

Aproximación al cálculo de la lluvia horizontal y a su incidencia en la recarga del sistema acuífero de Tenerife

Autor: Juan José Braojos Ruiz

ITOP; Consejo Insular de Aguas de Tenerife

jbraojos.cia@cabtfe.es

Eduardo García Saleté

Ing. CCy P; INCLAM S.A.

eduardo.garcia@inclam.com

1 Introducción

En Tenerife, por su clima y relieve, existe un importante potencial para captar el agua de niebla, comúnmente denominada lluvia horizontal; sin embargo, no se había cuantificado este potencial, ni tampoco se sabía cuánto representa el aporte de este recurso en el conjunto de la isla, captado de forma natural, y cuál era su incidencia en la recarga del sistema acuífero insular.

Desde principio de los años noventa el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) ha venido desarrollando un Modelo distribuido de Hidrología Superficial para la isla (MHS) que permite obtener información, para distintos niveles de agregación temporal y espacial, acerca de cada una de las variables climáticas que conforman el balance hidrológico. En el formato inicial del MHS la lluvia horizontal participaba en el balance de forma indirecta, complementando -con un valor preestablecido y no suficientemente justificado- el aporte que la lluvia convencional hace a la reserva hídrica del suelo para el consumo de la vegetación. Esta simplificación no dejaba de ser una limitación en la resolución del balance a la hora de definir el valor de la recarga; cuestión ésta que suscitaba incertidumbre y desconfianza en los que defendían su importancia cuantitativa.

Desde hace varias decenas de años han sido muchas las experiencias relacionadas con esta variable climática, en especial, en lo relativo a su captación de forma artificial. Pero también los factores ligados a la ocurrencia del fenómeno, tales como el mar de nubes, la humedad relativa, la velocidad del viento, la morfología de los elementos naturales de captación (sobre todo la vegetación arbórea) han sido objeto de análisis y estudio. Y de igual importancia, o si cabe mayor, lo han sido los experimentos realizados bajo la cubierta de distintas especies vegetales, a partir de los cuales se han obtenido referencias, locales pero muy significativas, de la magnitud de este aporte hídrico al suelo de la isla.

Por otro lado, se cuenta con una red meteorológica densa y bien distribuida que dispone de series representativas de aquellas variables climáticas más asociadas a este tipo de lluvia, tales como la humedad relativa máxima y la velocidad del viento, entre otras. Así mismo, los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el uso y manejo de la información territorial que es determinante en la captación del recurso; muy especialmente la ubicación y densidad del principal elemento captador: la vegetación.

A partir de tales disponibilidades desde el CIATF se ha construido, dentro del MHS, un submodelo matemático que - alimentado con las variables climáticas de humedad relativa máxima, velocidad del viento en días húmedos y número de días de lluvia convencional, así como con los parámetros relativos al territorio (altura, cota de cresta, orientación, pendiente)- ha permitido, en primer lugar, definir **el potencial climático de Tenerife para captar precipitación de niebla**; en segundo lugar, considerando a la vegetación como el elemento natural principal de captación, se ha definido **la cuantía y distribución territorial de la lluvia horizontal que recibe la isla**, y finalmente se ha estimado **la incidencia de este recurso en la recarga al subsuelo**.

En esta comunicación, que se inicia con una breve referencia del MHS, se describe el proceso de cálculo de cada uno de los tres bloques citados; la exposición relativa a los dos primeros, se ha construido de forma secuencial de acuerdo al orden de participación en el proceso de cada uno de los elementos que intervienen en la captación de este recurso.

2 El Modelo de Hidrología de Superficie de Tenerife (MHS)

Determinadas singularidades diferencian el MHS de Tenerife 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 a centenares de metros de profundidad: *No hay aportación subterránea del acuífero general hacia los cauces.*
- La particular geomorfología de los barrancos y la elevada permeabilidad del terreno dan lugar a que: *Los cauces se conviertan en vías de penetración de las escorrentías superficiales hacia el subsuelo.*
- El espesor de la zona de tránsito (superficie topográfica – superficie freática) provoca que: *La infiltración no se corresponda en el tiempo con la recarga al acuífero.*
- La escorrentía superficial es escasa y 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.*

La modelización matemática del sistema parte de la discretización de la isla (superficie = 2.034 km²) en una malla compuesta por 51.645 celdas de 0.200 km x 0.200 km, relacionadas entre sí en función del camino que sigue el flujo de las aguas superficiales. La herramienta informática que desarrolla el MHS consta de cuatro aplicaciones principales:

El “**Gestor de Datos Hidrológicos Básicos de Tenerife**” cuya misión es el tratamiento, gestión y almacenamiento de la información climática, a nivel diario y mensual, correspondiente a las diferentes estaciones existentes en la isla de Tenerife.

El “**Caracterizador de Parámetros**” tiene por objeto calcular -de manera automática- diferentes parámetros de modelización del conjunto de celdas que conforman el MHS, a partir de la información contenida en un conjunto de mapas temáticos que caracterizan diferentes aspectos del territorio de la isla: geología, tipos y usos de suelo, cultivos, vegetación, etc.

