

## EFFECTO DE LA ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CÁLCULO DE NIVELES DE AGUA Y CAUDALES

### EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ESTIMATION ON STAGE AND DISCHARGE CALCULATIONS

Mario Gualpa<sup>1</sup> y Rolando Céleri<sup>1</sup>

#### Resumen:

La calidad y precisión de los estudios hidrológicos depende principalmente de los datos y de los modelos hidrológicos utilizados. Sin embargo, muy poco se cuestiona la calidad de los datos y los efectos de ellos en los análisis posteriores. Al realizar el monitoreo hidrológico es común que se pierdan datos de presión atmosférica por fallas en los sensores y vandalismo, especialmente en zonas remotas, lo cual hace imposible calcular los caudales. Por ello, este estudio estuvo orientado a determinar el efecto de la estimación de datos de presión atmosférica sobre el cálculo del nivel de agua en pequeños cauces y cómo estos errores se propagan hacia la estimación de caudales. El estudio se realizó con datos registrados por sensores de presión de 18 estaciones hidrológicas y meteorológicas instalados en los observatorios eco-hidrológicos de Zhurucay y Soldados (ecosistemas de páramo, 3200 a 4200 m s.n.m.) y Mazar (bosque montano – 2600 a 3500 m s.n.m.), ubicados en el sur del Ecuador, desde junio de 2011 a diciembre de 2012. Los resultados revelaron que la regresión lineal más eficiente que la interpolación/extrapolación para estimar datos de presión atmosférica, al presentar valores del coeficientes de Nash – Sutcliffe mayores a 0,71, incluso para sensores ubicados hasta con 490 m de desnivel y separados hasta 4778 m. Los errores producidos sobre el cálculo de caudales fueron menores al 5 % del sesgo absoluto. Para calibrar la ecuación de regresión se analizaron períodos de 1 día a 4 meses (con registros de presión cada 5 minutos), encontrando que aún contar con un día de datos proporciona una buena ecuación de regresión. En conclusión, la pérdida de datos de presión puede ser estimada con bastante precisión para los fines de cálculo de caudales a partir de observaciones de otro sensor.

**Palabras claves:** Páramo, bosque montano, precisión de sensores, presión atmosférica, caudal, Ecuador.

#### Abstract:

The quality and precision of hydrological studies relies on the data and models used. However, data quality and its effect on subsequent studies are little questioned. Hydrological monitoring is a complex endeavour and it is common to have data gaps due to sensor malfunction or vandalism, especially in remote areas; these gaps make impossible to calculate the discharge. To tackle this problem, this study had the objective of determining the effect of atmospheric pressure estimation on river stage computation, and to know how stage errors propagate into discharge estimation. The study was conducted with data from 18 barometric pressure sensors from the ecohydrological observatories of Zhurucay and Soldados (páramo ecosystem, 3200 to 4200 m a.s.l.) and Mazar (montane forest, 2600 to 3500 m a.s.l.), located in South Ecuador. The study period extended from June 2011 to December 2012. Results revealed that linear regression was more efficient than interpolation to estimate atmospheric pressure data, reaching Nash-Sutcliffe coefficients higher than 0.71, even for sensors with 490 m of height difference and 4778 m apart. Discharge calculated with the estimated pressure data showed less than 5% of absolute bias when compared to the observed discharge. The length of the time series needed to obtain a good calibration of the regression equation was studied. Series from 1 day till 4 months (with 5-minute records) were used and it was found that even a single day of data provided a good regression equation. It is concluded that data gaps can be filled out satisfactorily for stage and discharge calculations from the observations of a nearby sensor.

