

24. Aguas

Implementación de un neblinómetro automático para la estimación de la oferta de agua de niebla en la Cumbre de La Paz, Bolivia

Espinoza Peñaloza, Jesus Ronny; Cabrera Cadena, Ever Ezequiel; Selaya Peralta, Ernesto; Selaya Peralta, Rubén Gustavo

jrespinoza4@umsa.bo; boronniee43@gmail.com; ezeq_554@yahoo.es;
ernesto.selaya@gmail.com; ruben_selaya@hotmail.com

Ingeniería Civil, Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería

Universidad Mayor de San Andrés

Resumen

Se presenta el diseño de un neblinómetro con un sistema de recolección automático de datos meteorológicos (Automatic Fog Collector, AFC), la implementación de este neblinómetro en el sector de “La Cumbre” de La Paz, Bolivia a 4669 (msnm), el análisis de la calidad del agua cosechada siguiendo la Norma Boliviana de (NB-512), así también se proponen métodos de estimación del volumen de captación, Presentándose también las recomendaciones para que proyectos de atrapanieblas sean implementados en la colección de agua de la niebla presente en la Cordillera Real de La Paz, Bolivia.

Palabras clave: Atrapanieblas, Niebla de Radiación, Neblinómetro.

Introducción

En las experiencias de la captación de agua de niebla de advección en el mundo, especialmente en Chile y Perú, se obtuvieron muy buenos resultados.

La niebla de radiación que se forman en los valles de los Yungas de Bolivia y que ascienden hasta la cumbre de la cordillera Real, es diferente a la de advección en su formación. En Bolivia, no se tuvieron muchos emprendimientos de la captación de agua de niebla, exceptuando un

proyecto en lateral de uno peruano en Vallegrande, Santa Cruz para la captación de agua de niebla aplicada al riego, en donde se obtuvo como mínimo una colección de 5 (l/m²-día) hasta los 20 (l/m²-día) (Asociación Zabalketa, 2013).

Por ello la principal motivación del presente proyecto, es determinar la viabilidad de la colección de este tipo de niebla en las cumbres de las montañas de la Cordillera Real donde se acumula la niebla. Siendo otra principal motivación

para este proyecto la intención de mejorar los diseños ya propuestos por Schmenauer y Cereceda (1994) del denominado Standard Fog Collector (SFC), incorporándole algunos sensores y microcontroladores electromecánicos que le permitan a este convertirse en automático.

La condensación, la cual tiene lugar al unirse varias gotas pequeñas que forman las nubes, es un fenómeno que se da cuando a ciertas condiciones de presión atmosférica hacen que la temperatura del aire sea menor o igual a la temperatura del punto de rocío, en esas condiciones, si se tienen núcleos de condensación, se da la condensación del vapor de agua alrededor de estos. Los núcleos de condensación son corpúsculos de naturaleza mineral u orgánica presentes en la atmósfera y provenientes de la erosión, humos de combustibles, polen y sales marinas, y el fenómeno se da gracias a que existe un enlace de fuerza intermolecular o enlace de Van der Waals que une el núcleo de condensación con las moléculas de agua.

En el caso de la niebla, se sabe que es un tipo de nube, una nube estrato que existe en zonas donde las pequeñas partículas de agua no tienen el suficiente peso para caer y depositarse sobre el terreno, más al contrario rebotan en este y se quedan suspendidas en el aire muy cerca del suelo.

Objetivos

Para esta primera experiencia se trata de cumplir con los siguientes objetivos:

A. Objetivos Generales

- Estimar la oferta de agua de niebla en el sector de “La Cumbre” de La Paz a aproximadamente 4669 (msnm)
- Determinar la calidad del agua captada.

B. Objetivos Específicos

- Construir un Atrapanieblas Automático (Automatic Fog Collector) (AFC), que permita la colección de datos, para el estudio.
- Analizar la fiabilidad de los modelos propuestos de estimación de oferta de agua de niebla.

Materiales y Métodos

Se construyó un prototipo de neblinómetro automático (AFC) que consta de una estructura soporte, una estructura de colección de agua y los elementos electromecánicos de toma de datos.

La estructura soporte y la estructura de colección de agua (Fig. 2) fueron diseñadas en una estructura de acero de perfil cuadrado 60x30 (mm) de espesor de 1.5 (mm).

Dentro de la estructura de colección de agua, se colocó una malla, en doble capa que es la que hace la colección de agua.

Para la elección de la malla, tomando en cuenta las recomendaciones de Schmenauer y Cereceda (1994) en la implementación de un Colector Estándar

de Niebla (SFC) se decide utilizar la malla sombra de tejido raschel, que es una malla de Polipropileno resistente a la radiación UV, más comúnmente utilizada para dar sombra a cultivos en invernaderos, y ampliamente utilizada en los proyectos de colección de niebla a nivel mundial, esto debido a que esta es la que cuenta con más estudios relativos a la misma y con la que se han obtenido los mejores resultados.

La eficiencia de colección de la malla está dada por el producto de tres factores, la eficiencia de colección aerodinámica, la eficiencia de deposición y la eficiencia de drenado, La relación de eficiencia aerodinámica de colección de agua y el porcentaje de sombra de la malla, cumple una relación cuadrática con una máxima eficiencia de colección para el coeficiente de sombra de la malla de alrededor de 55%. (Rivera,2011) Es por ello que, habiéndose tomado en cuenta estas experiencias se decidió utilizar la malla con 50% de coeficiente de sombra. En la Fig. 1 (b) se muestra un esquema de la malla y en la Fig. 1(a) se muestra una fotografía de la grilla de la malla sombra con algunas gotas de niebla captadas en este proyecto.