El “**Gestor de Modelos Climáticos y Modelizador**” se ha desarrollado para gestionar los datos a utilizar en los modelos climáticos establecidos. Además se encarga tanto de gestionar los datos de entrada correspondientes al MHS como de efectuar pasadas de simulación y almacenar resultados. Utiliza información relativa a la red hidrológica de la isla así como de caracterización hidrológica de cada una de las celdas que conforman la superficie insular: umbral de escorrentía, umbral de infiltración en cauces, coeficientes de evaporación, transpiración y vegetación, capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, etc.

En cada celda se almacena, como dato de partida, la información mensual correspondiente a las variables del clima:

- **PM_{m,n}**: Precipitación mensual del mes “m” en la celda “n” deducida a partir de los registros de más 250 estaciones pluviométricas, con el apoyo de un número similar de estaciones virtuales ubicadas en lugares estratégicos de la isla
- **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
- **NP>5_{m,n}**: Número de días en los que la lluvia supera un determinado umbral (5 mm), en el mes “m” en la celda “n”. Información extrapolada desde las estaciones pluviométricas de lectura diaria
- **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)
- **NHmax>96_{m,n}**: Número de días en los que la humedad relativa máxima supera un determinado umbral (el 96%). Información aportada por la red de observación insular (más de 100 estaciones).
- **VvH_{m,n}**: Velocidad media del viento en días húmedos. Datos éstos que se obtienen a partir de la combinación del NHmax>96% con los registros de Vv que aportan más de 60 anemómetros.

La lluvia horizontal (**PN_{m,n}**) es deducida, dada la imposibilidad de contar con registros de esta variable. Se calcula en cada celda del MHS a partir de las variables climáticas y demás factores que la caracterizan, siguiendo el proceso que se describe en los apartados siguientes.

El “**Visualizador de resultados**” ha sido diseñado para el tratamiento alfanumérico y gráfico de los resultados del MHS: representar mapas, obtener representaciones gráficas de la evolución temporal o estacional de las variables, obtener listados relativos a resultados de modelización.

3 Evaluación del potencial de captación de agua de niebla en la isla de Tenerife

3.1 Variables y factores climáticos considerados en la evaluación de la lluvia horizontal

3.1.1 Umbral de humedad relativa máxima

Algunos investigadores (Valladares, 1995; Marzol, 2003...) asocian la presencia de niebla con situaciones de humedad relativa iguales o superiores al 95% ($HR \geq 95\%$), siempre y cuando aquella haya estado presente durante más de 4 horas consecutivas y, además, la lluvia convencional haya sido igual o inferior a 5,0 mm (Marzol, 2008). Ahora bien, el análisis detallado de las bandas de los termohigrómetros demuestra que la situación de humedad relativa de 95% e incluso de 96% es, la mayoría de las veces, testimonial (apenas unos minutos); por lo que la práctica aconseja tomar como umbral $HR > 96\%$. De esta forma, el número de días en los que podría haber existido niebla (NDN) en un determinado ámbito territorial (en nuestro caso, celdas del MHS) se correspondería con la diferencia entre el número de días con registros de humedad relativa superior al 96% ($NDHR > 96\%$) y el número de días en los que la lluvia convencional ha sido superior a 5 mm ($NDP > 5\text{mm}$).

$$NDN = NDHR > 96\%(\text{días}) - NDP > 5\text{mm}(\text{días})$$

De este análisis tan simple surgió el primer paso en el proceso de evaluación de la precipitación de niebla, pues a priori bastaba con relacionar NDN con un determinado módulo de precipitación diaria (PNo) para disponer de una primera cuantificación de este recurso, aunque muy lejana todavía de su valor real. El valor de PNo se obtendría al final del proceso mediante operaciones de tanteos y ajustes sucesivos.

Para la definición de $NDHR > 96\%$ se dispone de la información histórica aportada por una red de higrómetros que, instalada a mediados de los años ochenta, ha venido densificándose hasta conformar un total de 103 estaciones de registro (1 estación / 20 km²) complementadas con un buen número de estaciones virtuales. De modo similar se han obtenido los días al mes que la lluvia convencional ha superado los 5 mmm ($NDP > 5\text{mm}$).

En esta primera aproximación, la cantidad de precipitación horizontal o de niebla (PN) captada en una celda “n” en un determinado mes “m”, se obtendría a partir de una función tan simple como:

$$PN(\text{mm}) = (NDHR > 96\%(\text{días}) - NDP > 5\text{mm}(\text{días})) \times PNo(\text{mm/día})$$

3.1.2 El mar de nubes

La relación precedente daría lugar a obtener cantidades de PN equivalentes en todas aquellas celdas en las que se dedujeran NDN iguales; lo que no siempre ocurre, pues si bien parece ser requisito indispensable para la existencia de niebla una situación de $HR > 96\%$, por el contrario, la constatación de esta situación no significa necesariamente la presencia del fenómeno. Por otro lado, el contenido de niebla en la nube no es uniforme ya que es alrededor de los 2/3 de la altura de la nube donde se concentra la mayor densidad (Marzol, 2008). Además, el manto de nubes varía sensiblemente en espesor y posicionamiento a lo largo del año.