**Keywords:** Páramo, montane forest, atmospheric pressure, discharge, Ecuador

#### INTRODUCCIÓN

La calidad y precisión de los estudios hidrológicos depende principalmente de los datos y de los modelos hidrológicos utilizados. Los modelos han sido mejorados permanente en las últimas décadas para reducir la incertidumbre en estudios hidrológicos, lo que se evidencia en el amplio desarrollo de mode-

los de distinto grado de complejidad (Liu et al, 2009; Pao-Shan Yu et al, 2001), como por ejemplo la modelación de la escorrentía total de las cuencas hidrográficas (Cuartas et al., 2012; Amaya et al, 2009). Sin embargo, los modelos pueden llegar únicamente a ser tan precisos como lo son los datos de ingre-

<sup>1</sup> Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.  
E-mail: mario.x.gualpa@gmail.com

so utilizados en los estudios. Si bien la integridad de los datos hidrológicos depende de muchos aspectos como validez de las curvas de descarga, sistema de captura de datos, precisión de los sensores, entre otros (WMO, 2008), en los estudios hidrológicos muy poco se cuestiona la calidad de los datos utilizados en los estudios y se tiene la concepción de que son exactos y representan la realidad absoluta de la zona de estudio (Céleri y Feyen, 2009).

Para estimar los caudales en cauces pequeños de microcuencas experimentales se usan sensores electrónicos que miden el nivel del agua, generalmente transductores de presión (Crespo et al, 2011). Existen dos tipos de transductores, de compensación automática (tubo ventilado) y los que no tienen compensación automática. En los transductores de tubo ventilado, se utiliza un sensor sumergido al que está adherido un tubo por el cual entra aire desde la parte externa; esta presión del aire contrarresta a la presión generada sobre el sensor sumergido (presión de columna de aire y agua), registrando directamente la presión de la columna de agua sobre el sensor (Gribovszki et al, 2013; INW manual, 2011). Por otro lado, en los casos cuando no hay compensación automática, un sensor se coloca en el lecho del río para medir la presión absoluta (i.e. la columna de agua más la columna de aire sobre el sensor) mientras que otro sensor se coloca fuera del lecho del río para medir la presión atmosférica sobre el agua (i.e. columna de aire). La compensación consiste en la sustracción del valor de la presión atmosférica de la presión absoluta. De esta manera se puede estimar el nivel de agua y posteriormente el caudal que pasa por el vertedero.

Como la presión atmosférica es la medida del peso de la columna de aire que se encuentra sobre un sitio determinado, ésta varía inversamente con la altitud. Pero la presión atmosférica, además de la altitud, depende de muchas otras variables como la situación geográfica, la temperatura, la humedad y las condiciones meteorológicas (Whiteman, 2000). Al estar los sensores prácticamente en la misma ubicación geográfica, el efecto de las condiciones meteorológicas sobre la presión atmosférica son similares, y por efectos de los métodos usados para estimar la presión atmosférica, en este documento solo se analiza la relación de la presión atmosférica con variación de la altura. La relación entre la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento con la presión atmosférica se analizará con más detalle y profundidad en futuros estudios, en los que se caracterizará las variables meteorológicas para ecosistemas de páramo y bosque montano en los andes del Ecuador.

En la costa, la columna de aire es mayor que en una zona de montaña, por lo que la presión del aire es menor en zonas altas (Céleri et al, 2012b). Al aumentar la temperatura disminuye la densidad del aire, haciendo que el peso de la columna de aire se

reduzca, disminuyendo también la presión atmosférica (WMO, 2008); sin embargo no existe una relación clara y constante entre estas dos variables (Eslava, 1991). En los Andes tropicales existen cambios bruscos del tiempo, los cuales producen una alta variabilidad espacio-temporal de las variables meteorológicas. Por ejemplo el rango de variación de la presión atmosférica cambia hasta más 5 cm en pocas horas, razón por la cual el registro de datos debe tener una alta frecuencia de toma de datos (5 min para nuestro caso) y un período de monitoreo suficientemente largo para que la correlación entre una estación y otra sea significativa. Si a esta situación se adiciona que los barómetros electrónicos tienen un determinado tiempo de respuesta, se tiene como resultado que las mediciones de presión atmosférica pueden tener una alta incertidumbre en pequeñas escalas temporales.