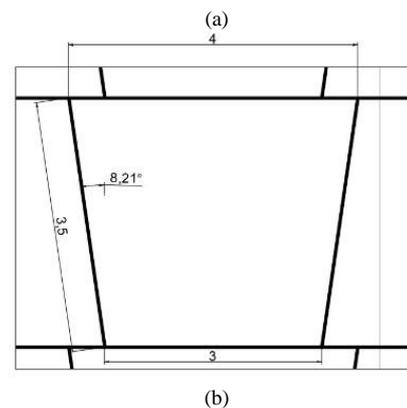
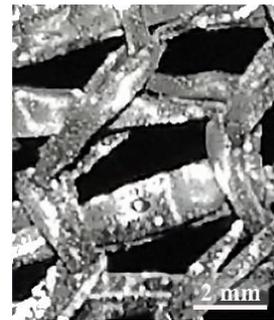


Fig. 1. Grilla de la malla sombra $s=0.5$ utilizada en el presente proyecto (a) Gotas de Niebla sobre la malla sombra. (b) Representación esquemática de la Grilla de la malla

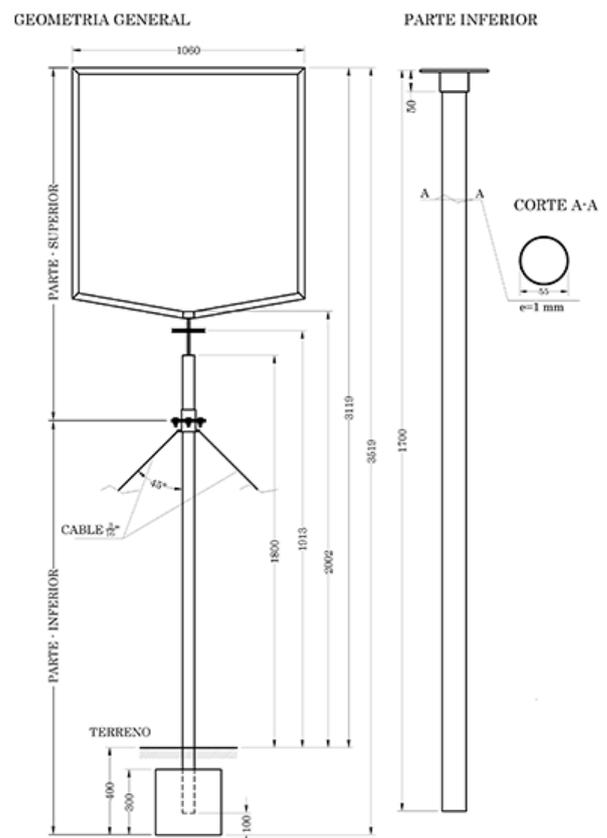


Fig. 2. Estructura Neblinómetro (soporte y de colección de agua.) (Elaboración Propia)

Con este equipo, se realizó el siguiente procedimiento de la investigación.

- A. Implementación del Neblinómetro Automático
- B. Colección de Datos Meteorológicos in situ.
- C. Colección de Agua de Niebla
- D. Estimación de la oferta de agua de niebla.
- E. Determinación de la calidad de agua captada.

Implementación del Neblinómetro Automático

Una de las componentes clave para el éxito de este tipo de proyectos es la existencia de niebla en un sitio, o la ubicación cuyas características geomorfológicas permitan la formación de niebla. En el caso de La Paz, la niebla existente en la Cumbre es una niebla orográfica o de radiación, es decir, que esta se forma debido a que las corrientes de aire caliente y húmedo van subiendo desde los Yungas Paceños hacia la Cumbre y se van enfriando, hasta que alcanzan la temperatura del Punto de Rocío del agua y esta se condensa.

No siempre se da que el vapor de agua contenido en el aire se condense, depende mucho de la época del año, la dirección del viento y de la temperatura del aire. Puede darse el caso que toda el agua de una corriente de aire que sube la cordillera se condensa a la mitad del trayecto y luego debido a los cambios de temperatura esta agua vuelva a

evaporarse o se escarche debido a las bajas temperaturas.

Para dar el paso inicial en esta alternativa de captación de agua, se escogió un sitio muy próximo a la divisoria de cuencas entre los ríos que escurren hacia los Yungas y los que escurren hacia el valle de La Paz, por ello mismo, “La Cumbre”, específicamente el sitio conocido como “El Cristo de la Cumbre” ubicado exactamente a un costado de la Carretera a Coroico, sitio el cual es un mirador y un punto de ofrendas que realizan los viajeros en las “Apachetas”. Las coordenadas de este punto son:

Este punto también se escogió por su accesibilidad, ya que es mucho más fácil llegar a este punto que a otro punto en la divisoria de cuencas de la cordillera, se llega aproximadamente en 1 (hora) desde Villa Fátima, un barrio periférico de La Paz. Nótese en el mapa que en la izquierda de este se sitúa la laguna Estrellani, que es el embalse de la represa con el mismo nombre. (Fig. 3)



Fig. 3 “Mapa de Ubicación del Neblinómetro del presente proyecto”

Colección de Datos in situ

Para la colección de datos, se utilizaron varios instrumentos y sensores, los cuales fueron obtenidos, diseñados y ensamblados por los autores (en el caso de los sensores de Arduino) e impresos en una impresora 3D (en el caso del medidor de volúmenes y el anemómetro).

No se pudo contar con datos de estaciones meteorológicas sofisticadas (AWS) debido a su inexistencia en la zona y el alto costo de estas.

Los sensores e instrumentos que se utilizaron en el ensamble del sistema de colección de datos del neblinómetro se presentan a continuación:

Microcontrolador

El presente proyecto estaba basado en la utilización de Arduino, como base para el control, obtención y posterior compilado de datos. Cabe destacar que el uso de este tipo de placa en específico es debido a su costo, sus utilidades y a sus facilidades. Para este caso se usa una placa Arduino Nano.

