

UAAH

**EVALUACIÓN MEDIANTE LA MODELIZACIÓN
MATEMÁTICA DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA
PRECIPITACIÓN DE AGUA DE NIEBLA O LLUVIA
HORIZONTAL AL BALANCE HÍDRICO EN LA ISLA
DE TENERIFE, ISLAS CANARIAS.**

Máster Universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos

Presentado por:

D^a MARÍA ELIA GARCÍA-PEÑUELA MELIÁN

Dirigido por:

D. JUAN JOSÉ BRAOJOS RUIZ

Alcalá de Henares, 17 de septiembre de 2019

INDICE

1. Resumen	5
2. Justificación y Objetivos.....	6
3. Introducción.....	7
3.1. Breve Descripción de la Climatología de Las Islas Canarias.....	7
3.2. Lluvia Horizontal, Mar de Nubes y Efecto Föhn.....	7
3.3. Modelo de Hidrología de Superficie de Tenerife.....	9
4. Métodos.....	12
5. Desarrollo.....	13
5.1. Variables Climáticas que Influyen en La Precipitación del Agua de Niebla.....	13
5.1.1. Número de Días con Niebla.....	13
5.1.2. Número de Días con Nubes.....	13
5.1.3. Velocidad del Viento.....	14
5.1.4. El Mar de Nubes.....	14
5.1.5. Nubes de estancamiento y de desbordamiento.....	16
5.1.6. Factor de Eficiencia de Captación Local.....	18
5.2 El potencial de captación del agua de niebla.....	19
5.3. La precipitación natural del agua de niebla.....	20
5.4. Factor de eficiencia de la vegetación.....	20
5.5. Interacción de la niebla según la densidad de la vegetación y su situación en el bosque.....	20
5.6. La pendiente del terreno.....	21
5.7. Procedimiento de cálculo de la precipitación natural del agua de niebla.....	21
5.8 El factor de eficiencia debido a la relación del Bosque-Niebla.....	23
5.9. Funciones de definición de la PAN generada desde la vegetación.....	23
5.10. La precipitación del agua de niebla sobre la roca.....	23
5.11. Funciones para el cálculo de la PAN total.....	24
5.12. La precipitación total del agua de niebla en Tenerife.....	24
5.13. Afección de la precipitación total a la regarga del sistema acuífero insular.....	25
5.14. Calibrado del submodelo y evaluación de PANo.....	25
6. Discusión y conclusiones.....	27
7. Bibliografía.....	28

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de situación de las Islas Canarias.....	7
Figura 2a: La Inversión Térmica limita la cota de formación de las nubes.....	10
Figura 2b: Desbordamiento del mar de nubes (Efecto Foën).....	10
Figura 3: Perfiles esquemáticos de las nubes debidas al Régimen de Alisios	17
Figura 4: Distribución de la PCAN en la Isla de Tenerife (en tanto por uno).....	20
Figura 5: Distribución de la PAN en un bosque unitario de suelo horizontal.....	22

INDICE DE FOTOS

Foto 1: “Nubes de estancamiento conformando el mar de nubes sobre el Valle de La Orotava, Tenerife”	9
Foto 2: “El Mar de Nubes desborda las cumbres de Anaga, Tenerife, y se descuelga por sus laderas meridionales” (Efecto Foën).....	10
Foto 3: Frontales de rocas aisladas recibiendo el impacto de la niebla.....	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos Relativos a las cotas de techo, base y espesor del Mar de Nubes (Braojos, 2015).....	15
Tabla 2: Valores Medios de PAN neta en las zonas de cresta de las tres cordilleras, Tenerife.....	25
Tabla 3: Balance Hídrico Insular Histórico Medio.....	25

ABREVIATURAS:

CAN = Captación del Agua de Niebla.

CIATF = Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

EfCL= Factor de Eficiencia de Captación Local.

HR= Humedad Relativa.

INM = Gradiente de intensidad (densidad) de niebla.

INMD= Intensidad media de niebla debida a las nubes de desbordamiento.

KDV= Factor de Densidad del arbolado en el bosque.

Ke= Factor de corrección en relación a la presencia de nubes de estancamiento.

KHV= Factor de Envergadura de la Vegetación.

KMN= Factor de eficiencia de la niebla relativo al contacto de las Nubes.

KMV= Factor de eficiencia relacionado con la Morfología de la hoja.

KMNAc= Factor de eficiencia debido al contacto de las nubes de Alisios corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento

KMNC= Factor de eficiencia de la niebla relativo al contacto de las nubes corregido.

KMNIc = Factor de eficiencia debido al contacto de Inestabilidad Atmosférica corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento.

KMND= Factor de eficiencia relativo al contacto de las nubes de desbordamiento con el territorio

KMNE= Factor de eficiencia de la niebla relativo al contacto de las nubes de estancamiento con el territorio.

KMV = Factor de eficiencia de la vegetación.

KVv= Factor de eficiencia de la velocidad del viento (en tanto por uno).

MHSup = Modelo de Matemático Distribuido de la Simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife.

MN = Mar de Nubes.

NDHR(>96%) = número de días con humedad relativa superior al 96%.

NDN = número esperado de días con niebla.

NDNA = número de días con nubes debidas al Régimen de Alisios.

NDNI = número de días con nubes debidas a un tiempo de Inestabilidad Atmosférica.

NDPC(>5mm)= número de días en los que la lluvia convencional ha sido superior a 5 mm.

PAN = Precipitación del Agua de Niebla.

PAN_o= volumen óptimo de precipitación específica diaria de agua de niebla.

PAN_{pi}= Precipitación del agua de niebla en parcelas internas.

PAN_{pb}= Precipitación del Agua de Niebla en parcelas de borde.

PAN_{pb}= precipitación de Agua de Niebla sobre una celda de “borde” de bosque (L = 200m).

PAN_{pi}= Precipitación de Agua de Niebla sobre una celda de “interna” de bosque.

PAN_{ph}=Precipitación del Agua de Niebla debida a la primera hilera del bosque.

PAN₂₀₀= Precipitación de Agua de Niebla a 200 metros del frente del bosque.

PNO= el módulo óptimo diario de precipitación de agua de niebla

PHI= Plan Hidrológico Insular.

PHR= Precipitación Horizontal sobre la Roca.

PHR_o= volumen óptimo de Precipitación Horizontal sobre la Roca

PHT=Plan Hidrológico de Tenerife.

PTAN= Precipitación del Agua de Niebla Total.

V_v= Velocidad del viento.

Z= cota de la celda.

Z_c = cota de cresta de cumbre alineada en vertical con la celda estudiada.

1. RESUMEN

La Precipitación del Agua de Niebla o *Lluvia Horizontal*, es consecuencia del Régimen de Alisios, cuyos vientos en dirección NE, traen nubes cargadas de humedad. En determinadas condiciones, esta humedad se deposita sobre la roca y las hojas de los árboles, condensada y transformada en pequeñas gotas de agua, las cuales, al soplar el viento, se trasladan desde la hoja hasta el terreno, dando lugar a este tipo de precipitación que interviene en el Balance Hídrico.

