thornthwaite para reflejar el balance entre los aportes de agua de precipitación de lluvia o nieve y su salida mediante evapotranspiración, recargas subterráneas y corrientes superficiales (Shade, 1997). Su esquema básico modificado para incluir la precipitación horizontal se puede expresar mediante la siguiente ecuación [1]:

$$[1] \quad I = [(P + Ph) - Es] - (ETR + \Delta R)$$

donde:

I_ infiltración (mm)

P_ precipitación (mm)

Ph_ precipitación horizontal

Es_ escorrentía (mm)

ETR_ evapotranspiración real (mm)

ΔR _ variación de la reserva en el suelo (mm)

En esta ecuación no quedan reflejadas las condiciones específicas de cada momento, esto es, variaciones en la intensidad de precipitación, humedad relativa del aire del 100%, etc. Sin embargo, el balance hídrico mensual proporciona valores aproximados de las variables que lo conforman que son válidos para una evaluación de los recursos disponibles (Shade, 1997).

2. Precipitación

Para este trabajo se ha recopilado e integrado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) la precipitación mensual de los años 1975 a 2009 de 66 pluviómetros de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de los 98 que existen o han existido en la isla. Su localización se comprobó mediante una campaña de campo junto con la información proporcionada por el Parque Nacional de Garajonay (Figura 3).

Para los años 1975 a 1979 sólo 17 de los pluviómetros tienen datos, sin embargo, a partir de 1980 la densidad de pluviómetros aumenta de forma que se decidió empezar nuestra serie temporal en 1980. Esto implica, que la estación 329U-Hermigua que estuvo operativa hasta 1980 no se utiliza en el estudio. Por ello, finalmente para calcular la precipitación en la isla se han utilizado los datos de 65 pluviómetros para la serie temporal 1980 - 2009.

Para completar los huecos en las series temporales, los pluviómetros se clasificaron en grupos que maximizaran su semejanza en un mismo grupo y la minimizara con otros grupos. Para ello, se utilizó una clasificación de *k-means* de 2 grupos y 50 iteraciones. Esta clasificación proporciona un resultado coherente espacialmente (Figura 3) mientras que clasificaciones en 3 ó 4 grupos no eran consistentes y sólo generaban pequeños grupos adicionales sin coherencia especial.

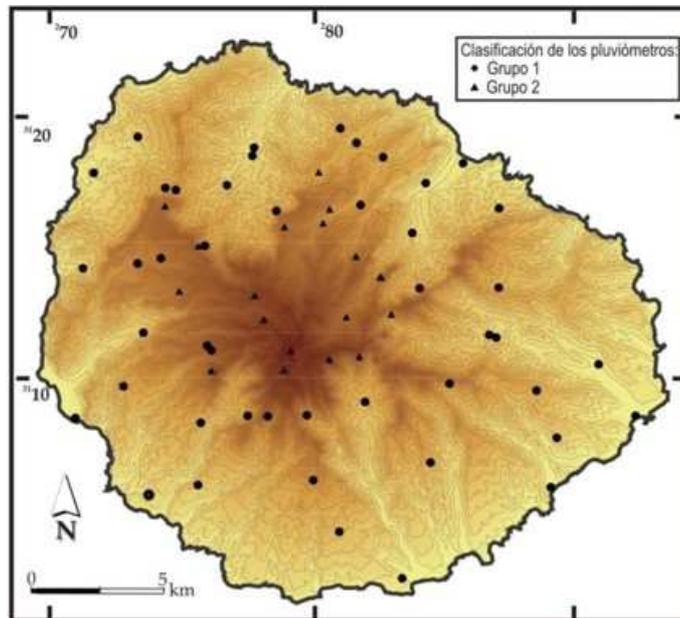


Figura 3 Mapa con los pluviómetros utilizados en este trabajo clasificados en grupos homogéneos de comportamiento de la precipitación.

Una vez clasificados, cada hueco se completa utilizando la ecuación [2] en la que para completar un dato (P_x) se utilizan los datos de los pluviómetros pertenecientes a su mismo grupo junto con el coeficiente de correlación de Pearson (r^2) de cada uno con el pluviómetro a completar.

$$[2] \quad P_x = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot r_i^2)}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

Con las series temporales completadas, los valores mensuales de los 29 años se utilizaron para generar los mapas de precipitación en el paquete geoR del software libre R (Ihaka & Gentleman, 1996). El estudio de Espejo (2008) muestra que para La Gomera los mejores resultados para interpolar la precipitación se obtienen utilizando una malla de 500 m de celda. Por ello, el Modelo Digital de Elevación (MDE) se remuestreó de su tamaño original de pixel de 5 m a 500 m generando una malla de 2941 celdas (Figura 4) algunas de ellas en el mar debido a que la malla debe ser cuadrada y a la reducción de un posible efecto de borde en la interpolación.

Los resultados de Izquierdo & Márquez (2007) muestran que la elección del método de interpolación de la precipitación es importante. En su trabajo compararon dos métodos: 1) *Kriging* Ordinario (OK, siglas en inglés) y 2) *Kriging* con Tendencia Externa (KED, siglas en inglés) para La Gomera en una malla de 1000 m de tamaño de celda. Sus resultados muestran que el uso de la altura como tendencia externa en el modelo KED disminuye el error generado en la interpolación en comparación al modelo OK. En este trabajo, por tanto, nos centramos en el modelo KED para generar mapas mensuales de precipitación.

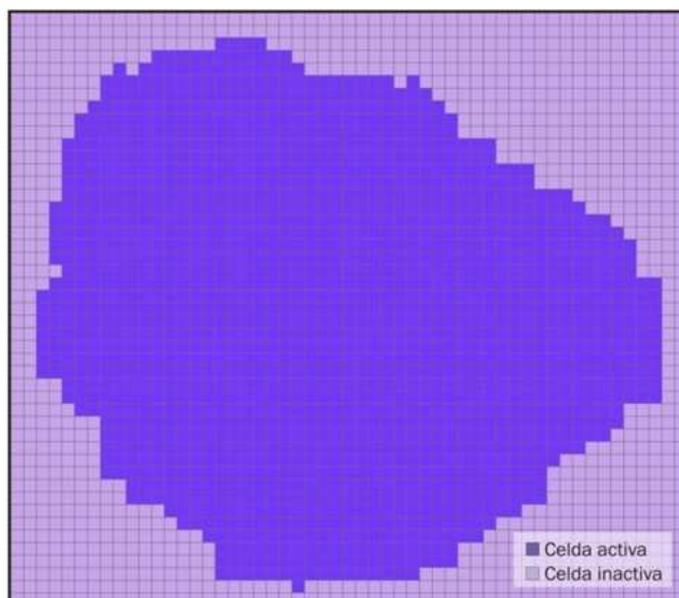


Figura 4. Malla utilizada para la interpolación generada a partir del MDE de 5 m de la isla con un tamaño de celda de 500 m.

KED es un tipo de *Kriging* Universal (UK, siglas en inglés) el cual, es a su vez, una generalización del *kriging* que elimina la restricción por la que la variable debe tener una media constante. Para ello, considera que la media de la variable en su “vecindario” tiene una tendencia que es el componente no estacionario de la superficie. Es necesario que esta variable secundaria varíe suavemente en el espacio para no generar inestabilidades en el modelo. La ventaja teórica de usar *Kriging* a la hora de interpolar es la posibilidad de modelizar la dependencia espacial de los datos (Lloyd, 2005) lo que proporciona mejores resultados en la interpolación de la precipitación que otros métodos puramente espaciales (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005). Además, en el KED la altura se incluye como una tendencia externa que se relaciona espacialmente con los datos. En los modelos geoestadísticos se expresa normalmente como un polinomio de primer [3] o Segundo orden [4] (Davis, 2002):

$$[3] \quad m(x_0) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k (\alpha_1 x_{1,i} + \alpha_2 x_{2,i})$$

$$[4] \quad m(x_0) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k (\alpha_1 x_{1,i} + \alpha_2 x_{2,i} + \alpha_3 x_{1,i}^2 + \alpha_4 x_{2,i}^2 + \alpha_5 x_{1,i} x_{2,i})$$

donde $x_{1,i}$ y $x_{2,i}$ representan las coordenadas del punto y α_j son los coeficientes de la tendencia.

A la hora de interpolar es necesario conocer la semivarianza de los datos como medida de la dependencia espacial entre ellos. La gráfica de la semivarianza en función de la distancia a un punto se denomina semivariograma. Así, el semivariograma experimental es la representación de la semivarianza entre cada par de puntos de los datos reales. Dependiendo de la tendencia obtenida y la forma de los datos el semivariograma experimental se ajusta al modelo teórico más apropiado. De los diferentes modelos teóricos posibles se han ajustado manualmente, siempre que ha sido posible, los parámetros del semivariograma al modelo esférico. Sin embargo, los datos de algunos meses se ajustan mejor a un modelo exponencial mientras que otros han tenido que ser ajustados de manera automática por el programa. El modelo esférico se caracteriza por un aumento elevado de la semivarianza en el origen, es decir, en distancias cortas hasta que alcanza el rango de distancia en el que la semivarianza es constante.

Así, hemos generado un total de 348 mapas de precipitación mensual para La Gomera. Para poder analizarlos de forma sencilla en la figura 5 aparecen los mapas de precipitación media mensual de la serie temporal. En ellos se observa cómo la distribución espacial de la precipitación apenas varía a lo largo del año mientras que los valores máximos presentan un rango de variación de entre 5 mm para los meses de verano y 130 mm para los meses de otoño.