Al respecto, son conocidos con detalle datos estadísticos relativos a la ubicación media del techo de mar de nubes así como de su espesor a lo largo del año (Ceballos-Ortuño, 1976; Font Tullot, 1951, 1956; Valladares, 1996; Dorta, 1996; Marzol, 2003, 2008; Schemenauer, 1989; Kämmer, 1974;...); a partir de estos datos, se han deducido las cotas máxima y mínima que alcanza el techo y la base del mar de nubes mes a mes.

Con esta información se han elaborado esquemáticamente los 365 perfiles posibles, agrupados por meses, que el manto de nubes adquiere a lo largo del año, teniendo en cuenta su posición en altura, su espesor y su gradiente de densidad de niebla. En cada uno de estos perfiles se deduce, mediante un factor de eficiencia: $KMN = f(Z)$, el grado de afección de la niebla a cada punto de territorio definido por su cota. El valor máximo ($KMN = 1$) se alcanzaría en un hipotético lugar donde el manto de nubes habría tenido que estar presente los 365 días del año afectándolo todo el tiempo con su zona de mayor densidad.

En este punto del proceso, el cálculo de la precipitación de niebla estaría sujeto pues a la siguiente relación:

$$PN(\text{mm}) = (NDHR > 96\%(\text{días}) - NDP > 5 \text{ mm}(\text{días})) \times KMN \times PNo(\text{mm/día})$$

3.1.3 Dinámica de las nubes. La velocidad del viento en días húmedos

Los investigadores del fenómeno coinciden en que el viento es un factor fundamental en la captación de agua de las nubes dada su operatividad en el tránsito de éstas a través del territorio, llegándose a relacionar la velocidad del viento (V_v) con la cantidad de precipitación de agua de niebla captada (Marzol, 2003) o con la eficiencia del elemento captador (Schemenauer, 1989). Los resultados aportados por tales experimentos se han extrapolado al proceso de cálculo que nos ocupa, definiendo un nuevo factor de eficiencia de captación de agua de niebla, dependiente de la velocidad del viento en los días húmedos: $KV_v = F(V_v \text{ con } HR > 96\%)$. Los valores más altos (KV_v próximos o iguales a 1) se alcanzarían con velocidades de viento comprendidas entre los 10 m/s (36 km/h) y los 20 m/s (72 km/h).

Hasta hace poco más de una década la información relativa a esta variable se limitaba a la que aportaban media docena de estaciones; en la actualidad hay repartidos por todo el territorio un total de 65 anemómetros. Esta red se ha complementado con una densa red de estaciones virtuales, las cuales se relacionan con aquellas a través de funciones, para cuya definición ha sido fundamental la información del Mapa de la Cartografía Eólica de Canarias elaborado por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC).

El nuevo factor complementa la función de cálculo acercándonos un poco más al valor real de PN:

$$PN(\text{mm}) = (\text{NDHR} > 96\%(\text{días}) - \text{NDP} > 5\text{mm}(\text{días})) \times \text{KMN} \times \text{KV}_v \times \text{PNo}(\text{mm/día})$$

3.1.4 Nubes de desbordamiento y nubes de estancamiento

La cota del eje dorsal que divide las dos vertientes de la isla es determinante en el movimiento de las nubes y por ende en la captación de precipitación horizontal. Cuando la cota del eje o de cualquier cresta divisoria es inferior a la del techo de ámbito de los alisios, limitado por la inversión térmica, las nubes “desbordan” hacia la vertiente de sotavento dejando, una tras otra, su contenido de humedad en los obstáculos que interceptan su recorrido. Por el contrario, si las alturas de las crestas son superiores, las nubes “resbalan” lateralmente (Seijas, 1998) dando lugar al denominado “mar de nubes”, que apenas llega a contactar con el terreno.

En cada lugar del territorio insular – discretizado en el MHS en celdas de 200 m x 200 m - el número de nubes de desbordamiento dependerá de su posición en altura respecto de la línea de cresta. Tratándose de una celda del MHS, dependerá de su cota (Z) y de la cota de la celda de cresta (Z_c) ubicada en la vertical de la celda en cuestión. De los 365 perfiles de nubes, aludidos en la definición del factor de eficiencia de la niebla (KMN), sólo se consideraron operativos los relativos a nubes de **desbordamiento**, es decir a aquellas susceptibles de superar Z_c . Ahora bien, no existiendo razones objetivas para descartar totalmente las nubes de **estancamiento**, se asignó a éstas un factor de participación (K_e) cuyo valor, desconocido a priori, debería deducirse dentro del proceso de calibración; valor que, como cabía de esperar, resultó ser muy bajo. Con la consideración de estos nuevos parámetros quedó establecido definitivamente el denominado coeficiente de eficiencia de las nubes sobre el territorio: $KMN_c = f(Z, Z_c, K_e)$.

$$PN(\text{mm}) = (\text{NDHR} > 96\%(\text{días}) - \text{NDP} > 5\text{mm}(\text{días})) \times \text{KMN}_c \times \text{KV}_v \times \text{PNo}(\text{mm/día})$$