Ante la carencia de una red que mida la precipitación del agua de niebla y dada la complejidad del fenómeno, se implementó en el Modelo Matemático Distribuido de la Simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife, que discretiza La Isla en 51.645 celdas, una metodología para su evaluación empírica de cuya descripción damos cuenta en este trabajo.

Esta metodología tiene en cuenta determinadas variables climáticas que influyen en la Precipitación del Agua de Niebla, tales como el número de días con niebla, el número de días con nubes, la velocidad del viento, las características y cotas a las que se encuentra el mar de nubes, los tipos de nubes (ya sean de estancamiento o desbordamiento, y define un factor de eficiencia de captación local que las agrupa. El modelo define y estudia también otros factores de eficiencia tales como el de vegetación, interacción de niebla con la vegetación y el bosque y la pendiente del terreno, entre otros. A partir de los cálculos puede establecerse un potencial de captación del agua de niebla y se puede hallar la precipitación total del Agua de Niebla en cada celda, encontrando la precipitación total del agua de niebla en La Isla.

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El objeto de este trabajo es la exposición de una metodología que permite evaluar cuantitativa y distributivamente el aporte de la Precipitación del Agua de Niebla (PAN) o Lluvia Horizontal, tanto debido a su captación natural condicionada por la vegetación, como a la captada por la propia roca, al Balance Hídrico en las Islas Canarias, concretamente en la Isla de Tenerife.

En los primeros intentos de evaluación, la PAN participaba en el Balance Hídrico de forma indirecta, de modo que a la Capacidad de Reserva Hídrica del Suelo para el Consumo de la Vegetación se le restaba una estimación de su aportación.

Ante la imposibilidad material de medir el aporte de la PAN de forma directa, se implementó en el Modelo de Simulación de Hidrología Superficial (MHSup) de Tenerife, del Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF), una metodología para su evaluación empírica. De su exposición y discusión es objeto el presente trabajo.

Esta metodología tiene en cuenta determinadas variables climáticas que influyen en la Precipitación del Agua de Niebla, tales como el número de días con niebla, el número de días con nubes, la velocidad del viento, las características y cotas a las que se encuentra el mar de nubes, los tipos de nubes ya sean de estancamiento o desbordamiento, y define un factor de eficiencia de captación local que las agrupa. El modelo define y estudia también otros factores de eficiencia tales como el de vegetación, interacción de niebla con la vegetación y el bosque y la pendiente del terreno, entre otros. A partir de los cálculos puede establecerse un potencial de captación del agua de niebla y se puede hallar la precipitación total del Agua de Niebla en cada celda, encontrando la precipitación total del agua de niebla en La Isla.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA CLIMATOLOGÍA DE LAS ISLAS CANARIAS.

Por su posición (27/28° latitud N y situadas en la fachada oriental del Océano Atlántico, muy cercanas a la costa noroccidental del continente africano), las Islas Canarias deberían tener, climatológicamente, los rasgos propios característicos de un clima desértico (con cierta sequedad y aridez), como corresponde a otros territorios vecinos del continente africano. Pero ciertos factores dinámicos y geográficos modifican esta regla.

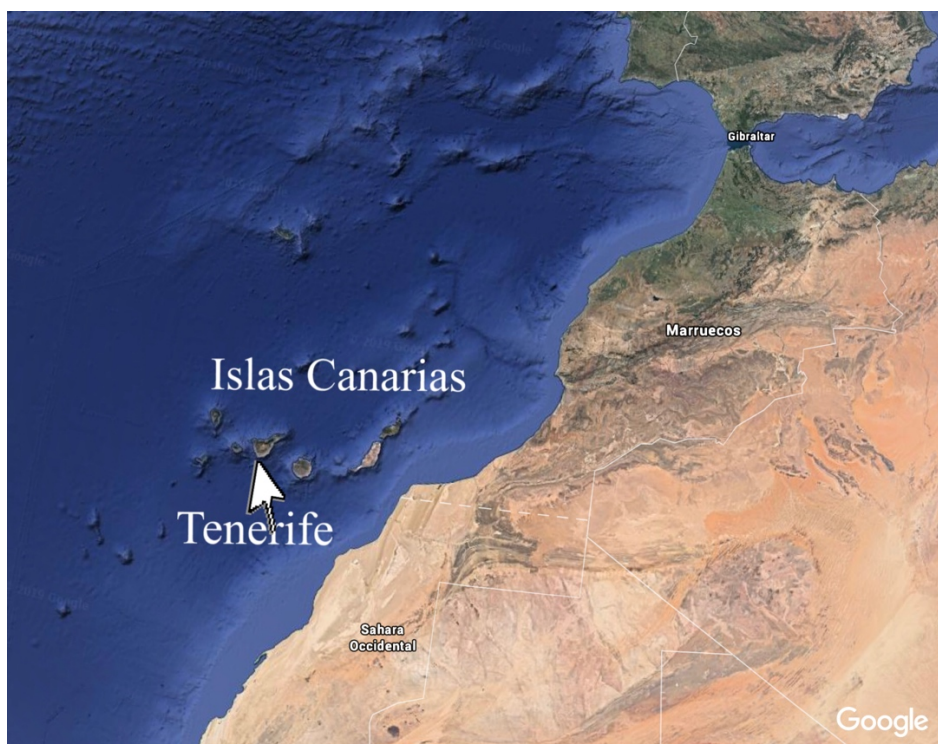


Figura 1: Mapa de situación de las Islas Canarias. F
Fuente: Google Earth.

De los primeros, destacamos la circulación del Oeste en las capas medias de la troposfera (por encima de los 2.000 m de altitud), los centros de presión, las masas de aire (polares y saharianas) que llegan al Archipiélago, El Anticiclón Atlántico, Los Vientos Alisios y La Inversión Térmica.

En cuanto a los segundos, tiene gran influencia La Corriente Fría de Canarias, la orografía y la proximidad al continente africano.

Todos estos factores nos permiten esquematizar el clima de Canarias con tres tipos principales de tiempo: *El Régimen de Alisios*, *La Inestabilidad Atmosférica*, producida por

la entrada de masas polares, y *Las Advecciones de Aire Sahariano*, producidas por masas de aire caliente llegado del Sáhara.

3.2. LLUVIA HORIZONTAL, MAR DE NUBES Y EFECTO FÖEN.

La Precipitación del Agua de Niebla (PAN), más conocida comúnmente como *Lluvia Horizontal*, es consecuencia del Régimen de Alisios que reciben Las Islas Canarias durante gran parte del año. Con dirección NE, estos vientos, que llegan cargados de humedad, empujan estratocúmulos que ascienden por las laderas norteñas de las islas de mayor altitud (Tenerife y La Palma, principalmente, aunque también, en menor medida, La Gomera, Gran Canaria y El Hierro). Esta nubosidad, que se produce a una altitud entre, aproximadamente 1.000 y 1.800 m, en su ascenso, enfría el aire a sotavento de la orografía, a razón de 0,5 °C por cada 100 m de altitud. Cuando hay advecciones de aire sahariano, estas cotas son sensiblemente menores, afectando solo a la zona de medianías, entre los 600 y 900 m de altitud.