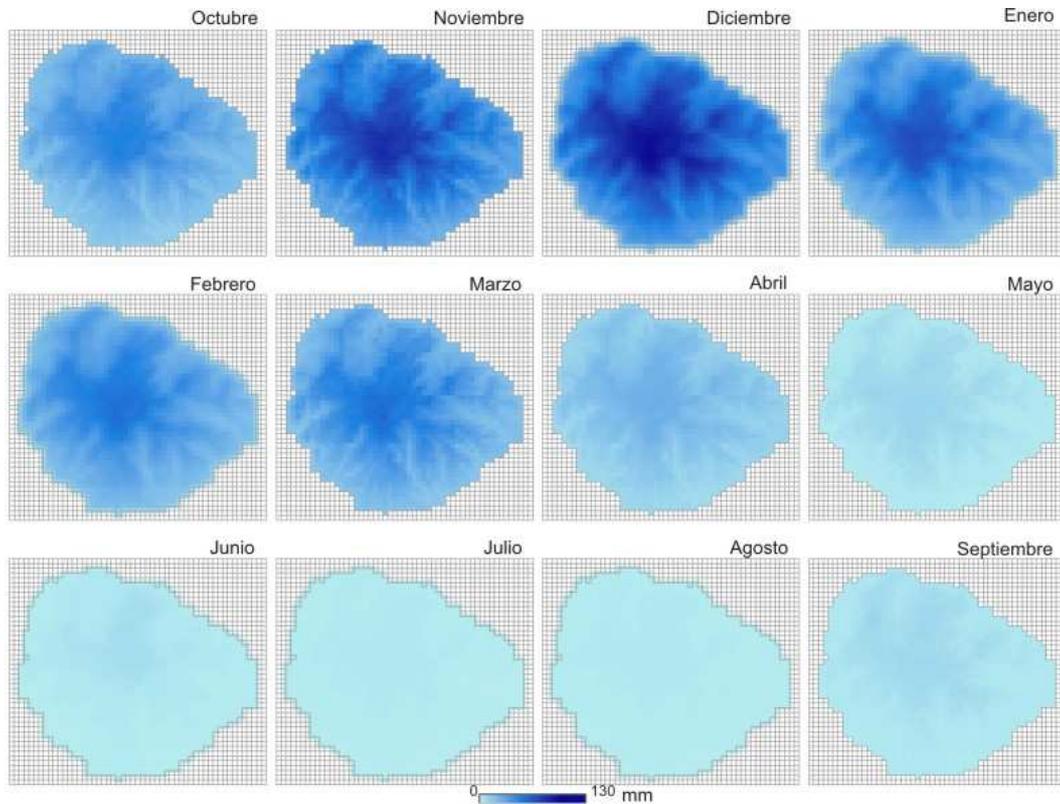


Figura 5. Mapas de precipitación media mensual (mm) para la serie temporal (1980/81-2008/09).

Al evaluar la variación temporal de la precipitación anual a lo largo de nuestra serie temporal (Figura 6) observamos como existe una elevada variabilidad que hace que considerar el valor medio de la serie (360 mm anuales) como representativo sea poco adecuado para la gestión puesto que existen años con una precipitación de 630 mm y otros con un precipitación anual total de apenas 110 mm.

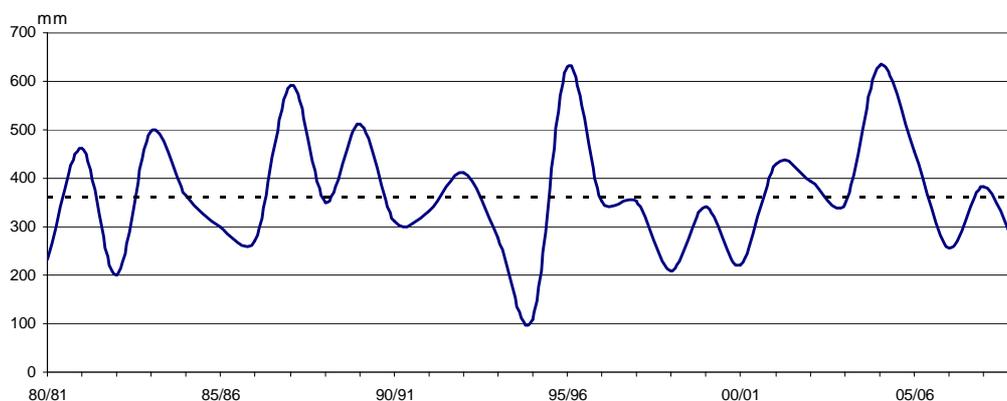


Figura 6. Variación temporal de la precipitación anual desde el año 1980/81 al año 2008/09; la línea discontinua representa la media de la serie temporal.

Para poder comparar los resultados de este trabajo con los estudios previos realizados en la isla es necesario realizar el mapa de precipitación media anual a pesar de que éste no se utiliza para los cálculos mensuales del balance realizado en este trabajo (Figura 7). El Estudio Hidrogeológico del IGME (Porras *et al.*, 1985) dibuja en su mapa de precipitación media anual una isoyeta máxima de 800 mm en torno a la zona más alta de la isla, que en el mapa del APHIG (Soler, 1996) y del PHIG (Soler *et al.*, 2002) se ve reducida a 700 mm. En el caso del mapa de precipitación media insular calculado en este trabajo la isoyeta máxima tiene un valor de 600 mm, llegando en el centro de la isla los valores a 640 mm.

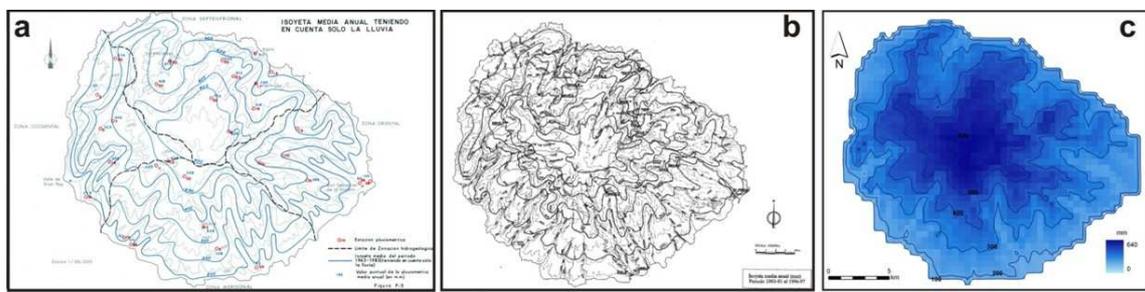


Figura 7. Precipitación media anual: a.- según el estudio Hidrogeológico del IGME (Porras *et al.*, 1985); b.- el PHIG (Soler *et al.*, 2002); y c.- este trabajo.

La diferencia de valores con los aportados por el PHIG (Soler *et al.*, 2002) se debe a la diferente serie temporal utilizada. El PHIG (Soler *et al.*, 2002) obtiene unos valores muy similares a los del APHIG (Soler, 1996) concluyendo que en 1993 se disponía ya de una información pluviométrica representativa del régimen insular, a pesar de que la serie temporal utilizada por el mismo es de apenas 10 años hidrológicos cuando según la Organización Meteorológica Mundial la mínima serie temporal necesaria para caracterizar la precipitación en una isla es de 25 años (OMM, 1994).

Además, los métodos de interpolación utilizados para generar el mapa de isoyetas en todos los estudios previos han sido clásicos, es decir, generación manual de los mapas a partir de los datos puntuales. En este trabajo se han utilizado por primera vez para la isla de La Gomera métodos geoestadísticos, por lo que los resultados obtenidos son más precisos.

3. Precipitación horizontal

En este trabajo se ha simplificado el modelo desarrollado por Braojos & García (2009) para calcular la precipitación horizontal en Tenerife y su importancia en los acuíferos de la isla. Hemos simplificado el modelo debido a la falta de datos de campo que éste necesita como información de entrada, como por ejemplo, el número de días de lluvia de cada mes o el número de días en el que la humedad relativa supera cierto umbral. En su lugar, hemos utilizado los datos de la escasa información bibliográfica existente sobre la niebla en Canarias y la precipitación horizontal en La Gomera para aplicarlos sobre la malla de 500 m de tamaño de celda.

Nuestro modelo para calcular la precipitación horizontal se puede expresar como la ecuación [5]:

$$[5] Ph = ((Ph_b * V) * C_o) * C_p$$

donde:

Ph_ precipitación horizontal

Ph_b_ precipitación horizontal bruta

V_ potencial de la vegetación para captar la precipitación horizontal

C_o_ orientación de la celda

C_p_ potencial de la celda para ser afectada por la niebla cada mes

3.1. Celdas afectadas por la niebla (C_p).

Las celdas afectadas por la nube son aquéllas que se encuentran dentro del rango altitudinal del mar de nubes calculado para cada mes del año. Dorta (1996) presenta los valores de la altura a la que ocurre la inversión térmica para la isla de Tenerife después de diez años de estudio. La inversión térmica es una característica climática regional que limita en altura a los vientos alisios, esto es, es la máxima altura que puede alcanzar el mar de nubes. Sin embargo, calcular el límite inferior no es tan sencillo y aunque Valladares (1996) sugiere un espesor de 787 m para Tenerife basado en la medición en dos estaciones meteorológicas diferentes, esto implicaría que la nube estaría prácticamente al nivel del mar durante del verano (Figure 8). En este trabajo hemos asumido un espesor de 300 m de acuerdo con la altura a la que hemos encontrado el mar de nubes durante nuestra experiencia en el campo.

Este rango altitudinal da como resultado 12 distribuciones espaciales, una para cada mes del año, en las que se representan las celdas influenciadas por el mar de nubes, esto es, las celdas en las que potencialmente se puede captar precipitación horizontal. Se ha asumido que el contenido hídrico de la nube es el mismo en todas las alturas aunque se sabe que cambia debido al ascenso adiabático (Walmsley *et al.*, 1996) de forma que una celda puede tener valor 1 si es afectada por la nube o valor 0 si no lo es.