3.2 El potencial climático insular para captar precipitación horizontal

Si en la función precedente se prescinde del término PNo y se divide por los 365 días del año, habremos deducido el potencial existente en cualquier punto de la isla para captar precipitación horizontal (en tanto por uno) en función de las variables climáticas (humedad relativa y velocidad del viento) y del grado de afección de las nubes derivado del contacto directo de éstas con el territorio (KMN_c).

$$PPN = ((\text{NDHR} > 96\%(\text{días}) - \text{NDP} > 5\text{mm}(\text{días})) / 365 \text{ días}) \times \text{KMN}_c \times \text{KV}_v$$

De la igualdad se deduce que el lugar óptimo para captar agua de niebla ($PPN = 1$) sería aquel en el que:

- los 365 días del año contara con la presencia de nubes generadas, exclusivamente, por vientos alisios
- las nubes, todas de desbordamiento, tendrían siempre el máximo contenido de niebla
- la velocidad del viento en todos los días del año fuera superior a 10 m/s (36 km/h)

El mapa descriptivo de este parámetro, obtenido a través del MHS, pone de manifiesto la inexistencia en la isla de lugares con estas características. El potencial más alto (0.250) se localiza en las crestas de las cumbres orientales de la isla (Anaga); le sigue la cumbre de la cordillera central (dorsal este) con 0.180 y en tercer lugar, con valores de alrededor de $PPN = 0.150$, las zonas de cresta del macizo occidental (Teno).

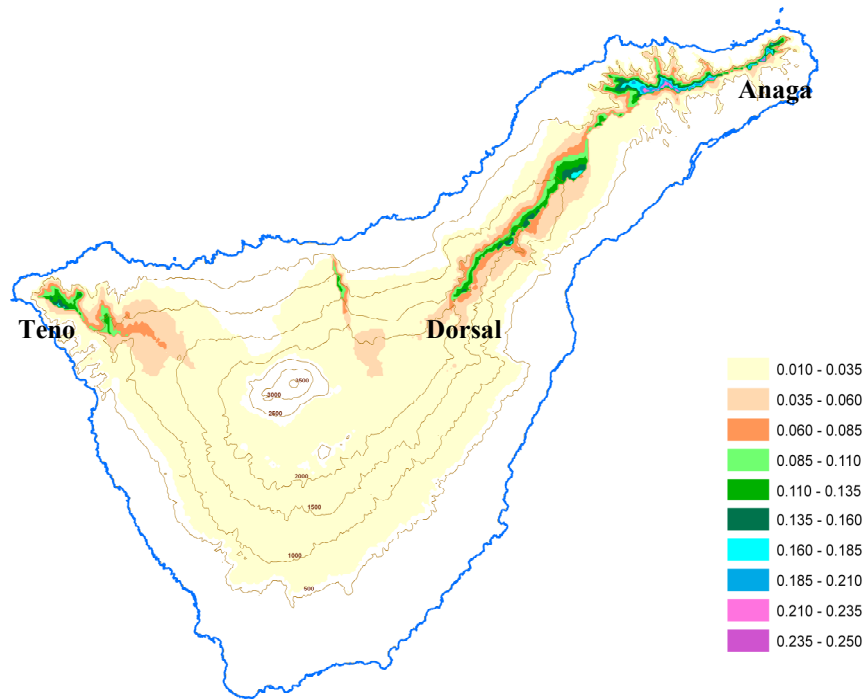


Figura 1 Potencial climático insular para captar agua de niebla (en tanto por uno)

Estacionalmente, en los macizos de Anaga y Teno la captación de agua de niebla se concentra sobre todo en los meses de verano y primavera; en el primero de ellos el potencial llega a alcanzar en las zonas inmediatas a la cumbre un valor medio realmente significativo (0,615). En la cordillera dorsal el fenómeno está más repartido.

Tabla 1 Potencial estacional medio en los principales núcleos de captación (en tanto por uno)

	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	TOTAL
ANAGA	0.175	0.615	0.040	0.030	0.215
TENO	0.125	0.300	0.050	0.045	0.130
DORSAL	0.120	0.025	0.150	0.225	0.130

4 Evaluación de la lluvia horizontal

4.1 La vegetación como elemento natural de captación

4.1.1 Morfología

El perfil, volumen y constitución de la superficie del obstáculo son factores determinantes en la captación de agua de niebla. Respecto del último de ellos, se ha experimentado con diferentes tipos de vegetación (Kämmer, 1974; Santana, 1987) llegando a similares conclusiones: las especies con hojas estrechas – sobre todo, aciculadas - pero numerosas, como el pino canario, el brezo, el tejo,... alcanzan captaciones altas en contraposición a las ramas u hojas de los árboles de los bosques de laurisilva con hojas de una superficie de tamaño medio, ya que aquellas presentan unas condiciones aerodinámicas más favorables para la adherencia de las gotas. La constitución morfológica de la planta condiciona pues la cantidad de agua captada, por lo que se ha introducido en el procedimiento un nuevo coeficiente de eficiencia relativo a esta circunstancia: (KMV).