Según información recolectada en el monitoreo hidrológico de cuencas de páramo y bosque andinos, así como ensayos realizados en oficina, se encuentra que los problemas más comunes relacionados con la estimación de caudales son (i) que los niveles de agua registrados por los sensores de medición de nivel presentan desfases de hasta 7 cm con respecto al nivel real y un ruido considerable en el registro de los datos (Ochoa et al, 2013); estos desfases se producen por un error del sensor al momento de medir la presión atmosférica y (ii) la pérdida de datos de presión debido a problemas de funcionamiento o mantenimiento (e.g. baterías descargadas) del sensor y por vandalismo (e.g. robo del sensor externo). Estos problemas ocasionan grandes errores al momento de estimar los caudales o simplemente que no se los pueda estimar, por lo que no se puede realizar el cierre del balance hidrológico.

Las 2 técnicas más comunes para estimar la presión atmosférica son mediante regresiones lineales directas e interpolación y extrapolación lineal. El método de regresión lineal tiene la ventaja de no depender de la altura a la que están instalados los sensores y solo necesita datos de un sensor para estimar presiones de otro sensor; se basa en la correlación lineal entre los datos de presión atmosférica y se determina una ecuación con la que se estima los datos faltantes. El método de interpolación y extrapolación lineal depende fuertemente de la altura sobre el nivel del mar a la que están instalados los sensores, y se necesitan datos de 2 sensores para extrapolar datos de un tercer sensor. Todavía no se evidencian estudios que comparen estos métodos para estimar la presión atmosférica.

Es de suma importancia realizar el control de calidad de datos de las presiones atmosféricas registradas por sensores automáticos, debido a que no son estables en el tiempo y la precisión del registro tiene una gran incertidumbre. Además, el caudal estimado que sale de una cuenca hidrográfica depende directamente de los registros de estos transductores

de presión. Si no se controlan las observaciones de presión atmosférica, los caudales calculados serán erróneos y por lo tanto las conclusiones que se obtengan de modelos, procesos y estudios hidrológicos no representarían la realidad del ecosistema estudiado. Sin duda, el primer paso para realizar un verdadero y eficaz estudio de los recursos hídricos es un adecuado monitoreo y un excelente control de datos generados, para en base a ello, se pueda obtener resultados correctos y tomar decisiones acertadas sobre la gestión integral de los recursos hídricos.

Si bien estos problemas son recurrentes, no se han encontrado estudios que documenten el efecto de la calidad de los datos de presión sobre el cálculo de caudales. El presente estudio analiza el efecto de la estimación de datos de presiones atmosféricas sobre el cálculo de niveles de agua y el efecto de éstos sobre la estimación de caudales. Como parte del estudio se analizaron los métodos de regresión lineal e interpolación y extrapolación lineal para la estimación de la presión atmosférica faltante.

## ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó con datos de los observatorios ecohidrológicos de Zhurucay y Soldados (ecosistemas de páramos), y Mazar (bosque montano). El río Zhurucay está ubicado al Sur del Ecuador en la parte occidental de los Andes, aproximadamente a 85 km al suroeste de la ciudad de Cuenca y es afluente del río Jubones que desemboca en el océano Pacífico. La cuenca alta del río Zhurucay (zona de estudio) tiene un área de drenaje de 7,97 km<sup>2</sup> y un rango altitudinal entre 3400 y 3900 m s.n.m. La red de monitoreo del observatorio consta de 2 estaciones meteorológicas, 10 estaciones hidrológicas anidadas (Tabla 1), 7 pluviógrafos, 1 disdrómetro laser, 1 radiómetro neto, TDRs y tensiómetros. Cada estación hidrológica consta de un vertedero de cresta delgada y de dos sensores transductores de presión que registran presiones atmosféricas absolutas para obtener el nivel de agua sobre el vertedero. La presión atmosférica promedio mensual registrada por los barómetros de las estaciones meteorológicas (ubicadas a diferentes alturas) varía de 700 cmH<sub>2</sub>O a 651 cmH<sub>2</sub>O.

**Tabla 1.** Estaciones hidrológicas y meteorológicas instaladas en los tres observatorios ecohidrológicos utilizados en el estudio.