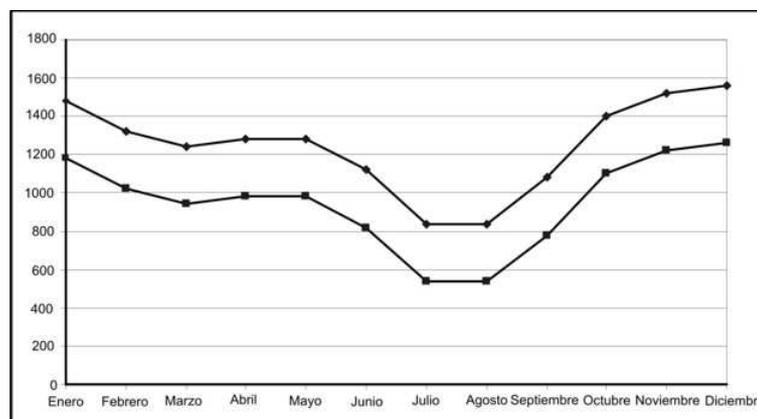


Figura 8. Altitud máxima y mínima del mar de nubes para La Gomera (modificado de Valladares (1996)).

3.2. Influencia de la orientación de la celda (C_0).

La altitud no es la única variable física que afecta a la precipitación horizontal. Debido a la existencia de los alisios como vientos predominantes, las celdas orientadas a barlovento estarán más afectadas por la niebla que aquellas orientadas a sotavento. García-Santos (2007) determinó que en La Laguna Grande, en la zona de cumbres, la dirección predominante del viento es NNE por lo que a partir de la orientación de cada celda las hemos clasificado utilizando la tabla III según la posible influencia de la niebla en ellas. Así, las celdas orientadas hacia el N y el NE están completamente expuestas a la niebla por lo que su valor es de 1; las celdas orientadas hacia el E y el NO se encuentran expuestas en menor medida por lo que su valor es de 0,6; las celdas orientadas hacia el SE y el O se encuentran más resguardadas del mar de nubes y es más difícil que exista precipitación horizontal en ellas por lo que su valor es de 0,3; y por último, las celdas orientadas hacia el S y SO están orientadas hacia barlovento por lo que no están influidas por el mar de nubes.

Tabla III Relación entre la orientación de la celda y la influencia del mar de nubes.

| Orientación | Influencia de la niebla |
|-------------|-------------------------|
| N | 1 |
| NE | 1 |
| E | 0,6 |
| SE | 0,3 |
| S | 0 |
| SO | 0 |
| O | 0,3 |
| NO | 0,6 |

3.3. Influencia de la vegetación (V).

Cada especie de árbol capta una cantidad diferente de niebla principalmente en función de la forma de sus hojas. Especies con hojas estrechas, especialmente aciculares, como el pino canario o el brezo captan una mayor cantidad de niebla debido a que presentan condiciones aerodinámicas más favorables para la adhesión de las gotas de agua que aquellos árboles de la laurisilva con hojas de tamaño medio.

Hemos simplificado la clasificación de Wildpret & Martin (1997) para el monteverde de La Gomera atendiendo a su composición y estructura y relacionándolo con la incidencia de la niebla: (i) laurisilva de valle, (ii) laurisilva de ladera, (iii) fayal-brezal y (iv) brezal de crestería. Usando los valores anuales medidos por Gómez & Fernández (2002) hemos asignado un potencial a cada tipo de bosque para captar niebla del mar de nubes (Tabla IV).

Tabla IV. Valores asignados a cada tipo de vegetación para captar precipitación horizontal.

| Tipo de vegetación | Potencial para captar niebla |
|----------------------|------------------------------|
| Laurisilva de valle | 0,5 |
| Laurisilva de ladera | 0,6 |
| Fayal-brezal | 0,4 |
| Brezal de crestería | 1 |
| Pinar | 1 |

3.4. Precipitación horizontal bruta (Ph_b).

La precipitación horizontal bruta es aquella que se produciría en una celda en la que los tres factores anteriormente descritos fueran igual a 1, es decir, la precipitación horizontal potencial. Para calcularla se han utilizado los datos medidos durante 4 años en el captador de niebla ubicado en Tajaqué (cercano al Alto de Garajonay) de Gómez & Fernández (2002) y Fernández *et al.* (2003; 2004; 2005). Se ha seleccionado éste debido a que representa la precipitación horizontal captada por el brezal de crestería, es decir, uno de los tipos de bosque con mayor potencial de captación de agua de niebla.

Los mapas resultantes (figura 9) muestran por un lado la variación altitudinal del mar de nubes como una variación espacial de las celdas en las que ocurre la precipitación horizontal, y por otro lado, como a pesar de ocurrir durante todo el año es mayor su aportación en aquellos meses en los que el mar de nubes coincide con las zonas más boscosas de la isla. Así, el mes con un mayor aporte de precipitación es marzo, no sólo por los valores obtenidos (máximos de 120 mm) sino por la extensión en la que se produce precipitación horizontal. Julio y agosto son en cambio, los meses con menor aporte de precipitación horizontal con valores de entre 30 y 35 mm y una distribución espacial muy reducida.

Este modelo de la precipitación horizontal, a pesar de ser sencillo y no tener en cuenta algunos parámetros importantes como la velocidad del viento, es el primero en el que se modeliza espacialmente la aportación del mar de nubes al balance hídrico de la isla. Braojos & García (2009) calculan para Tenerife valores máximos de precipitación horizontal de hasta 1200 mm anuales mientras que los máximos anuales calculados para La Gomera en este trabajo solamente alcanzan los 765 mm. La única aproximación a la modelización de la captación de precipitación horizontal previa en La Gomera se ha realizado en una cuenca hidrográfica de 44 ha situada cerca del Alto del Garajonay por

Ritter *et al.* (2007) obteniendo valores relativos de la misma con respecto a la precipitación convencional del 100% para la estación húmeda y hasta el 1000% para la estación seca. Nuestros resultados muestran que en los meses más húmedos en el sector central de la isla, los valores se duplican mientras que en los meses de verano, a pesar de que su aportación es menor espacialmente, proporcionalmente en aquellas celdas en las que ocurre supone un aporte de hasta el 600% de la precipitación convencional.

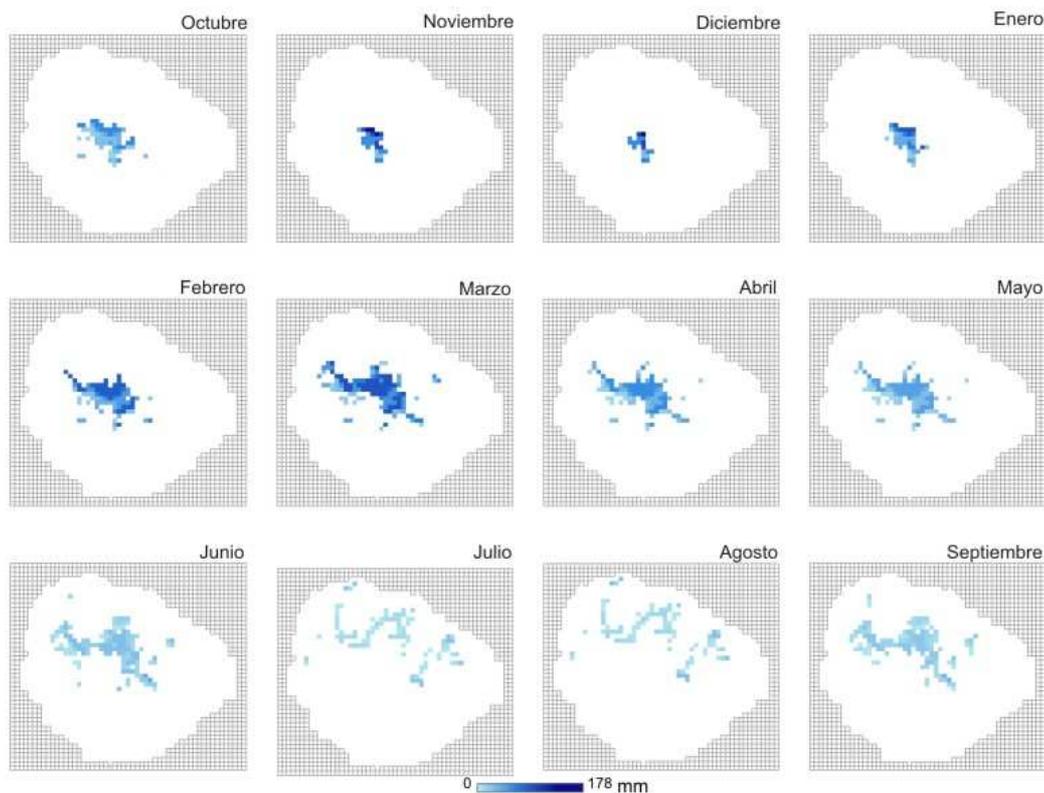


Figura 9. Mapas mensuales de precipitación horizontal (mm) calculada para La Gomera.

4. Precipitación total

La precipitación total es la suma de la precipitación convencional calculada en el apartado 2 para cada uno de los meses de la serie temporal 1980/81-2008/09 y la precipitación horizontal calculada en el apartado 3 para cada mes del año. Hay que matizar que aunque en el apartado anterior se ha calculado la precipitación horizontal, ésta no incluye el escurrido cortical que ocurre al entrar en contacto la niebla con la vegetación. Los

resultados obtenidos se presentan resumidos en la figura 10 que representa la precipitación total media mensual.

Los mapas muestran cómo la aportación de la precipitación de la niebla a la hidrología de la isla es claramente significativa. Así, en la zona central de la isla en la que la niebla ejerce su máxima influencia los valores máximos para noviembre, por ejemplo, pasan de 105 a 290 mm y en julio de 3 a 16 mm.