A los efectos de este trabajo y dado que el análisis se localiza en Tenerife, se ha establecido una clasificación en la que el pino canario es elemento captador por excelencia ($KMV = 1$); el resto de la lista lo constituyen más de ochenta especies diferentes, además de unas sesenta agrupaciones o comunidades vegetales, todas ellas contenidas en el mapa de vegetación de Tenerife (2006). La envergadura del elemento captador se ha tenido en cuenta mediante la aplicación de una función en la que su altura es la variable a considerar: $KHV = f(HV)$.

Entre ambos factores, alusivo uno a la constitución del obstáculo y el otro a su geometría, se ha compuesto un nuevo factor de eficiencia relativo a la morfología de la vegetación: $KMHV = KMV \times KHV$

4.1.2 Densidad de vegetación

En los bosques cerrados la precipitación horizontal se produce casi exclusivamente en algunas partes de los árboles aislados que sobresalen por encima del resto de los árboles, mientras que las copas de los árboles medio y bajo, así como el estrato de matorral y de hierba del bosque, apenas son afectados por la niebla (Kämmer, 1974), ya que ésta desliza por encima de las copas de los árboles sin penetrar entre ellos. Por el contrario, los bosques despejados con calveros entre los árboles, que permiten la circulación, ofrecen los valores más altos de agua captada (Santana, 1987).

Se deduce, por tanto, que en un bosque horizontal con una arboleda de altura semejante la densidad obra en sentido contrario a la capacidad de captación de agua de niebla; llegando a ser ésta escasa en los bosques internos densamente poblados ($> 95\%$). Por otro lado, existe un umbral de densidad de vegetación en el cual y por debajo de él se estima que la niebla penetra en el bosque afectando a la vegetación como si de árboles aislados se tratara. Asumiendo como premisas las precedentes consideraciones se construyó una nueva función que acotó de nuevo la capacidad de captación en función de la densidad de vegetación: $KDV = f(DV)$.

4.1.3 Eficiencia en la captación de agua de niebla según el tipo y densidad de vegetación

Morfología y densidad de vegetación se combinan de forma que entre ambas determinan el grado de eficiencia que posee una especie vegetal para captar agua de niebla: $KVN = KMHV \times KDV$. Su participación en el proceso de cálculo de la lluvia horizontal es directa y con el mismo grado de intervención que los demás factores. En una parcela interna de un bosque de superficie horizontal la precipitación de niebla captada (en L/m^2) sería:

$$PN(mm) = (NDHR > 96\% - NDP > 5mm) \times KMNc \times KVv \times KVN \times PNo$$

4.1.4 La arboleda de borde del bosque

La primera línea de árboles del bosque recibe frontalmente y con toda su intensidad la masa nubosa; con lo que en este caso la lluvia horizontal que recibirá la parcela ubicada en el inicio del bosque será tanto mayor cuanto mayor sea el número de obstáculos que la intercepten; es decir, cuanto mayor sea la densidad de vegetación. Por tanto, el factor de eficiencia debido a la densidad de vegetación debe corresponderse con una función cuasi lineal: $KDVb = f(DV)$. En una parcela o celda de borde de bosque la cantidad de lluvia captada por la primera línea de arbolado tiene que ser equivalente a:

$$PN_{1ª\ línea} = (NDHR > 96\% - NDP > 5mm) \times KMNc \times KVv \times KVNb \times PNo \quad \text{siendo } KVNb = KMHV \times KDVb$$

Una vez traspasada la primera línea, la niebla penetrará en el interior del bosque afectando al arbolado según sea la densidad de vegetación. Se ha experimentado esta circunstancia (Kämmer, 1974) en un bosque de pino canario relativamente denso, ubicado en la cordillera dorsal de Tenerife. Analizados los resultados que se ofrecen de esta experiencia se deduce que la cantidad de agua recogida en el interior del bosque disminuye, a partir de la primera línea de captación, conforme a una ley del tipo: $PN = PN_{1ª\ línea} \times e^{-a \times L}$ en la que “a” sería el factor de “agotamiento” o de reducción de agua captada. La relación precedente es uno de los pilares fundamentales en el que se asienta el proceso de cálculo de la lluvia horizontal que se ofrece en esta ponencia.