Medidor de Volúmenes

Este instrumento permite conocer la acumulación de volúmenes de agua $V_a (ml * s)$, que es captada por el sistema a lo largo de un determinado tiempo. Dicho instrumento es un diseño propio de los autores y consta de las partes mostradas en la Fig.4:

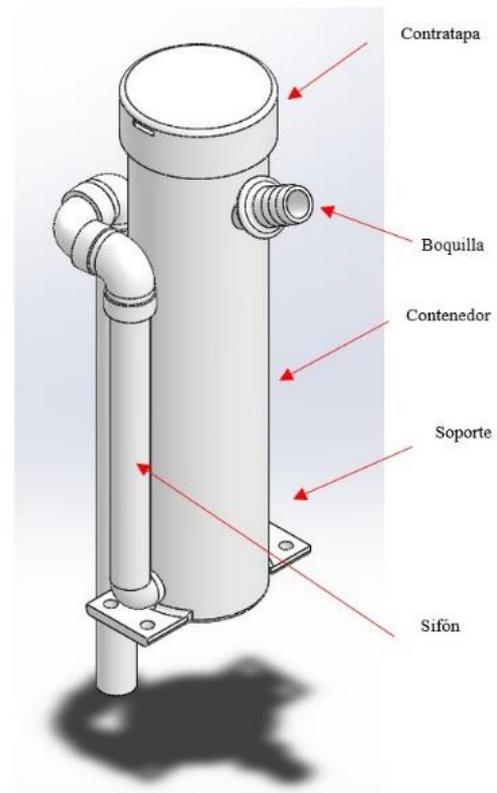


Fig. 4 "Medidor de volúmenes utilizado en la colección de agua y de datos sobre la captación"

Debe aclararse que el dato relevante es el "Volumen Almacenado" $V_a (ml)$, a lo largo de un determinado tiempo que recolecta el sistema, por lo tanto, un $\Delta V_a (ml)$ es determinado con dos datos consecutivos de volúmenes almacenados, y el intervalo de tiempo en el que se midieron $\Delta t (s)$.

Otro punto importante es la precisión del instrumento, que queda sujeta al medidor de distancias ultrasónico "HC-SR04."

Como se expresó anteriormente, la medición del "Acumulado del Volumen" $V_a (ml * s)$, se realiza de forma indirecta, mediante la altura que registre el sensor HC-SR04, con lo cual se llega a obtener la curva altura-volumen.

Sensor de medición de distancias (HC-SR04)

La forma de trabajo de este sensor es mediante un envío de una señal ultrasónica por medio de un disparador y que es recibida por un receptor, de esta manera se calcula el tiempo que tarda el sonido en ser emitido y recibido. Por lo cual este sensor es sensible a cambios de temperatura y trabaja en un rango de temperatura de 10(°C) a 80(°C), siendo que las mediciones fuera de este rango son susceptibles a variaciones significativas especialmente debido a la densidad del aire.

La precisión de medición del instrumento es de 3(mm). Con tal valor se puede estimar el error propagado como error volumétrico por parte de sensor HC-SR04.

Anemómetro

Este instrumento permite determinar el módulo de la velocidad del viento de manera indirecta. Dicho instrumento es un diseño propio y consta de las partes mostradas en la Fig. 5.

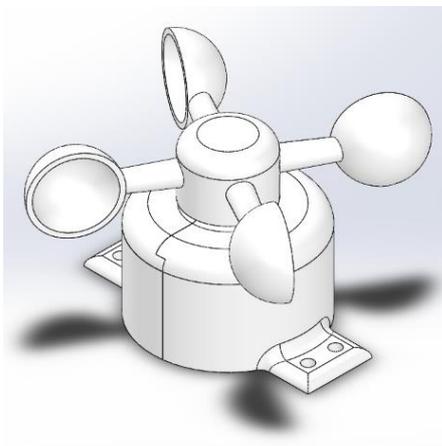


Fig. 5. "Esquema del anemómetro utilizado en el sistema de recolección de datos meteorológicos del módulo de la velocidad de viento"

La medición se realiza mediante la generación de un voltaje promedio de un generador DC acoplado al eje, el cual es "leído" por una entrada analógica del Arduino. Para esta operación el Arduino debe estar programado de acuerdo con la función (Voltaje vs Velocidad Angular) que genera el instrumento debido a la excitación del viento. Esta es traducida por el Arduino y recopilada como velocidad tangencial.

Veleta

Este instrumento permite conocer la dirección del viento. Dicho instrumento también es un diseño propio y consta de las partes mostradas en la Fig. 6

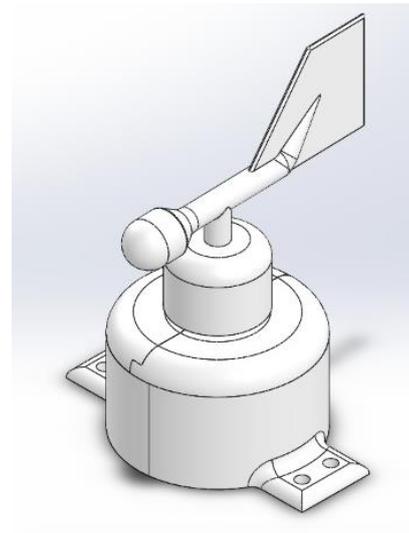


Fig. .6 "Esquema de la veleta utilizada en el sistema de datos meteorológicos de la dirección de la velocidad del viento"

El funcionamiento de la veleta se hace mediante un sensor de luz y un armado circular con franjas oscuras y claras. Se detecta el movimiento de cada revolución. De esta manera se mide la cantidad de pulsos que ingresan a un pin digital del Arduino, el cual traduce estos pulsos en un ángulo con respecto a un ángulo de

referencia (0°). de esta manera indirectamente se calcula la dirección del viento.