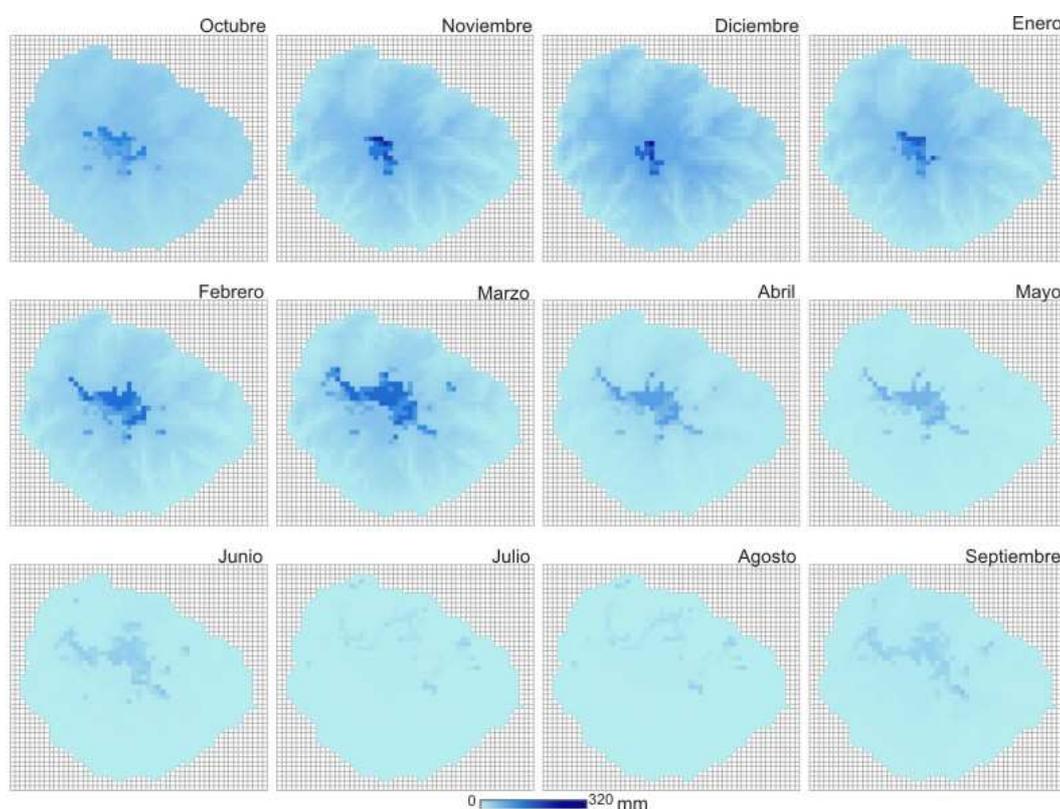


Figura 10. Mapas de precipitación total media mensual (mm) para la serie temporal (1980/81-2008/09).

5. Escorrentía

En este trabajo se ha considerado que la escorrentía ocurre antes de que el agua se infiltre en la reserva de agua del suelo ya que según Freeze (1972) es lo que sucede en

áreas en las que el nivel piezométrico se encuentra suficientemente profundo, como es el caso de La Gomera en la que el espesor de la zona no saturada suele superar los 50 m.

En este trabajo se ha calculado la escorrentía mediante el método del *Soil Conservation Service* (SCS; actualmente *National Resources Conservation Service*; NRCS, 2004). La metodología basada tanto en el tipo de uso del suelo (urbano, bosque, etc.) como en las características hidrológicas del tipo de suelo se encuentra disponible en ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_hydraulics/tr55/tr55.pdf.

El cálculo de la precipitación neta, es decir, de la precipitación total menos la escorrentía se obtiene de las fórmulas [6] y [7]:

$$[6] \quad P_n = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad [7] \quad S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

donde:

Pn_ precipitación neta

P_ precipitación total

S_ umbral de escorrentía

CN_ número de la curva, obtenido mediante gráficas o tablas

Por último, CN puede modificarse si se conocen las condiciones previas de humedad del suelo. En nuestro caso se ha considerado que el suelo se encontraba seco al comenzar el mes de octubre, es decir, al comienzo del balance hídrico, así como de junio a septiembre debido a la sequía estival.

La figura 11 representa la esorrentía media mensual para la serie temporal analizada.

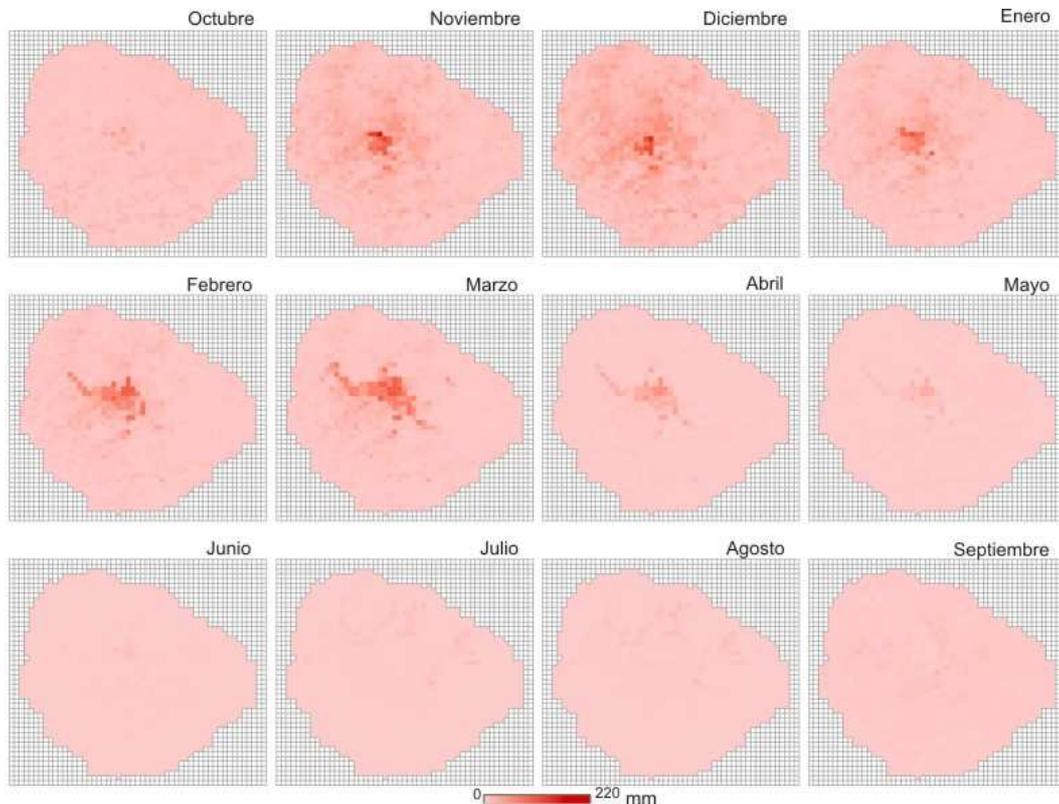


Figura 11. Mapas de esorrentía media mensual (mm) para la serie temporal 1980/81 – 2008/09.

En ella se observa claramente cómo los valores más altos de esorrentía coinciden con los meses de mayor precipitación mientras que en los meses de sequía la esorrentía se reduce prácticamente a la décima parte. Espacialmente, la esorrentía durante los meses húmedos sigue un patrón similar al de la precipitación mientras que en los meses más secos tiene más influencia bien la precipitación horizontal (julio y agosto) bien el tipo de uso del suelo (septiembre y octubre).

6. Temperatura y evapotranspiración potencial

Para este estudio se han recopilado e integrado en el SIG previamente mencionado datos de temperatura media mensual desde el año 1975 a 2009 de 26 termómetros pertenecientes a la red de la Agencia Estatal de Meteorología de los 29 que aportan o

han aportado datos en la isla. Todos los termómetros excepto 5 se corresponden con estaciones meteorológicas completas de las que también se disponía de datos de precipitación, sin embargo, como se puede apreciar en la figura 12 su distribución espacial es mucho más heterogénea que en el caso de los pluviómetros. Como la serie temporal utilizada para la precipitación quedó finalmente reducida a los años 1980-2009 para la temperatura se usaron los datos de esos mismos años.

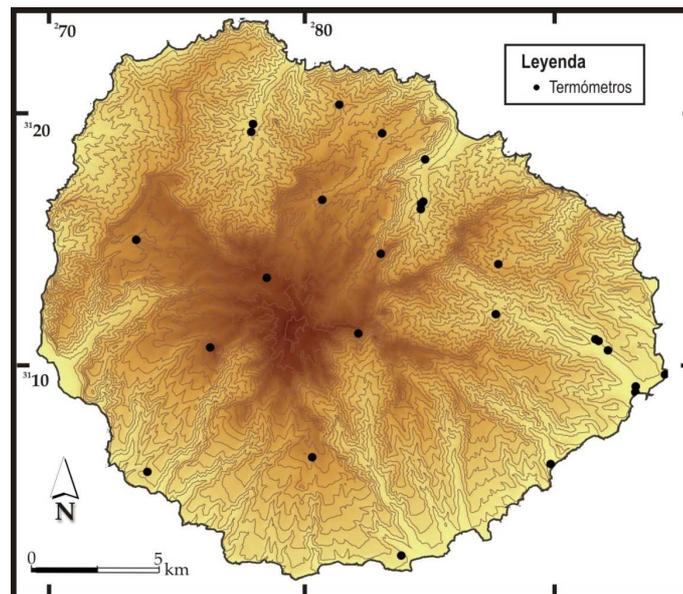


Figura 12.- Mapa en el que se representan los termómetros utilizados en este estudio.

El completado de los datos se realizó siguiendo la misma metodología que con los datos de precipitación aunque al contar con tan pocos termómetros se tuvieron que agrupar en un solo grupo. De la misma forma, una vez completadas las series temporales, para calcular los mapas de temperatura de la isla se siguió la metodología explicada para la precipitación, es decir, se interpolaron los datos puntuales de los termómetros mediante KED utilizando la misma malla que para la precipitación.

Posteriormente, y utilizando los resultados de la interpolación de la temperatura se calculó la ETP. Esta aproximación se denomina “*interpolate-then-calculate*” (McVicar *et al.*, 2007) y tiene la ventaja de que conserva la influencia de la topografía en los cálculos ya que calcula la ETP para cada una de las celdas de la malla mientras que con el procedimiento contrario sólo se calcularía la ETP en 26 puntos y después se interpolaría ésta en vez de la temperatura.