El experimento citado contribuyó también a establecer las premisas para la definición del parámetro “a”; en concreto, se ha considerado que en una celda del MHS la cantidad de lluvia horizontal captada al final de la celda es equivalente a la que obtendría la siguiente en condiciones de celda interna de bosque; premisa ésta relativamente conservadora pero que se justifica a partir de los resultados de otras experiencias cuyas descripciones sobrepasarían los límites de este comunicado. Resultó que: “a” = $f(KDVb; KDV)$. En las celdas de borde de bosque el cálculo de la precipitación horizontal respondería pues a la siguiente expresión:

$$PNb(m,n) = (NDHR > 96\% - NDP > 5mm) \times KMN \times KVv \times KVNb \times e^{-(a \times LPN_{media})} \times PNo$$

4.1.5 La estructura del árbol

Varios de los experimentos que se citan a lo largo de esta comunicación se realizaron bajo pinos aislados que, sin obstáculos para su desarrollo horizontal, disponen de un denso ramaje alrededor de casi la totalidad de su tronco. Sin embargo, gran parte del pinar que cubre la cordillera dorsal de la isla - uno de los tres focos potenciales de captación de agua de niebla - se caracteriza por la alta densidad del arbolado; a media altura, la imagen del bosque no es sino un apilamiento vertical de troncos desnudos, desprovistos totalmente de ramaje y, por tanto, de las aciculadas hojas que con tanta facilidad capturan el agua de las nubes. Hay que acudir a bosques más abiertos para encontrar árboles más ramificados y frondosos.

A lo largo de la dorsal se han muestreado distintas familias de pinos, midiendo la altura de cada unidad, así como la del tronco exento de ramaje; en algún caso esta última llegó a ser el 40% de la altura total del árbol. Experiencias similares llevadas a cabo en otros tipos de bosque han confirmado igualmente la existencia de tramos “ineficaces” en la estructura del árbol. Esta circunstancia se ha tenido en cuenta en el proceso de cálculo, previa consideración de la altura de estos tramos, que se ha establecido en función del tipo y de la densidad de la vegetación: $HVT = f(HV; DV)$.

4.2 La pendiente del terreno

Las funciones precedentes se fundamentan en experimentos realizados en parcelas de bosque de superficie horizontal. No es éste el caso de la generalidad de la isla de Tenerife, cuyas laderas se caracterizan precisamente por sus fuertes pendientes.

Referencias tales, como que en los bosques cerrados la lluvia horizontal se produce casi exclusivamente en las partes del árbol que **sobresalen** del conjunto o que los eucaliptos con sus hojas planas de tamaño medio aventajan a los cercanos pinos canarios con sus finas acículas tan efectivas a la hora de conseguir cantidades apreciables de precipitación horizontal, sólo porque **son algunos metros más altos** (Kämmer, 1974) nos llevaron a considerar esta circunstancia en todas sus consecuencias.

Sucede que en un bosque en pendiente no sólo son los árboles de más altura los que sobresalen del conjunto, sino que cada fila de árboles destaca respecto de su hilera anterior tanto más cuanto mayor sea la pendiente del suelo sobre el que se asienta. El tramo de las copas de los árboles que se sobreelevan sobre el conjunto recibe el impacto de la niebla con toda su carga portante intacta, es decir como si se tratara de una parcela de borde de bosque pero limitada en altura a la de la copa de árbol que sobreeleva.

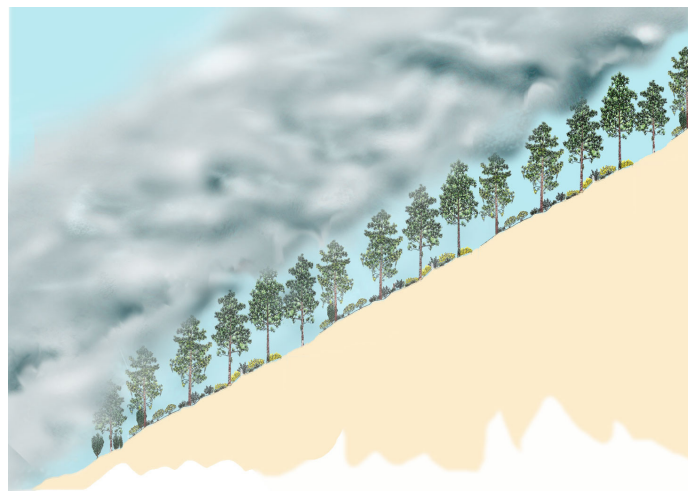


Figura 2 Bosque de pinos

4.2.1 En el interior del bosque

Un bosque interno puede asimilarse, por tanto, a un conjunto de minibosques de borde – tantos como hileras de arbolado – todos ellos de igual altura: $H_d = f(H_{\text{árbol}}; P_{te.})$ y equivalente a la de la copa que sobreeleva o que destaca de cada uno de los árboles que componen una hilera respecto de la hilera anterior. Remitiéndonos al MHS, cada celda (200m x 200m) recibiría una cantidad de lluvia horizontal específica (L/m^2) equivalente a:

$$PN = (NDHR > 96\% - NDP > 5mm) \times KMN \times KVv \times \\ \times (KVdNb \times (DMN \times e^{-(a \times LPN_{media})}) / 200 \times NFdV - \Delta PNT) \times PNo$$

Siendo:

- **KVdNb**: Factor de eficiencia de la vegetación que destaca ($KVMH_d \times KDVB$)
- **DMN**: Recorrido de la niebla dentro de la celda hasta impactar con la superficie del terreno
- **NFdV**: Número de hileras de arbolado existentes en el interior de la celda
- **ΔPNT** : Factor minorante debido a los tramos de tronco exentos de ramaje

4.2.2 En el borde del bosque

En las parcelas de borde de bosque la pendiente del terreno juega el mismo papel que en las celdas internas. La definición de la función de cálculo de la lluvia horizontal en las celdas de borde se plantea, pues, con el mismo fundamento que en las celdas internas, aunque requiere la introducción de ciertos elementos diferenciales que simplemente acentúan su complejidad respecto de aquella.