Observatorio	Estación	Tipo	Coordenadas		Altura m s.n.m.
			UTM X	UTM Y	
Zhurucay	Vertedero 1	Estación Hidrológica	696736	9661710	3777
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	696472	9661714	3770
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	696156	9661244	3732
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	696173	9661194	3729
	Vertedero 5	Estación Hidrológica	695399	9660221	3767
	Vertedero 6	Estación Hidrológica	695778	9659800	3645
	Vertedero 7	Estación Hidrológica	696508	9659910	3680
	Vertedero 8	Estación Hidrológica	696668	9659678	3673
	Vertedero 9	Estación Hidrológica	696374	9658770	3495
	Vertedero 10	Estación Hidrológica	696515	9660616	3696
	Estación Base	Estación Meteorológica	696439	9661707	3780
	Estación Principal	Estación Meteorológica	697202	9656990	3290
Soldados	Vertedero 1	Estación Hidrológica	68778	9673747	3750
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	69004	9673270	3760
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	68818	9669424	3613
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	694043	9677048	3759
Mazar	Vertedero 1	Estación Hidrológica	757963	971806	2703
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	756845	971795	2864
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	756212	971798	2841
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	755086	971876	2952
	Hacienda La Libertad	Estación Meteorológica	756133	971857	2915

El observatorio de Soldados está constituido por cuatro microcuencas que forman parte de la sub-cuenca del río Soldados, que es afluente del río Paute y desemboca en el Océano Atlántico, las mismas que se encuentran al suroeste del Ecuador, cerca del Parque Nacional Cajas al occidente de la ciudad de Cuenca, y en un rango altitudinal entre 3200 y 4200 m s.n.m. En cada microcuenca se instaló una estación hidrológica que consta de un vertedero y transductores de presión (Tabla 1).

El observatorio de Mazar se encuentra en la estribación sur del Parque Nacional Sangay, situado en el lado oriental de la cordillera de los Andes, al suroeste del Ecuador. Las tres microcuencas estudiadas son parte de la cuenca del río Mazar, afluente del río Paute que desemboca en el Océano Atlántico. La cuenca se extiende desde los 2600 hasta 3500 m s.n.m. (Thompson, 2012). Las microcuencas monitoreadas igualmente se equiparon con vertederos y transductores de presión.

## SENSORES Y DATOS

Este estudio se realizó con los datos de 10 estaciones hidrológicas instaladas en el observatorio de Zhuruca y 4 estaciones hidrológicas en cada uno de los observatorios de Soldados y Mazar. Los datos corresponden al periodo junio de 2011 a diciembre de 2012. Para la obtención de los niveles de agua, cada estación hidrológica cuenta con dos sensores de presión diseñados para medir la presión absoluta. Además de medir las presiones absolutas, los sensores tienen incorporado un sensor de temperatura, que se usa para compensar al sensor de presión. Para tener una referencia de la presión atmosférica, en los observatorios de Zhuruca y Mazar se utiliza también el barómetro de la marca Vaisala (modelo CS106) instalado en las estaciones meteorológicas Campbell Scientific.

Para medir el caudal que circula por el cauce de la quebrada, cada estación hidrológica consta de un vertedero compuesto por una sección triangular y una sección rectangular. El objetivo de utilizar vertederos combinados es para poder medir con mayor precisión tanto los caudales bajos (sección triangular) como los caudales extremos (sección compuesta) (Céleri et al, 2012a). Para estimar el caudal a partir de los niveles de agua registrados por los sensores de presión, se utiliza la ecuación formulada por Bergamann (1963). La ecuación (1) es válida para un vertedero compuesto por una sección triangular con un ángulo de 90° en el vértice y una sección rectangular sin contracciones laterales, además que la lámina de agua que pasa sobre el vertedero debe ser libre (aireado).

$$Q = \left( 1.37 * \left( h^{\frac{5}{2}} - (h - H)^{\frac{5}{2}} \right) + (1.77 * B * (h - H))^{\frac{3}{2}} \right) \quad (1)$$

En la ecuación propuesta por Bergamann (1963):  $Q$  es el caudal expresado en m<sup>3</sup>/s,  $h$  es la altura de agua (metros) desde la platina del vertedero,  $H$  es la altura (metros) de la sección triangular, y  $B$  es la longitud (metros) combinada de las porciones horizontales del vertedero compuesto.