En este estudio se decidió utilizar la fórmula de Thornthwaite (1948) de entre los diferentes métodos empíricos existentes por ser de los pocos que basándose solamente en la temperatura media mensual calcula la ETP. El resto de métodos necesitan de datos complementarios como la humedad relativa, la velocidad del viento o la radiación solar incidente de los que no se disponía. Su ecuación es la siguiente [8]:

$$[8] \quad ETP = 16 \times ((10 \times T_m) / I)^a$$

donde:

T_m temperatura media mensual

I índice de calor anual

a exponente en función del índice de calor anual

La relación empírica está referida a un mes tipo de 30 días y cada uno de ellos con 12 horas de sol por lo que para obtener la ETP precisa se debe ajustar la ecuación mediante la aplicación de un factor de corrección K , que tenga en cuenta el número de días del mes y el número de horas de sol (dependiente de la latitud y la época del año).

La figura 13 muestra cómo, a pesar de las variaciones en los valores de la ETP a lo largo del año debido a su relación directa con la temperatura, su variación espacial es similar a lo largo de todos los meses del año. De esta forma, se puede apreciar cómo los valores más altos ocurren en la zona de costa y en el fondo de los barrancos mientras que los valores más bajos se dan en las zonas altas de la isla.

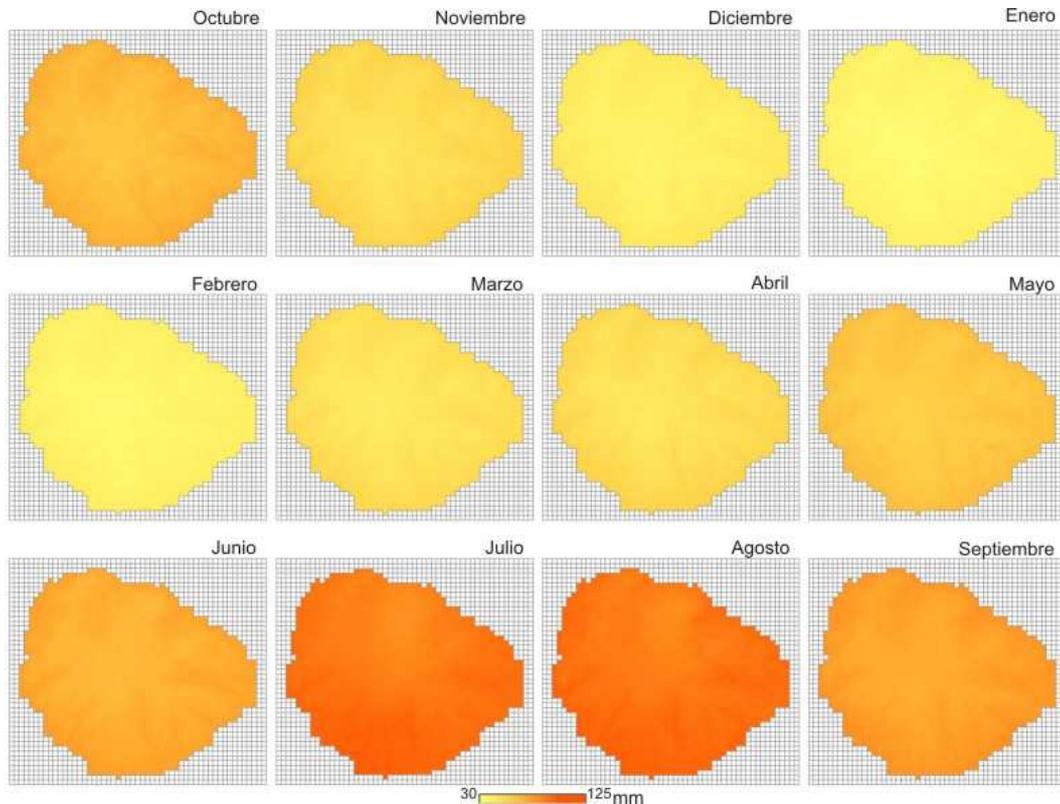


Figura 13. Mapas de evapotranspiración potencial media mensual (mm) para la serie temporal 1980/81-2008/09.

7. Balances hídricos: cálculo de la evapotranspiración real y la recarga

El último parámetro necesario para realizar el balance hídrico es la capacidad de campo de los suelos, es decir, el valor máximo de agua que puede almacenar la reserva del suelo. Este valor varía en función del tipo de suelo pero sobre todo del tipo de su uso, ya que la vegetación es el factor más influyente en este parámetro. En este trabajo se ha utilizado el mapa de suelos de Fernández *et al.* (1974) y sus medidas de campo para los suelos en las que se realizaron. Para el resto se han usado los valores asignados por Shade (1997) para la isla de Molokai en Hawai (tabla V).

Tabla V. Capacidades de campo de los diferentes suelos de La Gomera utilizadas en este trabajo

| Tipo de suelo | Capacidad de campo (mm) |
|---|-------------------------|
| Andosuelos con vegetación de laurisilva y brezo | 132,5 |
| Ranker ándico | 66,2 |
| Tierras pardas ándicas, andosuelos rankeriformes y andosuelos erosionados | 119,2 |
| Tierras pardas rankeriformes, suelos poco evolucionados y litosuelos | 15,6 |
| Suelos poco evolucionados y litosuelos | 14,2 |
| Vertisuelos | 170,0 |
| Suelos antrópicos verticos | 170,0 |
| Suelos poco evolucionados de regadío con aluviones recientes | 76,2 |
| Regosuelos y litosuelos en playas y ramblas | 6,0 |

Para el cálculo de la evapotranspiración real (en adelante ETR) y la recarga de la isla se utilizaron 2 metodologías diferentes propuestas por Shade (1997). En el método A si el agua disponible (precipitación neta más reserva en el suelo del mes anterior) es mayor que la capacidad de campo se produce recarga y el resto del agua disponible hace posible la evapotranspiración. En el método B, al contrario que en el A, el agua disponible en el mes se utiliza para calcular la ETR a partir de la ETP y si la cantidad de agua es mayor que la capacidad de campo, se produce la recarga. De esta forma obtendremos un rango de valores de recarga que variarán desde el máximo valor obtenido en el método A al mínimo obtenido en el método B.

Las figuras 14 y 15 muestran los mapas de evapotranspiración mensual para la media de la serie temporal según el método A y B respectivamente.

A pesar de que los valores máximos correspondientes a cada mes son similares en ambos métodos la distribución espacial de los mismos no lo es. En el método A los valores máximos se concentran en el este de la isla mientras que en el método B la distribución es más homogénea concentrándose, sobre todo en los meses de verano en el centro de la isla, es decir, en la zona de bosque. La diferencia entre ambos métodos hace que en el método B la ETR tienda a asemejarse a la ETP, siempre dependiendo de la cantidad de agua disponible, mientras que en el método A, la ETR es dependiente de

la recarga, es decir, ocurrirá más ETR no sólo donde la ETP sea mayor sino también donde la recarga sea menor.

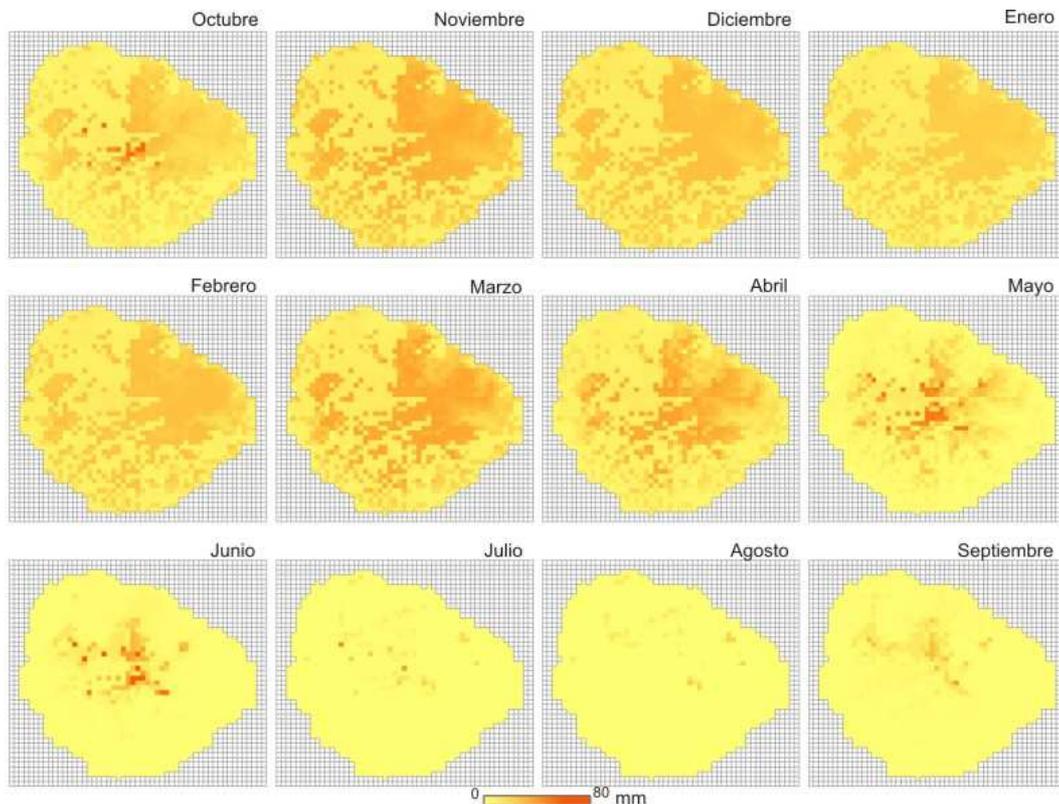


Figura 14: Mapas de evapotranspiración real media mensual (mm) - método A para la serie temporal 1980/81 – 2008/09.