Sensor DHT22

Este sensor nos permite conocer la humedad relativa del medio ambiente el cual utiliza un sensor capacitivo de humedad y un solo pin digital para la lectura de los datos, el mismo otorga una lectura por cada dos segundos. Sin embargo, debido a que la humedad relativa no es una variable que cambie rápidamente en el tiempo devuelve una lectura confiable.

Sensor DS3231

Este sensor permite conocer la fecha y la hora independientemente del suministro de energía del Arduino, de esta manera se permite conocer esta variable sin importar las pérdidas de energía. Este módulo utiliza el protocolo de comunicación "I2C", además de un regulador de voltaje y una batería externa de 3.6 voltios. Este también incluye un circuito integrado y un oscilador interno que compensa la temperatura de trabajo y una compensación por años bisiestos.

Sensor PB280

Este sensor permite medir la presión atmosférica, la altura sobre el nivel del mar y la temperatura ambiental a una alta precisión. Además, utiliza el protocolo de comunicación "I2C". Calcula la altura

sobre el nivel del mar mediante la presión barométrica con respecto a mar teniendo en cuenta la temperatura, considerando esta última como constante. Cabe destacar que la medición de temperatura tiene un error de (+-) 0.05 ($^\circ\text{C}$).

Colección de Agua de Niebla

La colección de agua de niebla se efectuó con la malla Raschel con un coeficiente de sombra del 50% que se instaló en la estructura de colección, la cual es mostrada en la Fig. 8.

La colección de agua se da a partir del escurrimiento del agua de la malla hacia dos canales, colocados simétricamente que conducen el agua al medidor de volúmenes y luego de eso hacia un recipiente que almacena el agua captada.

Estimación de la oferta de agua de niebla

El procedimiento para el presente proyectos particular por sus características también particulares. Para la estimación de la oferta de agua presente en la atmósfera que sea aprovechable en La Cumbre de La Paz, se requiere de datos meteorológicos tradicionales y no tradicionales.

Modelo para la estimación del caudal de oferta.

En el presente modelo se realizan varias asunciones, las cuales se muestran a continuación:

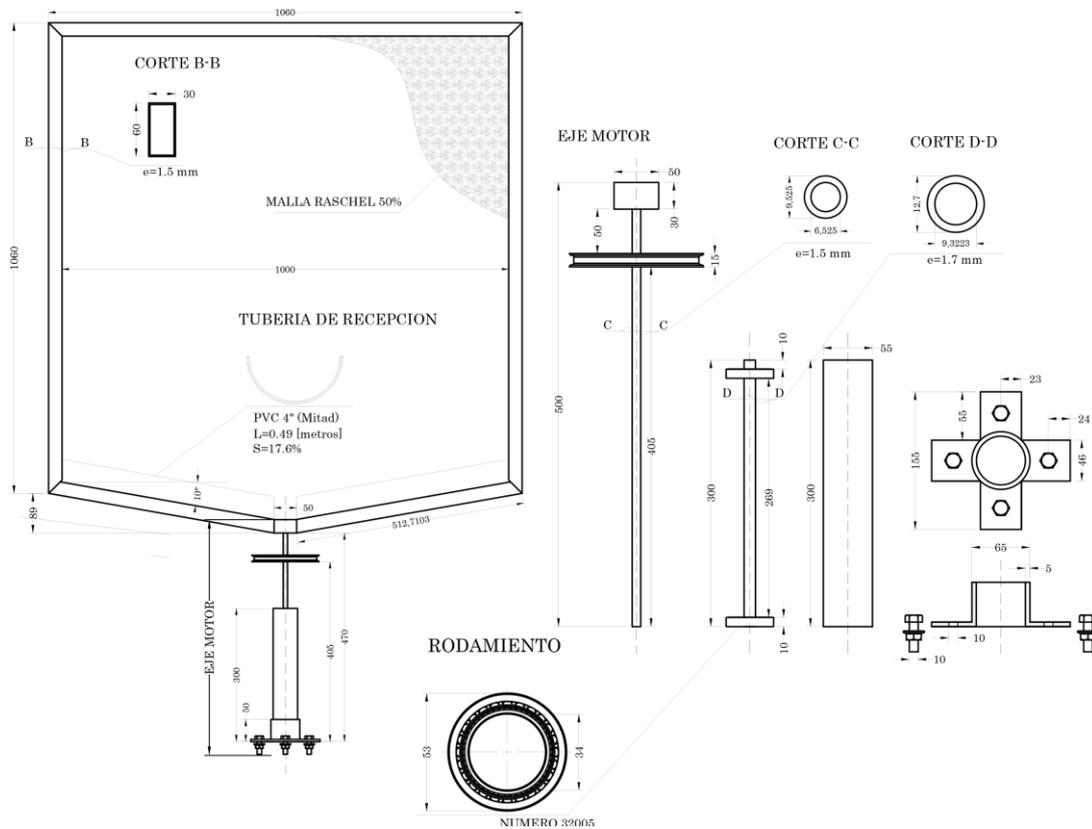


Fig. 7. "Detalle de la estructura de Colección de Agua de Niebla"

- El viento contiene partículas de agua uniformemente distribuidas en una sección de control de dimensiones pequeñas comparadas con las dimensiones de una sección transversal de la tropósfera, donde está casi toda la totalidad de agua atmosférica.
- El perfil de velocidades del viento es uniforme, en módulo y dirección, para tramos cortos como el que se estudia.
- La temperatura del aire y la humedad relativa son constantes a lo largo de un volumen de control de aire que atraviesa la malla.
- Las partículas de agua suspendidas en el aire tienen forma perfectamente esférica.