Así, estas nubes, cargadas de humedad y enfriadas por el ascenso, depositan sobre las hojas de los árboles toda esta humedad, condensada y transformada en pequeñas gotas de agua, las cuales, al soplar el viento, se trasladan desde la hoja hasta el terreno, formando lo que conocemos como *Lluvia Horizontal*. Toda este agua va percolando en el suelo poco a poco. La cantidad de agua aportada por la lluvia horizontal va a depender, entre otros factores, de la fuerza del viento, el espesor o la densidad de la niebla, de la pendiente del terreno y del tipo de vegetación con la que tropiece la niebla. A mayor velocidad del viento y a mayor espesor de niebla, mayor cantidad de agua irá a parar al terreno. En cuanto a la vegetación, los árboles con hojas aciculadas, como el pino, son los que más facilitan la lluvia horizontal.

Si, además, por encima de las cotas de Vientos Alisios tenemos el Anticiclón de las Azores entonces éste presiona fuertemente la capa superior de las nubes, impidiendo su ascenso natural y se forma el llamado Mar de Nubes, por su parecido, al ser visto desde cotas superiores a un mar blanco lleno de espuma. Evidentemente, al no poder continuar las nubes en su camino ascendente, este mar queda estancado, afectando a cotas por debajo de los 1.000 - 1.500 m de altitud. El beneficio de esta situación en zonas de medianía es verdaderamente notorio, pero por encima de dichas cotas se produce una Inversión Térmica, es decir, que el natural enfriamiento de 0,5 °C/100 m deja de funcionar y ocurre que, en lugar de frío, nos encontramos con un cielo completamente despejado y calor. Paisajísticamente

resulta de gran belleza, aunque su parte negativa es que las zonas de mayor altitud reciben un aporte mucho menor de humedad.

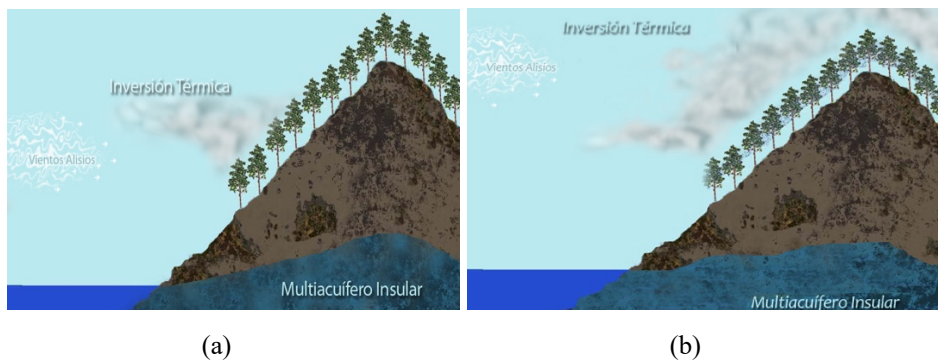


Foto 1. Nubes de estancamiento conformando el mar de nubes sobre el Valle de La Orotava, Tenerife

Fuente: Juan José Braojos Corrales.

La situación de Inversión Térmica es la razón por la que haya un calor atípico, a una altitud mayor, concretamente en el área del Teide, en Tenerife; mientras que, si está funcionando la situación de Inestabilidad Atmosférica, el Teide se carga de nieve.

Continuando con los Vientos Alisios, que empujan las nubes hacia la orografía de las islas, hay que repetir que éstos ascienden por el lado norte de la orografía, es decir, a barlovento en el caso de Las Islas debido a su orientación. Todo este aire frío ascendente, al llegar a las cumbres situadas a determinadas cotas, se desborda hacia sotavento (en este caso ladera sur), donde existe un aire mucho más cálido, de modo que el mar de nubes cae, visualmente en forma de cascada o catarata. En este momento tiene lugar la expansión adiabática, donde este aire frío se torna más cálido debido a la expansión del volumen de las nubes. Así, el aire cálido de la ladera Sur, atrae el descenso rápido del mar de nubes, produciéndose el denominado Efecto Föhn. Un claro ejemplo lo tenemos en el Macizo de Anaga en Tenerife, donde su ladera, a pesar de estar expuesta al S-SE recibe un aporte hídrico mayor que si no existiera este desborde del mar de nubes o Efecto Föhn.



(a) (b)
 Figura 2a: La Inversión Térmica limita la cota de formación de las nubes.
 Figura 2b: Desbordamiento del mar de nubes (Efecto Foën).
 Fuente: Juan José Braojos Ruiz.

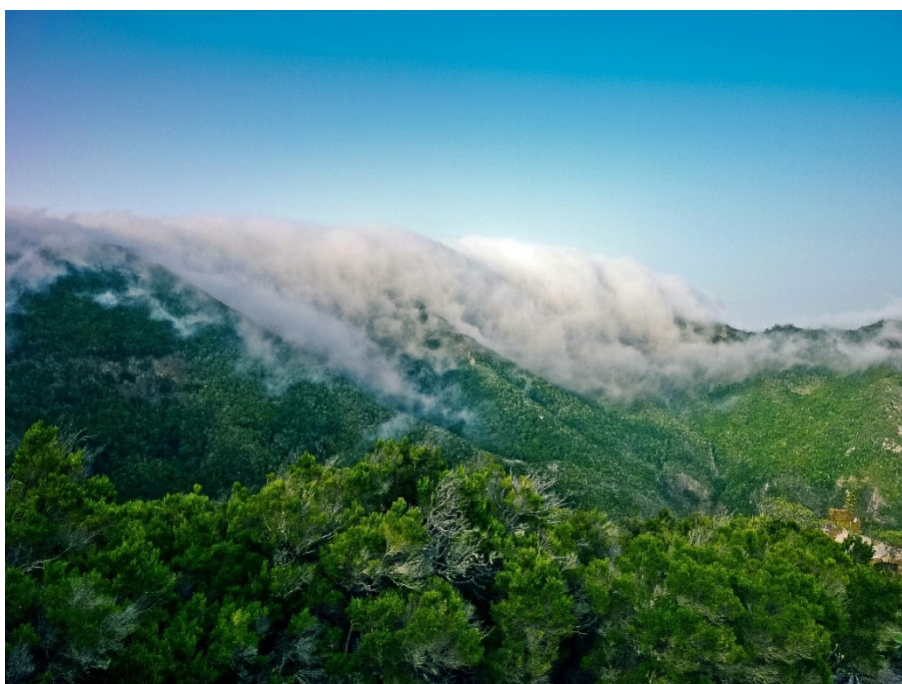


Foto 2. El Mar de Nubes desborda las cumbres de Anaga (Tenerife) y se descuelga por sus laderas meridionales (Efecto Foën)
 Fuente: Juan José Braojos Corrales