De los estudios previos realizados en la isla el único que presenta un mapa de ETR es el APHIG (Soler, 1996) y lo hace para los valores medios anuales de la isla. En la figura 16 se aprecia como el método B presenta una distribución espacial de la ETR más similar a la del APHIG (Soler, 1996), es decir, concéntrica con los valores máximos ocurriendo en el centro de la isla. Sin embargo, los valores de ETR distan mucho entre ambos puesto que para el APHIG (Soler, 1996) la máxima isolinia representa 350 mm, mientras que tanto para el método A como para el B los valores de ETR superan los 500 mm, llegando a 590 en el método B. Además, a la hora de comparar los valores de ETR es muy importante conocer el valor que se le otorga a la capacidad de campo. Sin embargo, ninguno de los estudios previos especifica los valores que utiliza al realizar el balance hídrico, por lo que resulta difícil tanto la comparación de los valores obtenidos, como el análisis de las posibles diferencias obtenidas en la ETR por la influencia de dicha variable.

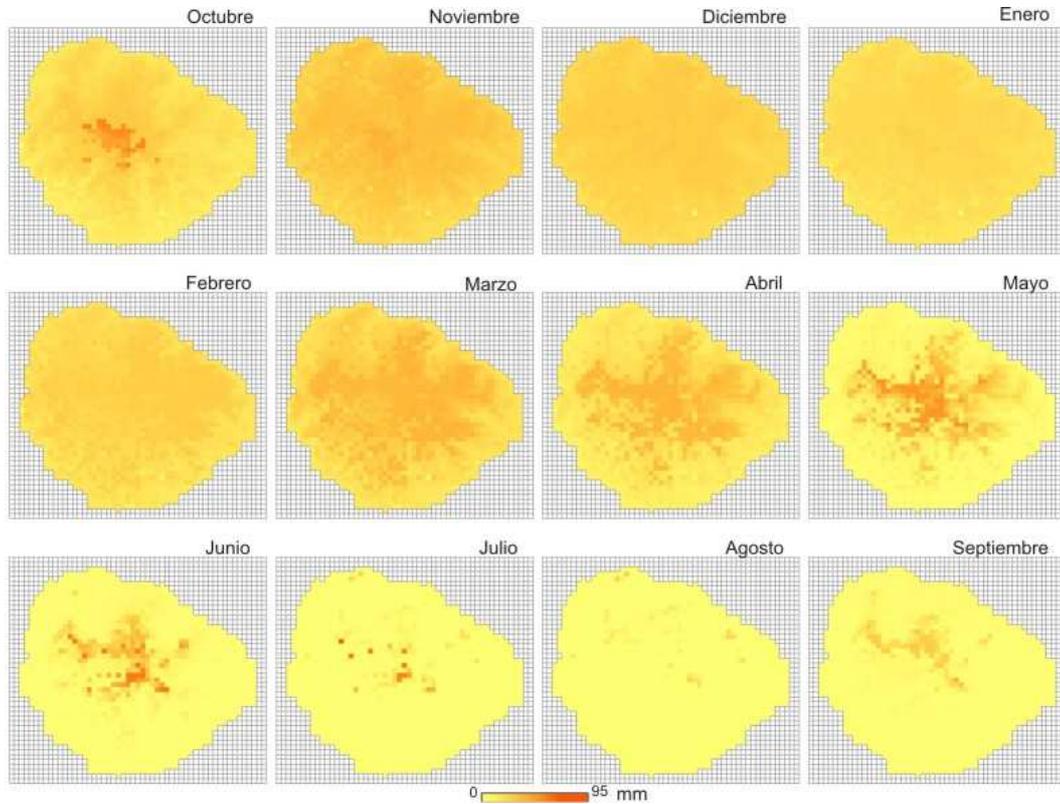


Figura 15. Mapas de evapotranspiración real media mensual (mm) - método B para la serie temporal 1980/81 – 2008/09.

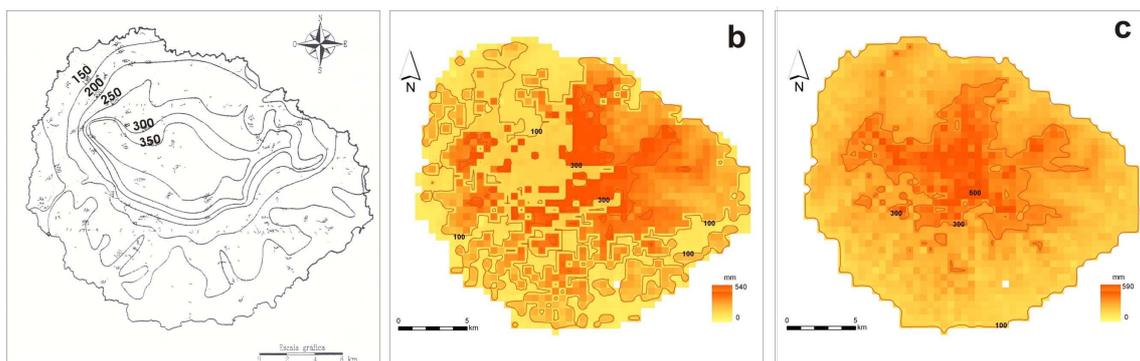


Figura 16. Evapotranspiración real media anual: a.- según el APHIG (Soler, 1996); b.- método A de este trabajo; y c.- método B de este trabajo.

Por último, la recarga calculada para la isla de La Gomera en este trabajo aparece representada en las figuras 17 y 18 (métodos A y B, respectivamente).

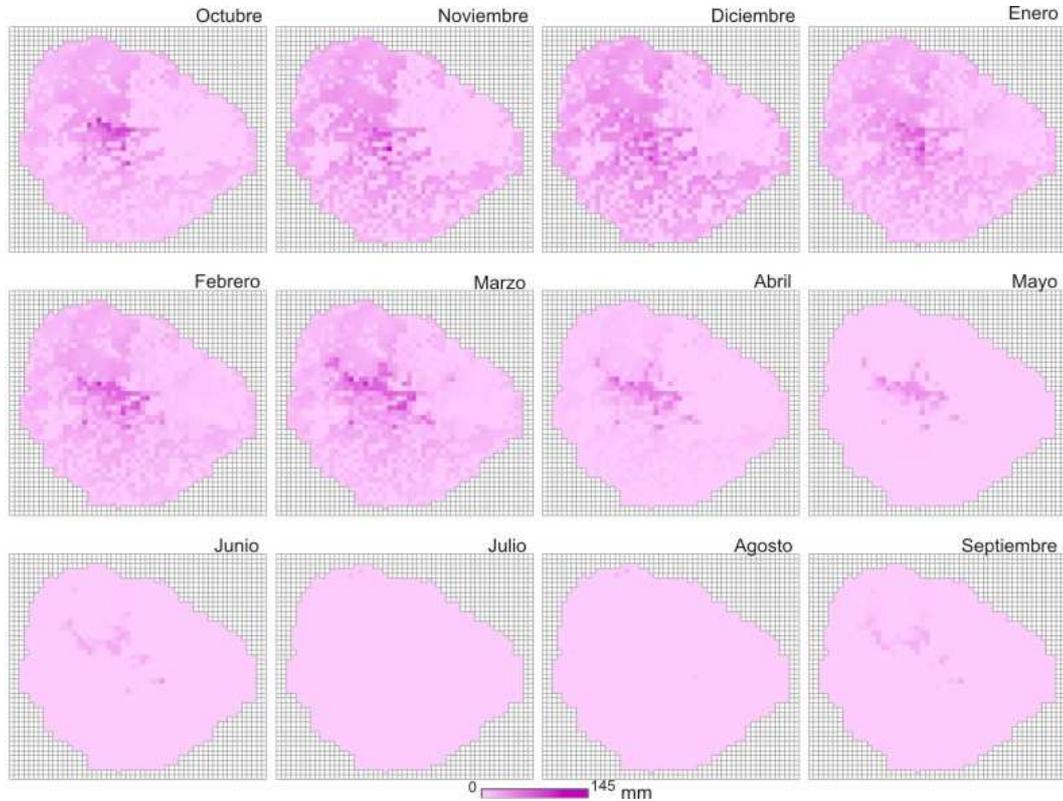


Figura 17. Mapas de recarga media mensual (mm) - método A para la serie temporal 1980/81 – 2008/09.

En este caso los valores obtenidos mediante los dos métodos son muy diferentes, llegando a ser los máximos el doble de altos para la primavera y el otoño en el método A con respecto del B. Sin embargo, durante los meses más húmedos la distribución espacial de la misma es muy similar, ocurriendo principalmente en la zona central y noroccidental; mientras, en los meses más secos, en el método A se obtienen valores dispersos con esta misma distribución, y en el método B la recarga ocurre en la zona central excepto de junio a septiembre en los que no existe recarga.

Igual que ocurría con la ETR, el único estudio previo que presenta un mapa de recarga en la isla es el APHIG (Soler, 1996) para los valores medios anuales. En la figura 19 se presenta éste junto a los mapas de recarga media anual calculados en este trabajo y se comprueba cómo ni la distribución espacial de la infiltración ni los valores de la misma son similares en ningún caso.

A pesar de que la distribución espacial de la infiltración no se corresponde entre ambos trabajos, los valores máximos ocurren en los tres casos en la zona central, más elevada de la isla. Sin embargo, la isolínea máxima de recarga en el mapa del APHIG (Soler, 1996) es de 300 mm, mientras que en este trabajo se ha obtenido una isolínea máxima de 700 mm para el método A y de 400 para el método B. Además, en el mapa del APHIG (Soler, 1996) la zona este de la isla también presenta unos valores de recarga media anual de entre 250 y 300 mm mientras que en el presente trabajo se obtienen valores medios anuales de entre 0 y 100 mm para esa zona en los dos métodos.