- Las leyes de los gases ideales describen el comportamiento de los gases presentes en la atmósfera.

En varias investigaciones se trata de determinar de manera empírica el volumen que capta la malla Raschel y en todos estos modelos se utilizan las mismas variables meteorológicas para determinar el caudal, estas son: humedad relativa (Rh), temperatura ambiente (T), velocidad de viento (v), pues a partir de estas se puede determinar otros parámetros como la viscosidad dinámica (μ), densidades del aire y el agua, (ρ_a) y (ρ_w) respectivamente; así como la presión de vapor (p_v) y la tensión superficial del agua (σ_w). Para este estudio se escogieron planteó un método de estimación, de donde se obtienen dos

valores, esto debido a los dos métodos para calcular la eficiencia de colección.

Para ambos métodos, uno llamado de Walmsley-Ritter y el otro de Walmsley-Rivera, se estima el caudal a partir de la ecuación de la continuidad de la mecánica de fluidos, esta ecuación, dimensionalmente correcta se presenta a continuación, con algunas correcciones de los autores:

$$Q = \frac{w \cdot A \cdot v \cdot \eta_c}{\rho_w} \quad (1)$$

Donde el caudal Q (m^3/s) es función de la concentración de partículas de agua líquida en un metro cúbico de aire w ($Kg \cdot m^{-3}$), la velocidad del viento v ($m \cdot s^{-1}$), el área de la malla A (m^2) y η_c es un número adimensional que representa la eficiencia de colección del atrapanieblas, dicho valor está expresado en la siguiente ecuación (Rivera, 2011).

$$\eta_{col} = \eta_{ace} \cdot \eta_{cap} \cdot \eta_{dre} \quad (2)$$

En la anterior expresión, η_{ace} es la eficiencia aerodinámica de deposición, η_{cap} es la eficiencia de captura de la malla, y η_{dre} es la eficiencia de drenaje de la malla. Las primeras dos eficiencias tienen expresiones fueron determinadas por el mismo Rivera (Cereceda et. Al.), mientras que para la tercera se formuló con el criterio de los autores, estas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\eta_{ace} = \frac{s}{1 + \sqrt{\frac{C_o}{C_d}}} \quad (3)$$

$$\eta_{cap} = \left(\frac{Stk}{Stk + \frac{\pi}{2}} \right) \quad (4)$$

$$\eta_{dre} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } r \geq 1 \\ r & , \text{ si } r < 1 \end{cases} \quad (5)$$

En la ecuación (3) se tienen los siguientes parámetros: $s(\%)$ es el coeficiente de sombra de la malla Raschel, C_o es el coeficiente de pérdida de presión, C_d es el coeficiente de arrastre viscoso de toda la estructura, el cual es igual a 1.18 para estructuras con la malla recta como se muestra en la Fig. 8. El coeficiente de pérdida de presión es un valor debido a la pérdida de presión atmosférica del aire que atraviesa la malla, según Rivera este se expresa de la siguiente manera:

$$C_o = 1.62 \cdot \left[1.3s + \left(\frac{s}{1-s} \right)^2 \right] \quad (6)$$

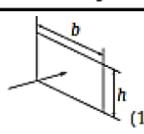
Geometry	Aspect ratio (b/h)	Drag coefficient (C_d)
 (1)	1	1.18
	5	1.2
	10	1.3
	20	1.5
	∞	2.0
 (2)		2.3

Fig. 8. Coeficiente de Arrastre (C_d) para placas rectangulares y pantallas Cóncavas. (Rivera, 2011)

En la ecuación (4) Stk es el número de Stokes de la partícula más representativa de la niebla, el número de Stokes es adimensional, su representación física establece lo siguiente:

“Cuando el número de Stokes es mayor a uno representa la situación en la cual las partículas suspendidas en un fluido que está en régimen Stokiano, cuando el número de Reynolds es muy cercano a la unidad, que se mueven conjuntamente al

fluido, impactan con un obstáculo interpuesto a su movimiento; el caso contrario es cuando el número de Stokes es menor a uno, lo que representa que las partículas suspendidas en un fluido seguirán las líneas de flujo evitando así el impacto con el obstáculo.” La ecuación para la determinación del número de Stokes es dada por la ecuación siguiente:

$$Stk = \frac{\rho_w * d_g^2 * v}{18 \mu_a * d_m} (7)$$

Donde d_g (m) es el diámetro de la gotita o partícula de agua suspendida en el agua, μ_a ($Kg * m * s^{-1}$) es la viscosidad dinámica del aire, d_m (m) es el espesor de las hebras de la malla Raschel.

Una manera alternativa del cálculo de la eficiencia de captura de la malla η_{cap} , también llamada eficiencia de impacto η_{imp} por Ritter (Ritter, 2008), es expresada de la siguiente manera:

$$\eta_{cap} = \eta_{imp} = \begin{cases} \left(\frac{Stk}{Stk+0.6} \right)^2, & Stk \geq 0.08 \\ 0, & Stk < 0.08 \end{cases} (8)$$