3.3. MODELO DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE DE TENERIFE.

.El Consejo Insular de Aguas de Tenerife dispone de un programa informático para la simulación y caracterización de la Hidrología Insular, este es el Modelo Matemático Distribuido de la Simulación de la Hidrología de Superficial de Tenerife conocido bajo el acrónimo “MHSup”. Este modelo discretiza La Isla en 51645 celdas de 200 m x 200 m. A grandes rasgos, el programa está integrado por los siguientes módulos:

- a) Gestor de Datos Hidrológicos Básicos de Tenerife; en el que se almacena la información climática
- b) Gestor de Modelos Climáticos: que usa la información del gestor de datos para asignar a cada celda el número de días con humedad relativa superior a un determinado valor, velocidad del viento en días húmedos y el número de días que superan un determinado registro de precipitación convencional, entre otros datos.
- c) Caracterizador de parámetros: que calcula y asigna automáticamente a cada celda los diferentes parámetros de modelización, para ello se vale de la información original e incorporada de un conjunto de mapas temáticos que caracterizan distintos aspectos del territorio: Geología, Edafología y usos de suelo, cultivos, vegetación, etc
- d) Visualizador de resultados: Permite representar mapas, obtener representaciones gráficas de la evolución temporal o estacional de las variables, obtener listados relativos a resultados de modelización, etc

En la resolución del Balance Hídrico los datos introducidos en las celdas relativos a la precipitación convencional son los que se deducen a partir de los registrados en la red pluviométrica insular. Sin embargo, no se dispone de una red que mida la precipitación del agua de niebla que llega hasta el suelo desde el arbolado; además, dada la complejidad del fenómeno hace que sea impensable disponer de dicha información. Ante la imposibilidad material de medir este recurso de forma directa, se ha implementó en el MHSup una metodología para su evaluación empírica.

4. MÉTODOS.

Este trabajo es fruto de las numerosas entrevistas que he tenido con mi tutor, Juan José Braojos Ruiz, y de la bibliografía que me ha facilitado. Experto en Hidrología Superficial de La Isla de Tenerife, tiene una dilatada experiencia desde que se incorporara al equipo técnico del Proyecto Canarias SPA-15, en 1972. Braojos Ruiz, ha desarrollado su actividad profesional en el Servicio Geológico de Obras Públicas, El Servicio Hidráulico Provincial de Santa Cruz de Tenerife y el Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Además ha sido Coautor y colaborador directo de Proyecto Canarias SPA-15 (1973-1975), Proyecto MAC-21 (1978-1983), Plan de Balsas del Norte de Tenerife (1980), Programa de Reutilización de Aguas Residuales Depuradas de Tenerife (1984), Proyecto Canarias Agua-2000 (1985-1987), Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHITF; 1988-1995) y Avances de los Planes Hidrológicos Insulares (PHI) de El Hierro, La Gomera, y La Palma, Plan de Defensa Frente a Avenidas de Tenerife (PDA; 2007-2010) y el nuevo Plan Hidrológico de Tenerife (PHT, 2007-2014). Es, además, autor del libro “La nube, el pino y la otra lluvia” (2015), en el que expone la metodología para evaluar el potencial de captación del agua de niebla y su aprovechamiento natural o artificial. Recientemente ha publicado el libro “100 Años de la Hidrología Superficial en Tenerife y su Simulación a través de un Modelo Matemático Distribuido” (2019). Actualmente es Profesor del Máster Propio de La Universidad de La Laguna de Gestión del Agua.

Juan José Braojos Ruiz construyó un Modelo Matemático de Simulación del proceso de generación de la Lluvia horizontal que se implementó en el Modelo de Simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife que también es de su autoría.

La mayor parte de la bibliografía consultada ha sido facilitada por mi tutor. Algunas referencias las he consultado en la Biblioteca de La Universidad de La Laguna y otras pertenecen a mi fondo personal.

5. DESARROLLO Y RESULTADOS.

5.1.VARIABLES CLIMÁTICAS QUE INFLUYEN EN LA PRECIPITACIÓN DEL AGUA DE NIEBLA.

5.1.1. NÚMERO DE DÍAS CON NIEBLA.

La presencia de niebla se asocia en La Isla con determinados umbrales de humedad relativa y de lluvia convencional. Tomando como base las investigaciones de algunos autores (Valladares, 1995; Marzol, 2003; Marzol, 2008) y teniendo en cuenta el estudio de las bandas de los termohigrómetros, se establece una fórmula empírica que permite calcular el número de días en los que se espera que haya niebla en un área determinada del territorio.

Así, el número teórico de días en los que hay niebla (NDN) se calcula en cada celda, en las que el MHSup de Tenerife divide el territorio, mediante la siguiente expresión:

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

donde:

NDN = número esperado de días con niebla.

NDHR(>96%) = número de días con humedad relativa superior al 96%.

NDPC(>5mm)= número de días en los que la lluvia convencional ha sido superior a 5 mm.

5.1.2. NÚMERO DE DÍAS CON NUBES.

Las nubes potenciales de originar la PAN, pueden estar asociadas a un tiempo de Inestabilidad Atmosférica o al Régimen de Alisios, en uno y otro caso calculamos el número de días en el que aparecen en cada celda, usando las siguientes ecuaciones empíricas.

En el caso de nubes asociadas al Régimen de Alisios:

$$\text{NDNA} = \text{NDHR}(>96\%) - \text{NDPC}(> 5 \text{ mm})$$

donde:

NDNA = número de días con nubes debidas al Régimen de Alisios.

NDHR(>96%) = número de días con humedad relativa superior al 96%.

NDPC(>5mm) = número de días en los que la lluvia convencional ha sido superior a 5 mm.

En el caso de tiempo de Inestabilidad atmosférica, se usa la siguiente expresión:

$$\text{NDNI} = \text{NDPC}(> 5 \text{ mm})$$

siendo:

NDNI = número de días con nubes debidas a un tiempo de Inestabilidad Atmosférica.

NDPC(>5mm)= número de días en los que la lluvia convencional ha sido superior a 5 mm.

5.1.3. VELOCIDAD DEL VIENTO.

La presencia de viento es un factor fundamental en la PAN. Algunos autores (Schemenauer (1989), Marzol (2003)) han relacionado la velocidad del viento (V_v) con la cantidad de precipitación de agua de niebla captada. Los resultados experimentales obtenidos por estos autores (Schemenauer (1989)), permiten definir un nuevo factor de eficiencia en la captación del agua de niebla que es función de la velocidad del viento en los días húmedos:

$$KV_v = f(V_v \text{ con } HR > 96\%).$$

donde:

KV_v = Factor de eficiencia de la velocidad del viento (en tanto por uno).

V_v = Velocidad del viento.

HR = Humedad relativa.

Los valores más altos (KV_v próximos o iguales a 1) se alcanzarían con velocidades de viento de alrededor de 10 m/s (36 km/h).

5.1.4. EL MAR DE NUBES.

El posicionamiento y espesor del manto de nubes varía sensiblemente a lo largo del año, del mes y del día. Se conocen con detalle datos estadísticos relativos a la ubicación media del techo de mar de nubes así como de su espesor en todos los meses del año. Algunos investigadores determinaron la altura del mar de nubes en distintos periodos:

- Periodo 1922-1994: Ceballos y Ortuño (1976), ambos Ingenieros de Montes, determinaron la altura media del techo del Mar de Nubes a partir de mediciones realizadas durante dicho periodo en el Observatorio de Izaña.