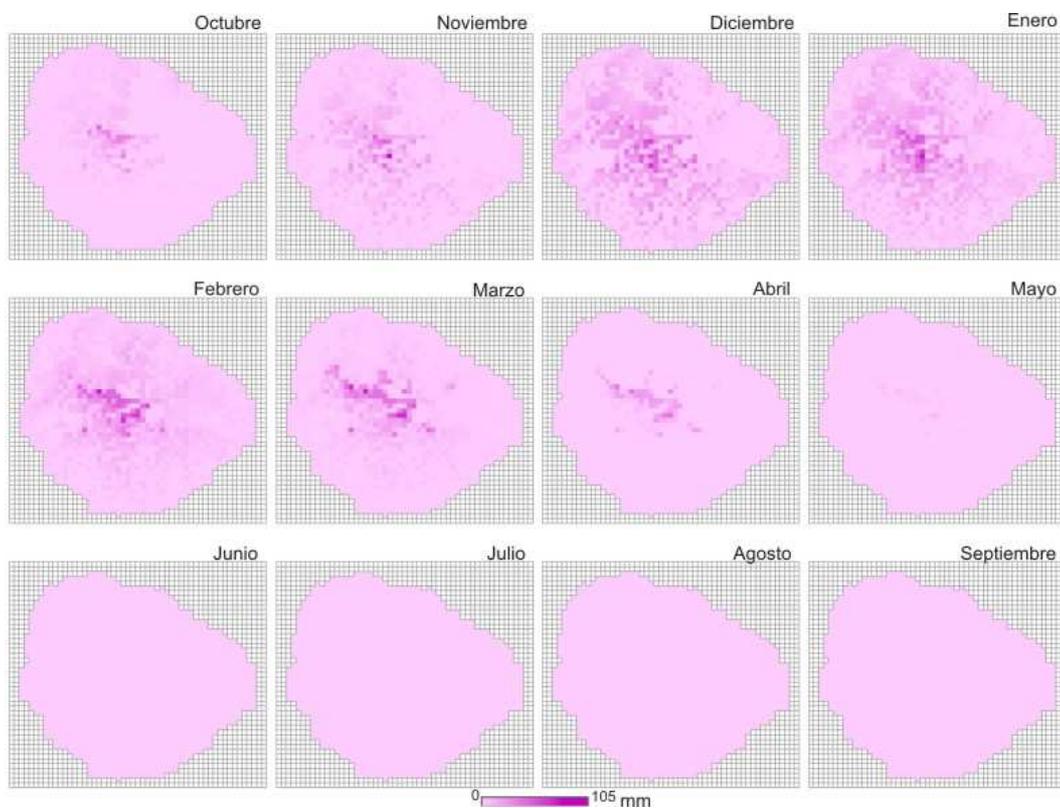


Figura 18. Mapas de recarga media mensual (mm) - método B para la serie temporal 1980/81 – 2008/09.

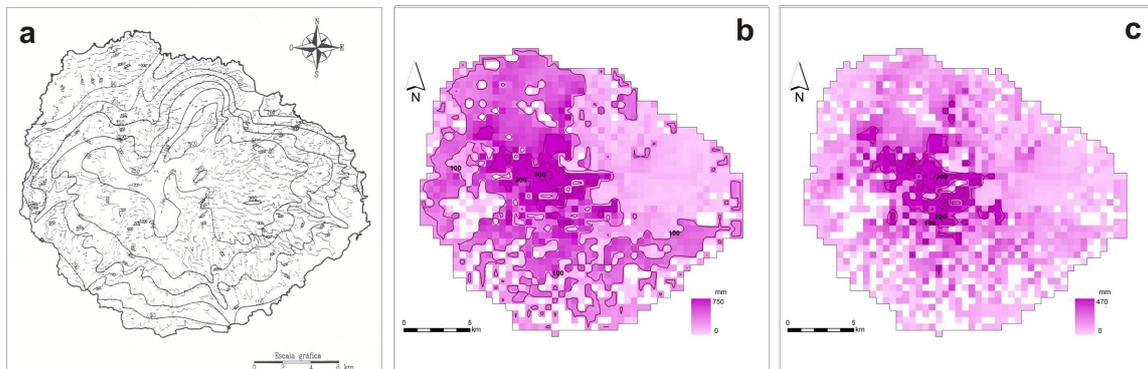


Figura 19. Recarga real media anual: a.- según el APHIG (Soler, 1996); b.- método A de este trabajo; y c.- método B de este trabajo.

8. Discusión

A lo largo del trabajo se ha discutido cada una de las variables del balance hídrico de forma independiente. Para realizar una discusión del estudio en su conjunto se presentan en la tabla VI los valores finales obtenidos junto con los valores calculados en los estudios previos realizados en La Gomera.

El objetivo principal de este trabajo es el cálculo de un rango de valores de la recarga que se produce en el sistema acuífero de la isla como primer paso para una mejor gestión de los recursos hídricos. El resultado final es que el intervalo de variación es de 14 a 43 hm³ medios anuales. Estos valores se encuentran dentro del rango de las recargas anuales previamente calculadas para la isla. En concreto, y comparando con el PHIG (Soler et al., 2002) por ser el documento de gestión de los recursos hídricos de la isla, nuestros resultados son inferiores a los 65 hm³ de dicho trabajo. Sin embargo, el límite máximo, calculado mediante el método A, no es muy diferente teniendo en cuenta que el valor de ETR obtenido en ambos (método A y PHIG) es igual, por lo que la diferencia se encuentra en el volumen anual de escorrentía. Izquierdo & Márquez (2008) calcularon en dos de sus seis métodos valores inferiores de recarga media anual al obtenido por el método B, es decir, al mínimo obtenido en este trabajo. En todo caso para el PHIG (Soler et al., 2002) la recarga supone el 47% de las entradas de la isla (solamente la precipitación convencional) mientras que en el presente trabajo supone 29% para el método A y el 9% para el método B teniendo en cuenta que las entradas de agua en la isla son tanto la precipitación convencional como la precipitación horizontal.

Tabla VI.- Comparación entre los diferentes balances hídricos publicados para La Gomera y este trabajo (valores en hm³).

| | Precipitación | ETR | Escorrentía | Recarga |
|---|---------------|-----------|-------------|-----------|
| SPA-15 (MOPU, 1975) | 185 | 122 | 26 | 37 |
| IGME (Porrás <i>et al.</i> , 1985) | 160 | 127 | 7 | 26 |
| PHI (Soler <i>et al.</i> , 2002) | 137 | 65 | 7 | 65 |
| Método I 1 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 119 | 11 | 7 |
| Método I 2 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 103 | 22 | 12 |
| Método II 1 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 100 | 19 | 18 |
| Método II 2 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 64 | 19 | 54 |
| Método III 1 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 107 | 19 | 11 |
| Método III 2 (Izquierdo & Márquez, 2008) | 137 | 95 | 19 | 23 |
| Método A (este trabajo) | 150 | 65 | 42 | 43 |
| Método B (este trabajo) | 150 | 94 | 42 | 14 |

El valor mínimo de recarga calculado en el método B es aproximadamente el doble de las descargas calculadas para los nacientes de la isla (6,7 hm³ anuales; PHIG, Soler *et al.*, 2002). Así, si el modelo conceptual de flujo planteado por el PHIG (Soler *et al.*, 2002) es correcto y existe conexión entre el acuífero del Edificio Reciente y el del Edificio Antiguo Superior, existiría como mínimo un trasvase entre ambos acuíferos de 7 hm³ anuales.

Por último, los resultados obtenidos tanto en este trabajo como en los futuros será necesario comprobarlos mediante balances hídricos sectoriales que aporten información necesaria para la realización del modelo hidrogeológico. En éstos se utilizará la misma metodología que en el caso de la isla en su conjunto pero para zonas hidrogeológicamente homogéneas en la que se puedan controlar mejor las incertidumbres existentes.

9. Conclusiones

Las conclusiones finales obtenidas en este trabajo son:

Aumentar la serie temporal del balance hídrico mensual de La Gomera de la serie de 25 años a 29 (1980/81-2008/09) ha confirmado la gran variabilidad espacial y temporal de la recarga de los acuíferos insulares.

Al analizar la serie temporal se observa que existen años muy secos por lo que no es apropiado utilizar valores medios anuales en el análisis de los recursos de los acuíferos de la isla.

Este trabajo presenta los primeros resultados de la modelización de la precipitación horizontal a lo largo de un año y su distribución espacial. Los resultados muestran como la captación de niebla duplica los valores de la precipitación convencional durante los meses húmedos y supone el 600% del aporte durante los meses secos. Los valores obtenidos varían entre 13 mm para los meses de verano y 178 mm para los meses más húmedos.

Los valores medios anuales de recarga obtenidos mediante dos métodos distintos (A y B) se corresponden con un rango de valores que permite conocer los límites máximos y mínimos de la misma para la isla. Varían entre 14 a 43 hm³ medios anuales. Espacialmente, la mayor parte de la recarga ocurre en la zona central de la isla tanto en el método A como en el B, coincidiendo con los materiales más recientes de la isla y con la zona de máxima precipitación.

Integrar las variables ambientales en un Sistema de Información Geográfica junto con el uso de valores de capacidad de campo específicos para los suelos de la isla, así como el cálculo de la precipitación horizontal en la misma hacen que los resultados de este trabajo mejoren los cálculos del balance hídrico de La Gomera con respecto a anteriores estudios.

El rango de valores obtenido para la recarga de los acuíferos insulares es menor que el calculado para el Plan Hidrológico Insular de La Gomera aún incluyendo la precipitación horizontal, por lo que para una correcta gestión de los recursos hídricos de la isla deberían revisarse dichos valores en la futura revisión y actualización del Plan Hidrológico Insular.

Agradecimientos

Agradecemos a la Agencia Estatal de Meteorología la información sobre la precipitación y la temperatura de La Gomera.