En la ecuación (5), formulada por los autores para el presente proyecto, r es un valor adimensional determinado a partir de un equilibrio de fuerzas, de allí se muestra que el valor de r es una relación entre las fuerzas que hacen que la gota escurra (P_g (N) su peso propio), y las fuerzas que se oponen a este movimiento (F_q (N) la fuerza cortante de viscosidad del agua, F_d (N) la fuerza de arrastre viscoso del aire sobre la gotita de agua, E_a (N) el empuje hidrostático del aire actuante

sobre la gotita de agua y F_t (N) la fuerza debida a la tensión superficial del agua). Las ecuaciones que definen cada una de las fuerzas consideradas se presentan a continuación:

$$P_g = \rho_w * g * \frac{\pi * d_g^3}{6} (9)$$

$$F_q = \mu * A_g * \frac{v_g}{d_g} (10)$$

$$F_d = C_{dg} * \frac{\rho_w * v_c^2}{2} * \frac{\pi * d_g^2}{4} (11)$$

$$E_a = \rho_a * g * \frac{\pi * d_g^3}{6} (12)$$

$$F_t = \frac{\sigma_w * \pi * d_g^2}{4} (13)$$

$$r = \frac{P_g}{F_q + F_d + E_a + F_t} (14)$$

La concentración de partículas de agua líquida en el aire w ($Kg * m^{-3}$), que se muestra en (1) es el parámetro más difícil de determinar debido a que depende de una interacción líquido-gaseosa. Sin embargo, se logró expresar esta de la siguiente manera:

$$w = \frac{m_w}{V(m_a^3)} (15)$$

Donde m_w (Kg) es la masa de agua total de todas las partículas de agua en un volumen determinado de aire $V(m_a^3)$, para este caso se asume que este volumen de control es de un metro cúbico de aire. Por consiguiente, la masa del agua total de las partículas de agua es la suma de cada uno de los volúmenes de todas las partículas que contienen un metro cúbico de aire, lo cual es algo muy difícil de determinar, por ello, se prefiere utilizar un

método alternativo, que asume que todas las partículas de agua presentes en un metro cúbico de aire son del mismo tamaño, lo cual no es cierto debido a que las partículas tienen una distribución asimétrica positiva, como se muestra en la Fig. 9, la cual se extrajo a partir de datos de una colección realizada en “La Cumbre” donde se extrajeron fotografías de las partículas aferradas a la malla, un método similar al de Klemm (Klemm, 2005). Estos datos son aproximados, para una estimación mucho más precisa debe obtenerse a partir de la observación diaria de la niebla en la Cumbre misma con el mismo método y con sensores específicos para este fenómeno como un disdrómetro, para poder obtenerse un valor representativo de las dimensiones de las partículas además de otros parámetros como el número de días con niebla por año, horas con niebla por día, como realizó Cereceda en Chile. La m_w (Kg) se estima con la siguiente ecuación:

$$m_w = n * \rho_w * \frac{\pi d_r^3}{6} \quad (16)$$

Donde n es un número adimensional que representa el número de partículas de diámetro equivalente agua existentes en un metro cúbico de aire, d_r (m) el diámetro equivalente de la partícula de agua en un metro cúbico de aire. El valor de n es un valor que se obtiene experimentalmente, y se establecen algunos valores referenciales sugeridos por los autores en función del único parámetro que podemos medir directamente de la niebla, el cual es

la visibilidad horizontal. Esto se muestra en la Tabla 2.

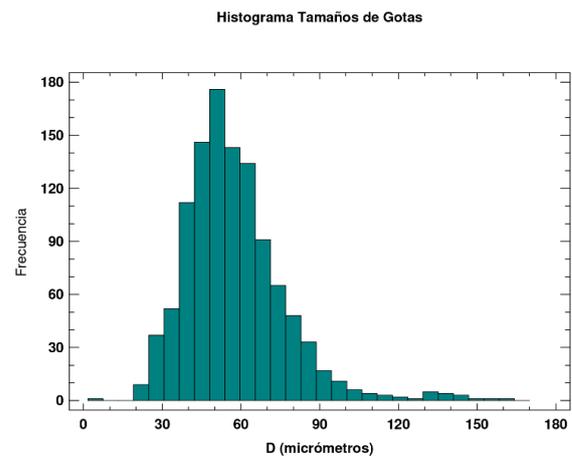


Fig. 9. Histograma de diámetros de las gotas de la Niebla de la Cumbre

Visibilidad Horizontal (m)	DISTANCIA (m)		TIPO DE FENÓMENO	CANTIDAD DE GOTAS EQUIVALENTES POR METRO CÚBICO DE AIRE	
	DESDE	HASTA		DESDE	HASTA
	0	5	NIEBLA DENSA	1,00E+11	1,00E+11
	5	50	NIEBLA	1,00E+11	1,00E+09
	50	500	NEBLINA DENSA	1,00E+09	1,00E+07
	500	1000	NEBLINA	1,00E+07	1,00E+05
	500	1000		1,00E+05	1,00E+04

Tabla1. “Relación de Cantidad de Gotas Equivalentes y Distancia de Visibilidad Horizontal”

Determinación de la calidad de agua captada.

Para conocer el fin con el que se podrá utilizar el agua captada por el neblinómetro, es importante realizar una verificación de la calidad del agua. Se plantea realizarla mediante parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos. Tomándose como referencia los valores establecidos en la norma boliviana NB-512 para la calidad de agua potable. Los métodos por utilizarse están normados según los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. También, microbiológicamente siguiendo los métodos descritos por Apha. (Apha, 1992)

Resultados y Discusión

Calidad del Agua Colectada

Se presentan los valores obtenidos en el análisis de calidad de agua, esto fue realizado en el Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la UMSA.