- Periodo 1939-1950: en este periodo, Font Tullot (meteorólogo) realizó distintas observaciones, determinando la altura del mar de nubes en todos los meses del año. Durante el mismo periodo García-Prieto, meteorólogo y Director del Centro meteorológico Territorial de Canarias Occidental, realizó un estudio que arrojaba resultados semejantes a los de Font Tullot. Durante los años 70, el geógrafo Huetz de Lempz analiza de nuevo los datos adquiridos por Font Tullot y realiza una serie de correcciones de acuerdo con sus propios criterios.
- Periodo 1922-1970: usando los resultados obtenidos por los otros autores durante los periodos anteriores, se realiza la media ponderada relativa a cada mes del año en relación al techo del mar de nubes para este.
- Periodo 1983-1992: a partir de los sondeos aerológicos realizados durante este periodo, Dorta determina la altura tanto de la base del mar de nubes, como de la cima de inversión térmica.

Es a partir de esta información de la que se deduce, mes a mes, las cotas máxima y mínima que alcanza el techo y la base del Mar de Nubes (MN) que se genera en Régimen Vientos Alisios.

Tabla 1: Datos Relativos a las cotas de techo, base y espesor del Mar de Nubes (Braojos, 2015).

VERTIENTE NORTE		jul-ago	jun-sep	abr-may	ene-feb	mar-oct	nov-dic
COTA DEL TECHO	MAXIMA	1.800	2.050	2.350	2.450	2.500	2.550
	MÍNIMA	650	750	850	900	900	900
COTA DE LA BASE	MAXIMA	1.050	1225	1.500	1.550	1.550	1.550
	MÍNIMA	350	425	450	500	500	500
ESPESOR	MAXIMO	750	825	850	900	950	975
	MÍNIMO	300	325	375	400	400	400
VERTIENTE SUR		jul-ago	jun-sep	abr-may	ene-feb	mar-oct	nov-dic
COTA DEL TECHO	MAXIMA	1.850	2.100	2.400	2.500	2.525	2.550
	MÍNIMA	850	950	1.050	1.125	1.150	1.150
COTA DE LA BASE	MAXIMA	1.300	1.450	1.725	1.750	1.750	1.775
	MÍNIMA	550	650	750	800	800	800
ESPESOR	MAXIMO	600	625	700	725	750	750
	MÍNIMO	300	300	300	325	350	350

También se tiene en cuenta que la densidad de niebla en la nube no es uniforme; es alrededor de los 2/3 de la altura de la nube donde se concentra la mayor densidad de humedad (Marzol, 2008).

Así se obtuvieron de forma esquemática los 365 perfiles posibles, que el manto de nubes adquiere a lo largo del año, teniendo en cuenta su posición en altura, su espesor y su gradiente de intensidad (densidad) de Niebla (INM). Estos perfiles fueron agrupados por meses.

En cada perfil se deduce, mediante un factor de eficiencia, el grado de afección de la niebla en cada punto de territorio, éste se define por su cota:

$$KMN = f(INM) = f(Z).$$

donde:

KMN= Factor de eficiencia de la niebla relativo al contacto de las nubes.

INM= Gradiente de intensidad (densidad) de niebla.

Z= cota de la celda.

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.

5.1.5 NUBES DE DESBORDAMIENTO Y NUBES DE ESTANCAMIENTO.

En determinados lugares de Las Islas, en los que la cota superior de las Dorsales es mayor que la del techo de Régimen de Alisios, a pesar de que se forma el mar de nubes, no se puede producir el efecto Foën y entonces las nubes no pueden caer en cascada hacia la vertiente de sotavento. Así, aunque la nubosidad sea abundante y los vientos sean regulares y tengan una velocidad óptima para la Captación de Agua de Niebla, la cantidad de agua recogida, es muy baja.

Este es el motivo por el que al modelizar el aporte de la PAN en el MHSup hubo que deducir por separado el factor de eficiencia de la niebla relativo al contacto de las nubes (KMN) de las nubes de «desbordamiento» ($KMND \equiv f(INMD)$) del KMN de las de «estancamiento» ($KMNE \equiv f(INME)$).

Siendo:

IMND= Intensidad media de niebla debida a las nubes de desbordamiento.

INME= Intensidad media de niebla debida a las nubes de estancamiento.

Se comprueba que tanto el área de territorio afectada por las nubes de desbordamiento, como el cociente $IMND/INM$, está relacionado con la cota de cresta de cumbre alineada en vertical con la celda estudiada (Z_c) y la cota de la celda estudiada (Z)

A pesar de esto, en el modelo no se descarta la aportación potencial de las nubes de estancamiento, a las que se les asigna un factor de participación (K_e) cuyo valor, se deduce dentro del proceso de calibración, aunque es muy bajo.

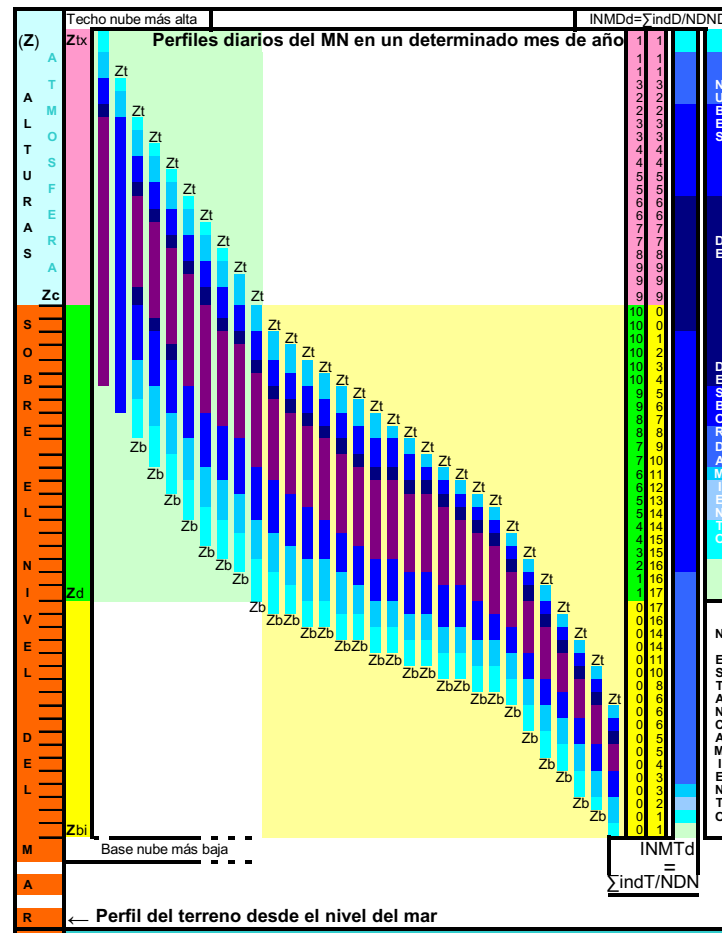


Figura 3: Perfiles esquemáticos de las nubes de Alisios: de desbordamiento o de estancamiento

El nuevo factor de eficiencia corregido (KMN_c), es tiene en cuenta los dos tipos de nubes (de desbordamiento y de estancamiento).

$$KMNA_c = f(Z) \cdot ((K_e + (f(Z_c) \cdot (Z - Z_c) + 1) \cdot (1 - K_e))$$

$$KMNI_c = f'(Z) \times ((K_e + (f(Z_c) \times (Z - Z_c) + 1) \times (1 - K_e))$$

donde:

$KMNAc$ = Factor de eficiencia debido al contacto de las nubes de Alisios corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento.