Referencias

- Ancochea, E., Brändle, J. L., Cubas, C. R., Hernán, F., Herrera, R. & Huertas, M. J. (2004). La Gomera en *Geología de España*. Vera, J. A. (ed.) Sociedad Geológica de España, Instituto Geológico y Minero de España, 658-660.
- Ancochea, E., Hernán, F., Huertas, M. J., Brändle, J. L. & Herrera, R. (2006). A new chronostratigraphical and evolutionary model for La Gomera: Implications for the overall evolution of the Canarian Archipelago, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157 (4), 271-293.
- Braojos, J. J. & García, E. (2009) Aproximación al cálculo de a lluvia horizontal y a su incidencia en la recarga del sistema acuífero de Tenerife (Hidrología y gestión del agua). *Jornadas de Ingeniería del Agua 2009. Agua y Energía*. 27 y 28 de Octubre, Madrid.
- Bravo, T. (1964). Estudio geológico y petrográfico de la isla de la Gomera, *Estudios Geológicos*, 20, 1-21.
- Cendrero, A. & Díaz de Terán, J. R. (1985). Caracterización cuantitativa de los procesos de erosión en las series volcánicas de la isla de La Gomera (Canarias), *Actas de la I Reunión del Cuaternario Ibérico. Lisboa*, 1, 531-543.
- Cendrero, A. (1971) Estudio geológico y petrológico del complejo basal de la isla de La Gomera (Canarias), *Estudios Geológicos*, 27, 3-73.
- Cubas, C. R. (1978). Estudio de los domos sálicos de la isla de La Gomera (Islas Canarias). I Vulcanología. *Estudios Geológicos*, 34, 53-70.
- Cueto, L. A., Gómez, J. A., Balcells, R., Barrera, J. L., Pineda, A., Klein, E., Cerrato, M., Ruiz, M.T. & Brändle, J. L. (2004a). *Mapa Geológico de España, 1:25.000, hoja nº 1.097 I-II (San Sebastián de La Gomera)*. IGME
- Cueto, L. A., Gómez, J. A., Balcells, R., Barrera, J. L., Pineda, A., Klein, E., Cerrato, M., Ruiz, M.T. & Brändle, J. L. (2004b). *Mapa Geológico de España, 1:25.000, hoja nº 1.097 III (Hermigua)*. IGME

- Cueto, L. A., Gómez, J. A., Balcells, R., Barrera, J. L., Pineda, A., Klein, E., Cerrato, M., Ruiz, M.T. & Brändle, J. L. (2004c). *Mapa Geológico de España, 1:25.000, hoja nº 1.097 IV (Agulo)*. IGME
- Cueto, L. A., Gómez, J. A., Balcells, R., Barrera, J. L., Pineda, A., Klein, E., Cerrato, M., Ruiz, M.T. & Brändle, J. L. (2004d). *Mapa Geológico de España, 1:25.000, hoja nº 1.105 I (Punta del Cabrito)*. IGME
- Cueto, L. A., Gómez, J. A., Balcells, R., Barrera, J. L., Pineda, A., Klein, E., Cerrato, M., Ruiz, M.T. & Brändle, J. L. (2004e). *Mapa Geológico de España, 1:25.000, hoja nº 1.097 IVI (Alajeró)*. IGME
- Custodio, E. & Cabrera, M. C. (2002). ¿Cómo vivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3), 243 – 258.
- Davis, J. C. (2002). *Statistics and data analysis in geology*. 3 ed. USA. John Wiley & Sons, 638 pp.
- Dorta, P. (1996). Las inversiones térmicas en Canarias. *Investigaciones Geográficas*, 15, 109-124.
- Espejo, G. (2008). *Análisis cuantitativo de métodos geoestadísticos para la modelización espacial de la precipitación en La Gomera (Islas Canarias)*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos, 78 pp.
- Fernández, A. B. (1998). *Guía de visita del Parque Nacional de Garajonay*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, 161 pp.
- Fernández, E., Monturiol, F. & Gutierrez, F. (1974). Distribución y características de los suelos canarios. III Isla de La Gomera. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 33 (7-8) 531–543.
- Fernández, A. B., Zamorano, A., Gómez, L. A., Fagundo, C., Bañares, A. & Carque, E. (2003). Parque Nacional de Garajonay. Memoria anual 2003. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Canarias. 168 pp.
- Fernández, A. B., Zamorano, A., Gómez, L. A., Fagundo, C., Bañares, A. & Carque, E. (2004). Parque Nacional de Garajonay. Memoria anual 2004. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Canarias. 137 pp.
- Fernández, A. B., Zamorano, A., Gómez, L. A., Fagundo, C., Bañares, A. & Carque, E. (2005). Parque Nacional de Garajonay. Memoria anual 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Canarias. 168 pp.
- Freeze, R. A. (1972). The role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas. *Water Resources Research*, 8 (5) 1272 – 1283.

- García-Santos, G. (2007). *An ecohydrological and soil study in a montane cloud forest in the National Park of Garajonay, La Gomera (Canary Islands, Spain)*. Tesis Doctoral, Vrije Universiteit Amsterdam, 185 pp.
- Gómez, L. A. & Fernández, A. B. (2002). Primeros resultados del seguimiento de la precipitación de niebla en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera, Islas Canarias), 233-246. Colección Documentos Congressuales, Universidad de la Laguna S C Tenerife. *La Biogeografía: ciencia geográfica y ciencia biológica. II Congreso Español de Biogeografía*.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Herrera, R. (2008). *Volcanoestratigrafía, composición y evolución de los Edificios Volcánicos Subaéreos de La Gomera*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 533 pp.
- Ihaka, R. & Gentleman, R. (1996). R Development Core Team, 2006, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Izquierdo, T & Márquez, A. (2007). Estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación en la isla de La Gomera (Islas Canarias): Evaluación de la incorporación de la altura. *Geogaceta*, 42, 131-134.
- Izquierdo, T. & Márquez, A. (2008). Cálculo de la recarga de la isla de La Gomera (Islas Canarias) en un SIG mediante un balance hídrico mensual. *Geo-Temas*, 10, 857 – 860.
- Izquierdo, T., de las Heras, P. & Márquez, A. Vegetation indices changes in the cloud forest of La Gomera Island (Canary Islands) and their hydrological implications. *Hydrological Processes*. Aceptado.
- Lloyd, C. D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain, *Journal of Hydrology*, 308, 128-150.
- Marzol, M. V., Sánchez, J. L., & Santana, L. (1995) El clima de Garajonay en el contexto insular en *Parque Nacional de Garajonay. Patrimonio Mundial*. Pérez de Paz, Pedro L. (ed.) ICONA; Colección técnica, 350 pp.
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L., Hutchinson, M. F., Mu, X. & Liu, Z. (2007). Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences, *Journal of Hydrology*, 338, 196-220.
- Miguel, J. (2010). *Análisis geomorfológico de una isla volcánica antigua mediante el uso de un SIG: el ejemplo de La Gomera (Islas Canarias)*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos.

MOPU (1975). Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515). Dirección General de Obras Hidráulicas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. UNESCO. Las Palmas de Gran Canaria – Madrid. 4 vols.

MOPU, (1980). *Proyecto MAC-21 de planificación y explotación de los recursos de agua en las Islas Canarias. Comisión interministerial coordinadora del Estado en Materia de Aguas en las Islas Canarias. Memoria.* 33 pp.

Navarro, A.; López, J. A.; La Moneda, E.; Lucena, C.; Ruíz, V.; Adánez, S.; Mateo, E.; Arandilla, M. A.; Gutiérrez, S. & Mohedano, D. (1991). *Actualización del inventario de nacientes de la isla de La Gomera* (Proyecto, Mapas y Fichas). IGME, Madrid.

Organización Meteorológica Mundial (1994). *Guía de prácticas hidrológicas*, 5ª ed., 778 pp.

Paris, R., Guillou, H., Carracedo, J. C., & Pérez Torrado, J. (2005). Volcanic and morphological evolution of La Gomera (Canary Islands), based on new K-Ar ages and magnetic stratigraphy: implications for oceanic island evolution, *Journal of the Geological Society, London*, 162, 501-512.

Pérez de Paz, P. L., Arco, M. del, Acebes, J. R., & Wildpret, W. (1995). La vegetación cormofítica (vascular) del *Parque Nacional de Garajonay en Parque Nacional de Garajonay. Patrimonio Mundial.* Pérez de Paz, Pedro L. (ed.) ICONA; Colección Técnica, 350 pp.

Porras, J.; Gómez, J.; Martín, G.; Lázaro, L.; Olmedo, R.; Fernández, L.; Santana, L. & Rosa, A. (1985). *Estudio Hidrogeológico General de la isla de La Gomera.* Tomo I: Memoria. Tomo II: Planos. Colección Informe. IGME. 170 pp.

Ritter A., Regalado, C. M. & Aschan, G. (2007). An impaction model for estimating fog water collection in a subtropical laurel cloud forest of the Garajonay National Park. In *Proceedings of the Fourth International Conference on fog, fog collection and dew*, Biggs A. & Cereceda, P. (eds.), La Serena, Chile. 355-358 pp.

Santana, L. (1995) La importancia hidrológica de las nieblas en las cumbres del Parque Nacional de Garajonay en *Parque Nacional de Garajonay. Patrimonio Mundial.* Pérez de Paz, Pedro L. (ed.) ICONA; Colección Técnica, 350 pp.

Shade, P. J. (1997). Water budget for the island of Molokai, Hawaii. Honolulu, Hawaii. USGS. 20 pp.

1.1 [Soler, C. \(1996\). Avance del Plan Hidrológico Insular de La Gomera. Cabildo Insular de La Gomera, pp 216.](#)

Soler, C.; Horcajada, J. & Hernández, M. (2002). *Plan Hidrológico Insular de La Gomera.* Cabildo Insular de La Gomera, 166 pp.

- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *The Geographical Review*, 38 (1), 55-94.
- Torres, C., Cuevas, E. & Guerra, J: C. (2002). Caracterización de la capa de mezcla marítima y de la atmósfera libre en la región subtropical sobre Canarias, *3ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Valencia.
- Valladares, P. (1996). Propuesta metodológica para el estudio del mar de nubes: el caso del año 1989 en el norte de Tenerife. *Investigaciones geográficas*, 15, 99-108.
- Walmsley, J. L., Schemenauer, R. S. and Bridgman, H.A. (1996). A method for estimating the hydrologic input from fog in mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 35, 2237-2249.
- Wildpret, W. & Martin, V. E. (1997). Laurel forest in the Canary Island: Biodiversity, Historical Use and Conservation. *Tropics*, 6 (4), 371 – 381.