Parámetros Físicos

PARÁMETRO	PARÁMETROS FÍSICOS			
	RANGO NB-512		MUESTRA DE AGUA DE NIEBLA	
	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR OBTENIDO	OBSERVACIÓN
Olor	Inodoro	Inodoro	Inodoro	CUMPLE
Color		15 (UCV)	7,5 (UCV)	CUMPLE
Temperatura		-	4,8 (°C)	CUMPLE
PH	6,5	9	7,19	CUMPLE
Conductividad		1500 (µs/cm)	43,10 (µs/cm)	CUMPLE
Turbiedad		5 (UNT)	3,37 (UNT)	CUMPLE

Tabla 2. "Comparación de Valores Obtenidos y la NB-512 para Parámetros Físicos"

Parámetros Químicos

PARÁMETRO	PARÁMETROS QUÍMICOS			
	RANGO NB-512		MUESTRA DE AGUA DE NIEBLA	
	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR OBTENIDO	OBSERVACIÓN
Alcalinidad	-	370 (mg/L) CaCO ₃	8 (mg/L) CaCO ₃	CUMPLE
Dureza	-	500 (mg/L) CaCO ₃	17,8 (mg/L) CaCO ₃	CUMPLE

Tabla 3. "Comparación de Valores Obtenidos y la NB-512 para Parámetros Químicos"

Parámetros Microbiológicos

Al tratarse de aguas recolectadas de niebla, esta agua se considera no residual, por lo tanto, en este punto será suficiente con hacer un análisis de Filtro de Membrana Para Miembros del Grupo Coliforme.

PARÁMETRO	PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS			
	RANGO NB-512		MUESTRA DE AGUA DE NIEBLA	
	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR OBTENIDO	OBSERVACIÓN
Coliformes Termotolerantes	0 (UFC/100mL)	0 (UFC/100mL)	20 (UFC/100mL)	SE NECESITA DESINFECCIÓN
escheria coli	0 (UFC/100mL)	0 (UFC/100mL)		
Coliformes Totales	0 (UFC/100mL)	0 (UFC/100mL)		

Tabla 4. "Comparación de Valores Obtenidos y la NB-512 para Parámetros Microbiológicos"

Métodos de Estimación

Para este proceso requiere de una gran cantidad de datos, los cuales, debido a la lejanía de la zona de estudio, los escasos recursos económicos y el corto tiempo de observación que se tuvo para el estudio no fueron suficientes para poder efectuar un análisis completo de un año hidrológico. Por ello, se muestra los resultados de una captación que se realizó.

La variación de temperatura y humedad relativa se muestra en la siguiente figura:

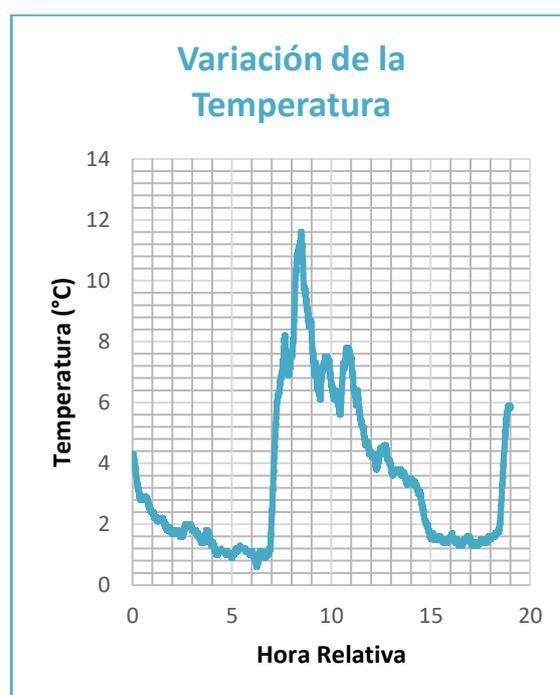


Fig. 10 "Variación de la temperatura en un día de niebla en la zona de estudio"

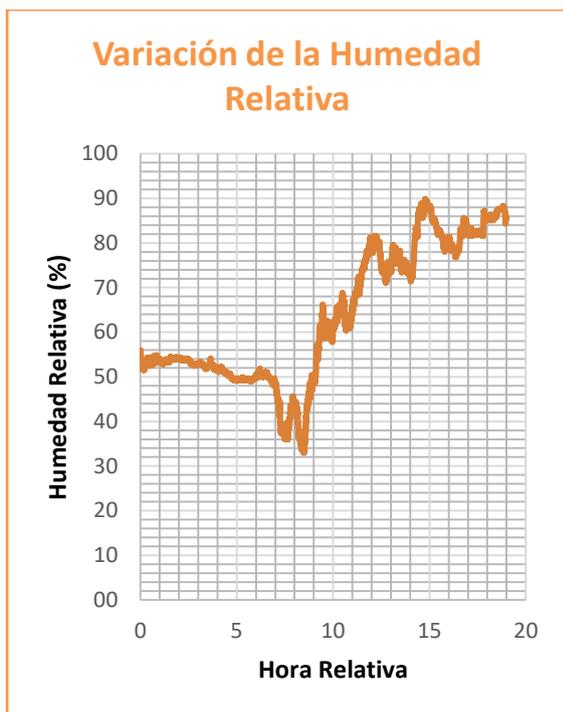


Fig. 11 "Variación de la humedad relativa en un día de niebla en la zona de estudio"

Nótese que, según las observaciones dadas las condiciones del sitio de estudio, las condiciones de formación de niebla en el sector de la cumbre dependen de tres parámetros importantes: la temperatura, la humedad y la dirección del viento; esto indica que además la captación se da si y solo si se cumplen los parámetros mostrados en la tabla siguiente:

CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA CAPTACIÓN DE NIEBLA		
PARÁMETRO	DESDE	HASTA
Humedad Relativa (%)	80%	100%
Temperatura (°C)	0,00	2,00
Dirección del Viento	NE	SO

Tabla 5. "Condiciones Meteorológicas requeridas para la formación y captación de niebla en la Cumbre de La Paz"

En la tabla anterior se establecen las condiciones requeridas para la captación de agua de niebla en donde además se incorpora el parámetro de dirección de viento ya que para las direcciones de viento que soplan de norte a sur hasta las

de noreste a sudeste se evidencia que el aire contiene humedad arrastrada de los Yungas lo que permite la formación de niebla, en otros casos se notó que el aire es seco o con poca humedad y que este no permite la formación de niebla aunque se cumpla con las condiciones de temperatura.