Ambas funciones, las correspondientes a las celdas internas (apartado precedente) y a las celdas de borde, son el resultado final de una metodología para el cálculo de la precipitación horizontal; de la cual se han mostrado sus fundamentos teóricos y su estructura, aunque simplificada bajo la consideración de una sola especie vegetal en el recinto o celda a estudiar. Realmente, el análisis completo ha contemplado la coexistencia de hasta dos especies en un mismo recinto que, lógicamente, obligan a introducir nuevos parámetros en el procedimiento que, a su vez, redundan en unas funciones más complejas. Además una celda del MHS pueden compartirla recintos de carácter urbano, con recintos de cultivo y a su vez con otros de vegetación.

A partir de la resolución de ambas funciones y una vez fijado el valor del módulo óptimo de captación (PNo), se está en disposición de acometer la evaluación cuantitativa de la lluvia horizontal.

4.4 El módulo óptimo de captación de lluvia horizontal (PNo)

En las pasadas décadas, en aquellas zonas del territorio insular donde se tenía constancia de la presencia de niebla se llevaron a cabo medidas de la precipitación horizontal bajo la cubierta de distintos tipos de vegetación: pino canario, pino radiata, eucaliptos, fayal-brezal, monteverde, ..., a lo largo de periodos incluso de más de un año de duración; se buscaba medir la lluvia “neta” procedente de la captación de agua de niebla. Sólo en algún caso aislado (A.Ritter et al., 2005) se llegó a cuantificar la lluvia total captada estimándose que, del total de agua de niebla atrapada por la vegetación, alrededor del 25% queda retenida en las hojas de los árboles y es devuelta a la atmósfera por evaporación.

Los resultados de estos experimentos han sido también deducidos empíricamente, con una aceptable aproximación, aplicando la metodología hasta aquí expuesta. Operaciones de ajustes y tanteos sucesivos han permitido deducir que bajo un pino canario de 30 metros de altura, en condiciones de máxima eficiencia, se recogerían **50 L/m²/día** de agua de niebla, lo que equivaldría a una captación total de **66,5 L/m²/día**. Se ha adoptado este último como “módulo óptimo de captación de lluvia horizontal”, correspondiente, pues, a un pino canario aislado de 30 metros de altura ubicado en un hipotético lugar donde el potencial climático de captación de agua de niebla sea máximo.

4.5 Cuantificación y distribución territorial de la precipitación horizontal

Con la cuantificación de PNo en cada una de las celdas del MHS se cierra el proceso de cálculo de la lluvia horizontal. Sólo resta solicitar del MHS la definición de este recurso a nivel insular.

4.5.1 Lluvia interceptada y lluvia neta

El MHS de la isla de Tenerife permite obtener información -en cada una de las celdas de modelización consideradas- del conjunto de variables climáticas e hidrológicas que conforman el balance hídrico. La aplicación desarrollada permite, además, componer la información anterior de manera automática, presentando resultados agregados por subcuencas, límites territoriales, ... y por supuesto a nivel insular, así como para diferentes espacios temporales: mes, año y cualquier período supranual. En la actualidad, el agua de niebla captada por la vegetación, deducida al desarrollar en el MHS la metodología descrita en los apartados precedentes, es de **46 L/m²/año**. De éstos:

- 11 L/m²/año se evaporan desde las copas de los árboles (agua de intercepción)
- **35 L/m²/año** es el agua que llega al suelo (lluvia neta)

4.5.2 Distribución territorial de la lluvia horizontal

El mapa de isólinas de precipitación horizontal neta confirma los tres núcleos principales de captación: las cordilleras de Anaga, Central y de Teno. Sin embargo, cuantitativamente, ha variado el orden entre las tres ya que la cumbre de la cordillera Central, colonizada por un denso bosque de pinos, se beneficia de este recurso en cantidades superiores a las que, captadas por el monteverde, reciben las crestas del macizo de Anaga. La cordillera de Teno es el tercer núcleo de captación de agua de niebla, ocupando también esta posición como receptor, a bastante distancia de los dos núcleos citados.