Para medir la altura sobre el nivel del mar de las estaciones hidrológicas se utilizó un altímetro marca Techtrail, el mismo que funciona como un barómetro de alta precisión y mediante relaciones de altura-presión obtiene la altura de un sitio determinado (Techtrail manual, 2010). Para obtener las coordenadas (UTM) de las estaciones se utilizó un GPS marca Garmin (Garmin manual, 2010).

## ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Para estimar los datos de presión atmosférica se utilizaron dos métodos: la regresión lineal y la interpolación o extrapolación lineal.

### Regresión lineal

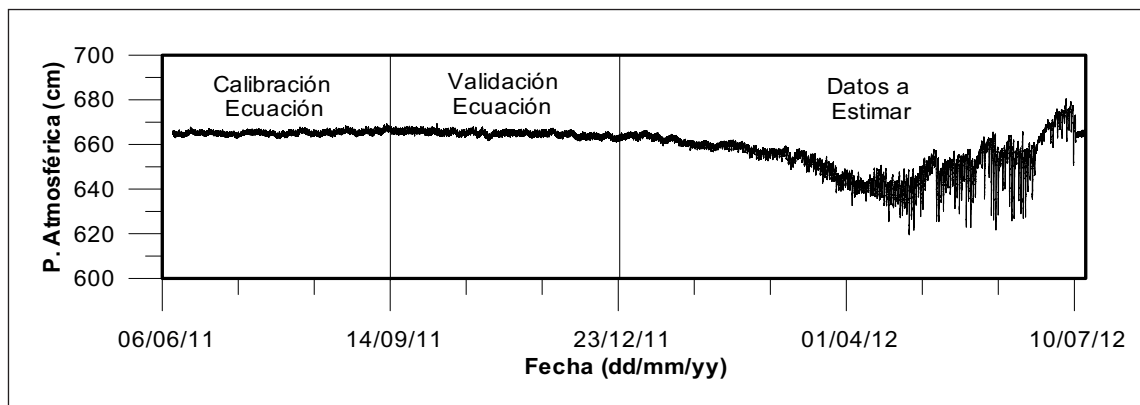
Al ser la presión atmosférica una variable continua en el tiempo y ser función de la altura sobre el nivel del mar (Whiteman, 2000; Eslava, 1991; Ven Te Chow, 1996), se plantea como primera opción para la estimación de la presión atmosférica, la regresión lineal entre los datos de los barómetros de diferentes estaciones hidrológicas (e.g. Soldados), o entre los barómetros de una estación meteorológica cercana y una estación hidrológica (e.g. Zhuruca y Mazar). Si bien se conoce que la presión es una función exponencial de la altura, para pequeñas diferencias de presión entre estaciones (máxima diferencia 40 cmH<sub>2</sub>O) se asume que la presión varía linealmente. Para esto la serie de datos se divide en tres periodos: dos periodos de tiempo con datos completos para calibrar y validar la ecuación lineal y un tercer periodo que tiene problemas de datos y en el cual se aplicará el método de estimación o relleno (ver Figura 1). Para cada caso de estudio se tomó un periodo de datos de 4 meses con una frecuencia de 5 minutos (35136 datos) tanto para la calibración como para la validación de la ecuación de regresión lineal. El periodo común de datos fue diferente para cada estación, ya que éste depende de la calidad de datos que se tenga de cada sensor. En la ecuación (2) se muestra la ecuación lineal en la que  $Y_i$  es la presión estimada,  $X_i$  es la presión observada, y  $a$  y  $b$  son los coeficientes de la regresión.

$$Y_i = a + bX_i \quad (2)$$

Para medir la bondad de ajuste entre las series correlacionadas se usa el coeficiente de determinación  $R^2$  y el criterio de la pendiente de la recta. Para validar la ecuación lineal se utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ), que indica la eficiencia del método uti-

lizado para estimar la presión atmosférica (Nash and Sutcliffe, 1970), y el coeficiente de determinación  $R^2$ . Para determinar el error entre los datos generados por la ecuación lineal respecto a los datos reales observados por los barómetros, se utiliza el sesgo

residual (bias) y el sesgo absoluto (Abs bias) (Tabla 2). Los índices bias, Abs bias,  $R^2$  y  $E_{NS}$ , en general, se usan para determinar el error, la calibración, validación y rendimiento de modelos hidrológicos (Vázquez y Feyen, 2002; Wang et al, 2009).