$KMNIc$ = Factor de eficiencia debido al contacto de Inestabilidad Atmosférica corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento.

5.1.6. FACTOR DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN LOCAL.

El Factor de Eficiencia de Captación Local ($EfCL$) debido al número de días/mes con presencia de nubes en el lugar de captación, al grado de afección de éstas y a la climatología del entorno, agrega todas las variables climáticas que hemos descrito.

El Volumen de Captación del Agua de Niebla de las nubes del Régimen de Alisios ($CANA$) (mm/año) viene dado por la expresión:

$$CANA = (NDHR(>96\%) - NDPC(>5mm)) \cdot KVv \cdot KMNAc \cdot CANo$$

donde aparece una nueva variable; el volumen óptimo diario de Captación del Agua de Niebla ($CANo$).

Por otro lado, el volumen específico de agua de niebla susceptible de ser captado para las nubes de inestabilidad atmosférica ($CANI$), se calcula del siguiente modo:

$$CANI = (NDPC>5mm) \cdot KVv \cdot KMNIc \cdot CANo(\text{mm/día})$$

Así, la captación total de agua de niebla (CAN) se evaluaría a partir de:

$$CAN = CANA + CANI =$$

$$= ((NDHR>96\% - NDPC>5mm) \cdot KMNAc + NDPC>5mm \cdot KMNIc) \cdot KVv$$

$\cdot CANo$

que, finalmente, también puede expresarse como: $CAN = EfCL \cdot CANo$

Por tanto; el Factor de Eficiencia de Captación Local, viene dado por la siguiente ecuación:

$$EfCL = ((NDHR>96\% - NDPC>5mm) \cdot KMNAc + NDPC>5mm \cdot KMNIc)$$

$\cdot KVv$

5.2. EL POTENCIAL DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE NIEBLA.

El Potencial de Captación del Agua de Niebla (PCAN) se puede calcular mediante la expresión:

$$PCAN = \frac{((NDHR(>96\%)-NDPC(>5mm)) \cdot KMNAc + NDPC (>5 mm) \cdot KMNIc) \cdot KVv}{365}$$

donde:

KMNc = Factor de afección de las nubes derivado del contacto directo de estas con el territorio

KMNAc= Factor de eficiencia debido al contacto de las nubes de Alisios corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento

KMNIc= Factor de eficiencia debido al contacto de Inestabilidad Atmosférica corregido teniendo en cuenta las nubes de desbordamiento y de estancamiento.

Teniendo en cuenta esta ecuación, en condiciones ideales de captación del agua de niebla el PCAN tomaría un valor de 1. Estas condiciones ideales estarían marcadas por la presencia de nubes los 365 días del año, independientemente de cómo se hayan originado; densidad máxima de niebla en las nubes de desbordamiento y, por último, una velocidad del viento de aproximadamente 10 m/s todos los días del año.

En la Isla de Tenerife PCAN medio más alto tiene un valor de 0.250 y se localiza en las cumbres de Anaga, al Este de La Isla. En la Dorsal Este, toma un valor de 0.180 y en la zona de cumbres del Macizo de Tenos toma un valor de 0.150. La captación de agua de niebla se produce sobre todo en los meses de verano y primavera; alcanzando puntualmente un valor de 0.615 en las zonas inmediatas a la cumbre en el Macizo de Anaga, mientras que en la Cordillera Dorsal la captación está más repartida.

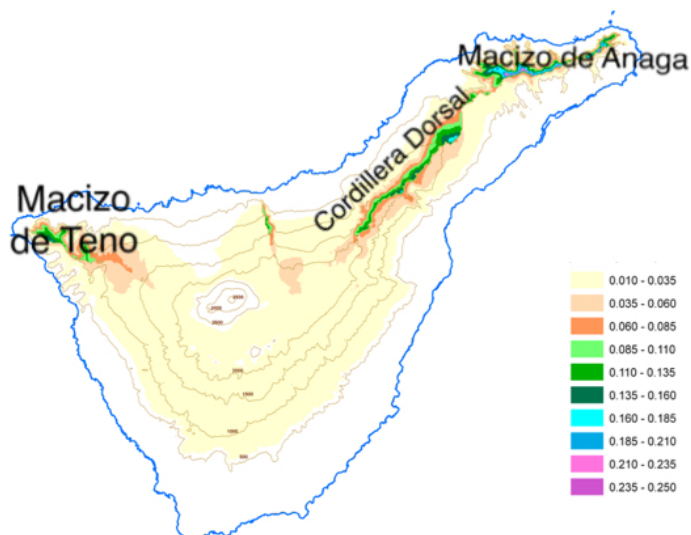


Figura 4. Distribución PCAN en la Isla de Tenerife (en tanto por uno)

Fuente: Juan José Braojos Ruiz

5.3. LA PRECIPITACIÓN NATURAL DEL AGUA DE NIEBLA.

La Precipitación Natural de Agua de Niebla se origina con la captación del agua a las nubes por parte de la vegetación y de la roca de cobertera del terreno.

5.4. FACTOR DE EFICIENCIA DE LA VEGETACIÓN.

En relación con la vegetación, el cálculo de la PAN está determinado por un nuevo factor de eficiencia de vegetación (KVN), que depende de la morfología de la hoja, envergadura de la vegetación y la densidad del arbolado (Kämmer, (1974); Santana, (1987)):

$$KVN = KMV \cdot KHV \cdot KDV$$

donde:

KMV= Factor de eficiencia relacionado con la Morfología de la hoja.

KHV= Factor de Envergadura de la vegetación.

KDV= Factor de Densidad del arbolado en el bosque.

5.5. INTERACCIÓN DE LA NIEBLA SEGÚN LA DENSIDAD DE LA VEGETACIÓN Y SU SITUACIÓN EN EL BOSQUE.

La interacción de la niebla con el arbolado es distinta según la cantidad de árboles que intercepte y según su situación en el bosque. Así, en la hilera de árboles del frente del bosque con una densidad de vegetación del 90 %, supone una máxima eficiencia de captación (0.79); mientras que en el interior del bosque la máxima eficiencia que se puede alcanzar (0.31) se obtiene para una densidad de vegetación del 42%.