Para las 24 (Hrs) que se captó agua de niebla, se estimó la captación con los siguientes resultados: con el método de Walmsley - Ritter se obtuvo un promedio de captación de $58.06 \left(\frac{ml}{hr}\right)$ y con el método de Walmsley - Rivera se obtuvo un promedio de $60.33 \left(\frac{ml}{hr}\right)$. El valor medio de captación horaria medido fue de: $57.29 \left(\frac{ml}{hr}\right)$.

En el acumulado del volumen se determinó el error porcentual de cada método debido a que existe una variación entre el valor acumulado medido y los estimados. Estos errores porcentuales se muestran a continuación:

ERRORES PORCENTUALES DE LOS MÉTODOS	
Ritter	Ritter - Rivera
1,338%	5,295%

Tabla 6. "Errores Porcentuales de los métodos de estimación respecto al valor real medido"

Costo del Neblinómetro

Se realizó un análisis de Precios Unitarios para la construcción del neblinómetro. El costo estimado es de 2000 (BOB), incluyendo la mano de obra, y sin incluir esta, el costo está alrededor de los 1100 (BOB)

Conclusiones

Se llegó a implementar un neblinómetro con diseño propio de los autores en la Cumbre de la ciudad de La Paz, específicamente en el sector del “Cristo de la Cumbre”. El neblinómetro pesa alrededor de los 20 (Kg) y tiene una altura máxima de 3,3 (m). Se le colocó una malla sombra de tejido Raschel con coeficiente de sombra del 50% ($s=0.5$) con doble capa.

Después de haber medido el volumen de agua de niebla que fue capturando la malla, se evidenció que la captación de niebla del neblinómetro es muy susceptible a los cambios de velocidad de viento, temperatura y humedad relativa. Se pudo almacenar $1.375 \left(\frac{L}{día*m^2}\right)$, para condiciones normales, es decir, que la niebla no era muy abundante, pero tampoco escasa (visibilidad horizontal de 550 metros) Aunque existen intervalos de tiempo durante el día y la noche donde esta desaparece totalmente y luego vuelve a aparecer, específicamente al amanecer y al anochecer. Los métodos de estimación son solo aproximados y no fiables aún, sin embargo, se llegó a evidenciar que el Método de Walmsley-Ritter fue más adecuado para estimar el volumen de captación en este proyecto para los valores de cantidad de partículas que se sugieren en la tabla 1.

Se determinó la calidad del agua captada según la NB-512, cumpliendo los requisitos fisicoquímicos básicos, pero no

así los bacteriológicos, esto debido a la existencia de unidades formadoras de colonia, que, sin embargo, puede ser fácilmente tratada con un tratamiento de cloración, una solución de lavandina, por ejemplo. Los datos de calidad de agua no son conclusivos para caracterizar toda el agua de niebla existente en “La Cumbre”, ya que la muestra estudiada en este proyecto no es estadísticamente significativa, más al contrario es un lineamiento para poder determinar el caudal de oferta aprovechable en “La Cumbre” y otros sectores donde se dé el fenómeno de condensación para la formación de niebla orográfica a futuro. Además, se sugiere realizar una previa filtración simple al agua captada.

Se realizó una estimación del costo unitario del neblinómetro utilizado. El Precio Unitario aproximado del Neblinómetro es de 2000 (BOB) o 250 (USD).

Bibliografía

- [1] Asociación Zabalketa y NerGroup. (2013). Captación de agua de niebla para reforestación en Perú y Bolivia.
- [2] Apha, A. W, Standard Methods for The Examination of Water and Waste Water, 17th Ed., Diaz De Santos, Ed. Madrid. Pp. 2-76, 1992.
- [3] Cereceda, P., Hernández, P., Leiva J. y Rivera J. de D. (Ed.)(2014). Agua de Niebla, La Niebla, una fuente alternativa de recursos hídricos en zonas semiáridas, con sistemas de captación altamente eficiente y usos no

tradicionales. Recuperado de:
<http://www.cda.uc.cl/wp-content/uploads/2015/12/Libro-Agua-de-Niebla-1.pdf>

- [4] Klemm, O., Wrzesinsky, T. y Scheer, C. (2005). Fog Water Flux at a Canopy Top: Direct Measurement Versus One-Dimensional Model. *Atmospheric Environment*, 39(29), 5375-5386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.041>
- [5] Ritter, A., Regalado, C., y Aschan, G. (2008). Fog Water Collection in a Subtropical Elfin Laurel of the Garajonay National Park (Canary Islands): A Combined Approach Using Artificial Fog Catchers and a Physically Based Impaction Model. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 920-935. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008JHM992.1>
- [6] Rivera J. de D. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors, *Atmospheric Research*. 102, 335–342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005>
- [7] Schemenauer, R.S. y P. Cereceda, (1994) A Proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions. *Journal of Applied Meteorology*. 33, 1313–1322, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<1313:APSFCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<1313:APSFCE>2.0.CO;2)

Agradecimientos

Los autores dan su agradecimiento a su Alma Mater, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, por la oportunidad del desarrollo de investigación de los estudiantes. También a los docentes que apoyaron al proyecto en su concepción e implementación, M. Sc. Ing. Juan Pablo Fuchs Arce e Ing. Edwin Astorga Sanjinés, a los representantes estudiantiles y docentes de la Carrera de Ingeniería Civil y sus Institutos de Investigación, Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (IIS), e Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH). También agradecer profundamente al Laboratorio de Prototipado de la Honorable Alcaldía Municipal de La Paz por los servicios prestados al presente proyecto. A la empresa de impresión 3D "Print 3D", y sobre todo a las familias de los investigadores por ser el principal sustento económico y moral del equipo.