**Figura 1.** Datos de presión atmosférica del vertedero 2 del observatorio de Soldados (3760 m s.n.m.) divididos en los periodos de tiempo utilizados para calibrar y validar la ecuación y el periodo de datos no confiables que deben ser estimados.

**Tabla 2.** Criterios estadísticos usados en el estudio. X = datos estimados, Y = datos observados.

Sesgo residual	Sesgo absoluto
$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$	$Abs.bias = \frac{\sum_{i=1}^n \ X_i - Y_i\ }{n}$
Coeficiente de Determinación	Coeficiente de Nash – Sutcliffe
$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \right)^2$	$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$

La FAO (2006) recomienda que el valor de  $R^2$  de la regresión sea mayor a 0,7 y que la pendiente de la recta (ecuación 2) esté dentro del rango  $0,7 < b < 1,3$ , lo que indica buenas condiciones de los datos y la suficiente homogeneidad como para sustituir los datos que faltan en la serie incompleta. De manera similar el coeficiente de Nash – Sutcliffe ( $E_{NS}$ ) indica cuán eficiente es la ecuación de regresión lineal; su valor oscila entre  $-\infty$  y 1, siendo 1 el valor óptimo (Nash y Sutcliffe, 1970). A pesar de la bondad de ajuste del  $R^2$ , el coeficiente de  $E_{NS}$  es más sensible

al ajuste (Vázquez y Feyen, 2002). Además para las correlaciones entre presiones atmosféricas, en el periodo de validación, se utiliza el valor  $p$  como índice de significancia estadística. El valor  $p$  indica la probabilidad de que un resultado sea debido al azar, es decir cuando menor sea el valor de  $p$ , más significativo será el resultado. El sesgo residual (bias) es similar al error medio, indica en manera de promedio, si el método de relleno está sobrestimando o subestimando las lecturas. El resultado del bias puede ser cero, pero ese valor no indica que las series de datos



sean iguales, ya que los valores positivos y negativos se pueden compensar. Para evitar este error se introduce el sesgo absoluto (Abs bias). Este parámetro indica cuán alejadas están las series de datos sin importar si las observaciones sean positivas o negativas. Los errores cuantificados por los índices estadísticos se comparan con las especificaciones técnicas (precisión de 5 mm) de los sensores para determinar si los métodos de rellenos son óptimos o no.

### Interpolación/extrapolación lineal

A partir de los datos completos (sin vacíos) de dos barómetros y de las respectivas alturas en las cuales se encuentran, se puede interpolar o extrapolar las presiones para una tercera estación. La interpolación y/o extrapolación está fuertemente condicionada por la exactitud en la determinación de la altitud del sitio de ubicación de los sensores, ya que errores en las diferencias de alturas entre los vertederos provocará errores en la estimación de la presión atmosférica. La ecuación (3) se utiliza para realizar la interpolación, donde  $P_{3i}$  es la presión estimada (cm) a partir de las presiones observadas  $P_{1i}$  y  $P_{2i}$ , y  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  son las alturas de las tres estaciones (m s.n.m.). Otra ecuación similar se usa para la extrapolación. Para aplicar este método es necesario que las 3 series de tiempo tengan datos coincidentes en un mismo periodo de tiempo. Esta serie se divide en 2 periodos, uno para calibrar y validar la ecuación (al comparar datos estimados con observados) y el otro donde es necesario estimar los datos.

$$P_{3i} = P_{2i} - \frac{(H_2 - H_3)(P_{2i} - P_{1i})}{(H_2 - H_1)} \quad (3)$$

Para comparar la eficiencia de los 2 métodos de estimación, los periodos de datos de calibración, validación y estimación fueron los mismos para los 2 métodos. Los índices estadísticos utilizados en el método de la regresión lineal también fueron utilizados para este método.