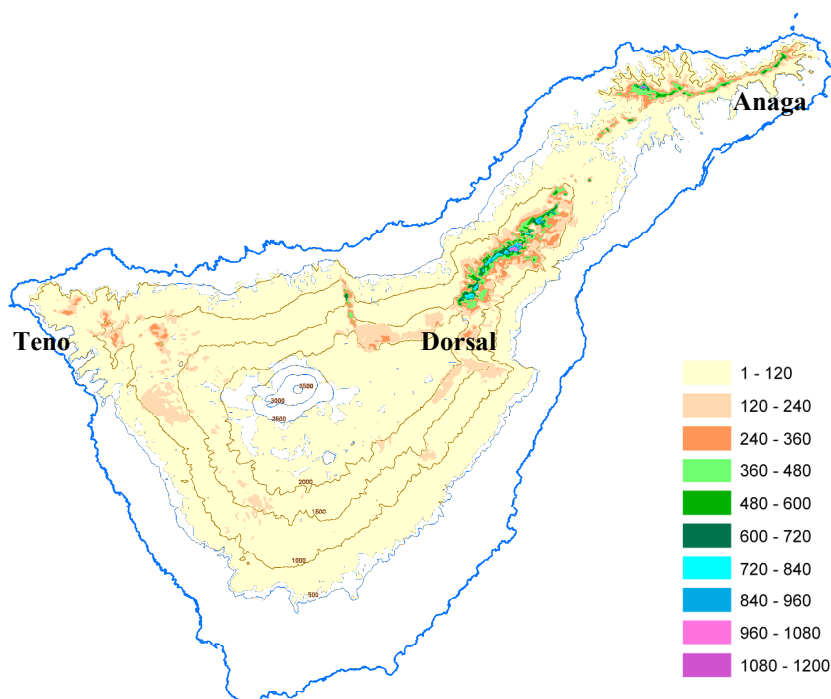


Figura 3 Distribución territorial de la lluvia horizontal neta (L/m2)

Tabla 2 Valores medios de precipitación horizontal neta en las zonas de cresta de las tres cordilleras (L/m²)

	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	TOTAL
ANAGA	100	350	20	15	485
TENO	40	110	15	15	180
DORSAL	150	35	165	300	650

5 Incidencia de la lluvia horizontal en la recarga del sistema acuífero insular

A diferencia de la lluvia convencional (PC = 424 mm), la precipitación horizontal (PN = 46 mm) se reparte regularmente a lo largo de todo el año, aunque es en los meses de estío cuando las zonas más favorecidas reciben los mayores contingentes. Una buena parte de este recurso es atrapada en el suelo para el consumo de una vegetación exuberante que ha vaciado las reservas que le ha proporcionado la lluvia convencional durante los meses de otoño-invierno. Esta circunstancia unida a la gran diferencia existente entre los valores de ambas hace que su participación en la recarga del sistema acuífero insular (**RPN = 15 mm**) sea muy inferior a la de la lluvia convencional (RPC = 155 mm), tanto cuantitativa como porcentualmente.

Tabla 3 Agua de recarga total (RPT = RPC + RPN) procedente de la Precipitación (PT = PC + PN)

PC	PN	PT	RPT	RPC	%RPC/PC	%RPC/PT	RPN	%RPN/PN	%RPN/PT
424	46	470	170	155	37	33	15	33	3

6 Referencias

- Aboal, J. (1998): Los flujos netos hidrológicos y químicos asociados de un bosque de laurisilva en Tenerife. *Tesis doctoral, Universidad de La Laguna. La Laguna*
- Aboal, J.; Jiménez, M.S.; Morales, D.; Gil, P. (2000): Effects of thinning on throughfall in Canary Island pine forest – the role of fog. *Journal of Hydrology*
- Ceballos, L.; Ortuño, F. (1952): El bosque y el Agua en Canarias. *Montes, 48, 418-423. Madrid*
- Ceballos, L.; Ortuño, F. (1976): Vegetación y Flora forestal de las Canarias
- Dorta, P (1996): Las inversiones térmicas en Canarias. *Investigaciones Geográficas, 15, 109-124*
- Font Tullot, I. (1951): El espesor de la capa superficial de aire marítimo en la región de las islas Canarias. *Revista de Geofísica, 40, 281-291*
- Kammer, F. (1974): Klima und Vegetation auf Tenerife besonders im Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Gotinga. Ed. Erich Golize KG.*
- Marzol, M.V.; Sanchez, J. ; Dorta, P.; Valladares, P. (1996): La captación del agua del mar de nubes en Tenerife. Método e instrumental. *Clima y Agua: La gestión de un recurso climático. La Laguna 1996*
- Marzol, M.V. (2002): La recogida de agua de agua de niebla en un parque rural de las Islas Canarias. *Atmospheric Research 64, 239-250*
- Marzol, M.V. (2005): La captación de agua de niebla en la isla de Tenerife. *Caja General de Ahorros; Sta. Cruz de Tenerife*
- Marzol, M.V. (2008): Características temporales y de recogida de agua de niebla durante el verano en Tenerife (Islas canarias, España). *Investigaciones Atmosféricas 87, 352-361*
- Ritter, A.; Regalado, C.M.; Aschan, G.; Gómez, L.A. (2005): Contribución hídrica de la captación de niebla al balance de un bosque de laurisilva en el parque nacional de Garajonay.

Santana, L.M. (1987): Las precipitaciones de niebla en Tenerife. *Simposio Internacional de Recursos Hidráulicos. Canarias Agua 200. Pto de la Cruz. Tenerife*

Schemenauer, R.; Joe, P. (1989): The collection efficiency of massive fog collector. *Atmospheric Research 24, 53-69*

Seijas, J. (1998): Precipitación Horizontal en los Montes Canarios. *V Jornadas Forestales de Gran Canaria*

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*