Además, se establece una zona de transición entre las primeras hileras de arbolado y la zona del interior del bosque, denominada “parcela de borde de bosque”. A partir de ella, la densidad de niebla alcanzará un determinado valor (dependiendo del tipo de bosque) que permanecerá aproximadamente constante en el interior del bosque.

5.6. LA PENDIENTE DEL TERRENO

La pendiente del terreno también influye en la capacidad de captación del arbolado según se trate de la parcela de borde de bosque o del interior.

5.7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN NATURAL DEL AGUA DE NIEBLA.

La función de evaluación de la precipitación del agua de niebla se basa en distintos análisis realizados en distintas circunstancias simuladas.

En primer lugar, se estudió la interacción entre las nubes y la primera hilera de arbolado de un bosque de una sola especie vegetal y situado en un suelo horizontal. Luego se estudió lo que ocurría en la zona interna de este bosque sin tener en cuenta la franja de borde y, posteriormente, se hizo el mismo estudio en la parcela de borde de bosque.

Una vez hecho ese primer análisis se estudió lo que ocurriría en un bosque situado sobre un suelo inclinado y con una sola especie. Por último, se realizó el mismo estudio en bosques en lo que existían teóricamente, dos especies.

En función de los experimentos realizados por Kämmer (Kämmer, 1974) en la parcela de borde de bosque con una sola especie, sobre suelo horizontal se ha comprobado que la PAN disminuye, a partir de la primera hilera de arbolado, conforme a la siguiente expresión:

$$PAN_L = PAN_{ph} \times e^{-\alpha \times L}$$

siendo:

PAN_{ph} = Precipitación del Agua de Niebla debida a la primera hilera del bosque.

α = factor de reducción de agua precipitada. Se relaciona con los factores de densidad de vegetación relativos a la primera hilera de árboles y a las parcelas situadas en el interior del bosque.

L = distancia de cálculo a partir de la primera hilera de bosque.

Esta expresión determina que a partir del frente del bosque el contenido hídrico del flujo de niebla disminuye progresivamente hasta que se agota. Sin embargo, el modelo de evaluación de la PAN contempla, después de que el flujo de niebla haya recorrido 200 m, en fase de *agotamiento*, la existencia un flujo residual de niebla de contenido constante que conservará hasta el final.

De tales consideraciones fueron surgiendo las funciones relativas a varias localizaciones de bosque.

Precipitación de Agua de Niebla desde la primera hilera de arbolado:

$$PAN_{ph} = EfCL \cdot KVN_{ph} \cdot PNo$$

Precipitación de Agua de Niebla a 200 metros del frente del bosque:

$$PAN_{200} = EfCL \cdot KVN_{ph} \cdot e^{-\alpha \cdot 200} \cdot PNo$$

Precipitación de Agua de Niebla sobre una celda de “borde” de bosque (L = 200m)

$$PAN_{pb} = (EfCL \cdot KVN_{ph} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot 200}) / (200 \cdot \alpha)) \cdot PNo$$

Precipitación de Agua de Niebla sobre una celda de “interna” de bosque

$$PAN_{pi} = EfCL \cdot KVN \cdot PNo$$

siendo, PNo el módulo óptimo diario de precipitación de agua de niebla

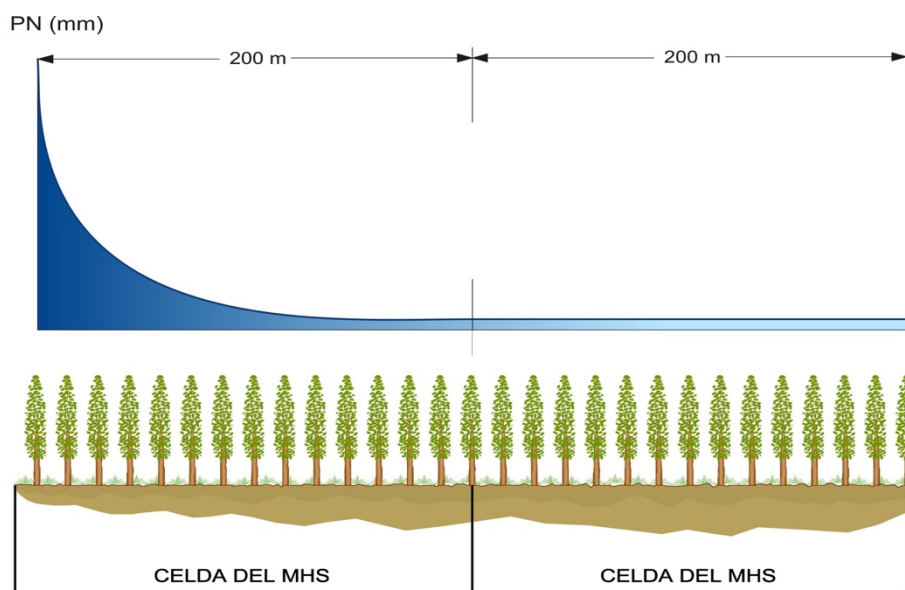


Figura 5: Distribución de la PAN en un bosque unitario de suelo horizontal.

Fuente: Juan José Braojos Ruiz

En los bosques que se asientan sobre un suelo inclinado, las copas de los árboles, que destacan debido a la pendiente del terreno, interactúan directamente con la niebla, incrementando la CAN y la PAN.

5.8. EL FACTOR DE EFICIENCIA DEBIDO A LA RELACIÓN DEL BOSQUE-NIEBLA

Se define un nuevo factor de eficiencia debido a la relación del Bosque con la Niebla (KBN) en relación a las características de la vegetación del bosque en relación con la pendiente del terreno. Dicho factor se puede calcular para una parcela interna en la que haya dos especies vegetales distintas y para una parcela de borde, siendo más compleja la expresión en este último caso (Braojos, 2015).

5.9 FUNCIONES DE DEFINICIÓN DE LA PAN GENERADA DESDE LA VEGETACIÓN

Las funciones de evaluación de la PAN se definen asociando el factor de eficiencia de Captación Local (EfCL) y el factor debido a la relación del bosque-niebla (KBN) y a un volumen óptimo de precipitación específica diaria de agua de niebla (PANo)

Así tenemos que:

en parcelas **internas**: $PAN_{pi} = EfCL \times KBN(pi) \times PANo$

en parcelas de **borde**: $PAN_{pb} = EfCL \times KBN(pb) \times PANo$

Para evaluar la PAN en bosques con tres o más especies habría que ampliar las funciones con nuevos bloques que muestren las consecuencias del tránsito de la niebla a su través.

5.10. LA PRECIPITACIÓN DE AGUA DE NIEBLA SOBRE LA ROCA.

El suelo de cobertera y la roca, pueden recibir directamente la PAN, esta precipitación se ha llamado Precipitación Horizontal sobre Roca (PHR). Para su evaluación se usa la siguiente ecuación:

$$PHR = EfCL \times KRN \times PHRo$$

siendo,

EfCL= Factor de Eficiencia de Captación Local

KRN= factor de eficiencia debido a la relación del suelo o la Roca con la Niebla.

PHRo= es el módulo óptimo de PAN sobre la roca.



Foto3: Frontales de rocas aisladas recibiendo el impacto de la niebla.

Fuente: Juan José Braojos Ruiz.

5.11. FUNCIONES PARA EL CÁLCULO DE LA PAN TOTAL.

Para calcular Precipitación Total de Agua de Niebla (PTAN) en una celda, se usan las siguientes siguientes:

- a) Si la celda está situada a en una parcela interna de bosque:

$$PTAN_{pi} = EfCL \times (KBN(pi) \times PANo + KRN \times PHRo)$$

- b) Si la celdanse encuentra en una parcela de borde de bosque:

$$PTAN_{pb} = EfCL \times (KBN(pb) \times PANo + KRN \times PHRo)$$

5.12. LA PRECIPITACIÓN TOTAL DE AGUA DE NIEBLA EN TENERIFE.

El volumen específico medio de PTAN generada de forma natural en la isla de Tenerife se ha calculado en el MHSup según la metodología descrita, durante los últimos treinta años. El valor medio obtenido es de : **48 l/m²/año**, de esta cantidad:

- a) Si tenemos en cuenta su procedencia:

41 l/m²/año procederían de las nubes del Régimen de Alisios.

8 l/m²/año de las nubes de Inestabilidad Atmosférica.

- b) Si tenemos en cuenta la modo de captación

40 l/m²/año habrían sido captados por la vegetación

8 l/m²/año los habrían captado el suelo y la propia roca que cubre la superficie insular.

Las principales áreas de captación se sitúan en la cordillera de Anaga, la Dorsal Central y la de Teno.

Tabla 1. Valores medios de PAN neta en las zonas de cresta de las tres cordilleras (L/m²). Braojos (2015)

	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	TOTAL
Anaga	100	350	20	15	485
Teno	40	110	15	15	180
Dorsal	150	35	165	300	650

5.13 AFECCIÓN DE LA PTAN A LA RECARGA DEL SISTEMA ACUÍFERO INSULAR

“La resolución del balance hídrico en el MHSup proporciona el volumen específico medio anual de agua de lluvia (vertical + horizontal) que ha alcanzado el multiacuífero insular durante los últimos 30 años: **145 mm/año** \equiv 295 hm³/año. Es complicado discernir qué volumen concierne a cada tipo de lluvia” (Braojos, 2015).

Tabla 3: Balance Hídrico Histórico Medio. (Braojos, 2019)

BALANCE HÍDRICO INSULAR "HISTÓRICO" MEDIO (1944/45-2014/15)				
Ref	MAGNITUD HIDROLÓGICA	mm/año	hm ³ /año	%
PC	Precipitación Convencional	423	861	90
PN	Precipitación Horizontal	48	98	10
PT	Precipitación Total	471	958	100
EVT	Evapotranspiración	287	584	61
ES	Escorrentía	11	22	2
I	Infiltración	172	350	37
VR	Variación reservas suelo	0	0	0
DE	Derivado a embalses	1	2	0,2

Una aproximación estima sistema acuífero insular recibe unos **16 mm/año** de la PAN incorporada al Balance Hídrico (Braojos, 2015).

5.12. CALIBRADO DEL SUBMODELO Y EVALUACIÓN DE PAN₀

Tanto los experimentos realizados con el objeto de medir la PAN neta bajo la cubertera de distintos tipos de vegetación: pino canario, pino radiata, eucaliptos, fayal-brezal,

Monteverde, etc, en lugares donde aparecía la niebla; como los realizados con sistemas de captación artificial, sirvieron para hacer las pruebas de calibración del modelo que culminaron con la aproximación del valor del Módulo Óptimo de Precipitación de Agua de Niebla (**PANo**).

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Prácticamente el 90% de los algoritmos que se usan no son especulativos sino que son producto de la transposición al lenguaje matemático de múltiples experimentos tanto relacionados con la climatología que afecta a la CAN como a los factores inherentes al elemento natural de captación. Esos experimentos han servido no solo para calibrar y analizar la sensibilidad del modelo, sino para comprobar que los resultados se ajustan a la realidad experimental. Por todo ello se considera que el orden de magnitud del valor de la lluvia horizontal obtenida a través de este modelo de simulación, es representativo del aporte complementario a la oferta hídrica de esta isla.

Determinar la recarga del acuífero procedente de la Precipitación del Agua de Niebla es complejo. No obstante, los esfuerzos de Juan José Braojos, jefe de área de los recursos hídricos, dirigidos a este objeto permiten una aproximación empírica muy fiable.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BRAOJOS RUIZ, J.J. (2015). La nube, el pino y la otra lluvia. Consejo Insular de Aguas de Terife.
- BRAOJOS RUIZ, J.J. (2019) 100 Años de la Hidrología Superficial en Tenerife y su simulación a través de un Modelo Matemático Distribuido. Consejo Insular de Aguas de Tenerife.
- 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
- HERNANDO OLMO, THEO. Captación de agua de niebla en el sector central de la vertiente norte de Tenerife» (Islas Canarias) 2002-04
- HERNANDO OLMO, THEO – GIL CASANOVA, RICARDO. Evaluación del potencial de agua de niebla mediante sistemas tridimensionales durante el período invernal 2011/2012.
- KAMMER, F. (1974): Klima und Vegetation auf Tenerife besonders im Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Gotinga*. Ed. Erich Golize KG.
- MARZOL, M.V.; DORTA, P.; VALLADARES, P.; MORÍN, P.; SANCHEZ MEGIA, J. y ABREU, M. (1995): La Captation de l'eau a Tenerife (Iles Canaries). L'utilisation des brouillards. *Association Internationale de Climatologie. Volumen 7*.
- MARZOL, M.V. DORTA, P (1988). Geografía de Canarias. Vol 5.
- 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.
- MARZOL JAÉN, MARÍA VICTORIA (2002): La recogida de agua de agua de niebla en un parque rural de las Islas Canarias. *Atmospheric Research* 64, 239-250
- MARZOL JAÉN, MARÍA VICTORIA (2004): Frecuencia y duración de la niebla en Tenerife con el fin de su aprovechamiento hidrológico. *Meteored*.
- MARZOL JAÉN, MARÍA VICTORIA (2005): La captación de agua de niebla en la isla de Tenerife. Caja General de Ahorros. Santa Cruz de Tenerife

- MARZOL JAÉN, MARÍA VICTORIA (2008): Características temporales y de recogida de agua de niebla durante el verano en Tenerife (Islas Canarias, España).
Investigaciones Atmosféricas 87, 352-361
- MARZOL, M.V.; VALLADARES, P.; DORTA, P. (2001): Métodos de análisis de la nubosidad: su aplicación a las cumbres de Tenerife (Islas Canarias).
- SCHEMENAUER, R.; JOE, P. (1989): The collection efficiency of massive fog collector.
Atmospheric Research 24, 53-69
- SCHEMENAUER, R.; CERECEDA, P. (1994): The Role of Wind in Rainwater Catchment and Fog Collection. *VIII World Congress on Water Resources*
- 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*