Finalmente, para el mejor método de estimación se analizó la sensibilidad del número de datos necesarios para calibrar la ecuación lineal, y se determinó cómo esto afecta la eficiencia en la estimación de la presión atmosférica para el periodo de validación de la ecuación, que en general es de 4 meses (35136 datos) para los tres observatorios. Para ello se obtuvieron ecuaciones para periodos de calibración de 4, 3, 2, 1 meses y 1 día. Estas ecuaciones se utilizaron para estimar los datos en el periodo de validación (4 meses), calculándose en cada caso la eficiencia y el error.

### EFFECTO DE LA ESTIMACIÓN DE DATOS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CÁLCULO DE CAUDALES

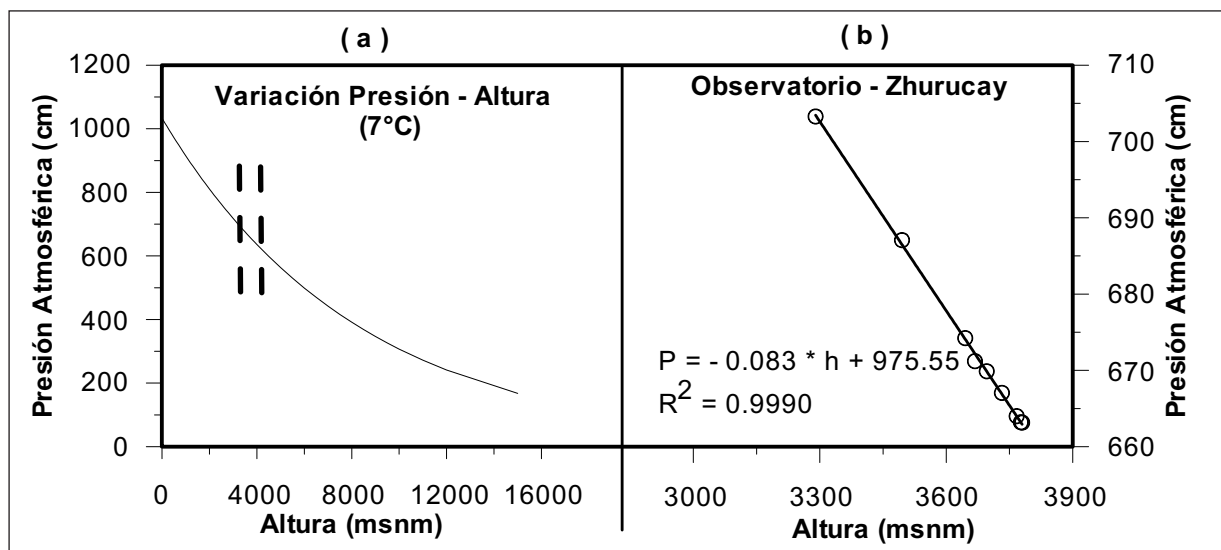
Para este estudio se emplearon los datos del periodo de validación de las ecuaciones. El caudal se calculó con la ecuación del vertedero (ecuación (1)), en función de la altura de agua estimada a partir de la compensación de datos de presión. La compensación se realizó con los datos de presión observados y con los estimados, con los que se obtuvo una serie de caudales observados y una de caudales estimados. Para determinar el error introducido por la presión estimada sobre el cálculo del caudal se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el sesgo absoluto como porcentaje (%Abs bias). El  $R^2$  se utilizó para determinar la correlación entre los caudales observados y los caudales estimados, y el %Abs bias para cuantificar el error absoluto entre las dos series de caudales. De igual forma que en la estimación de la presión atmosférica, para determinar si el resultado de las correlaciones entre caudales es estadísticamente significativo se calculó el valor  $p$ . Para no tener un criterio sesgado del efecto de la estimación de la presión sobre el cálculo del nivel de agua y caudal, se adopta los rangos de aceptabilidad para el %Abs bias propuestos por Tokay et al, (2010), ver Tabla 3.

**Tabla 3.** Criterio de calificación del desempeño del método según el índice de porcentaje de sesgo absoluto (%Abs bias) (Tokay et al, 2010), para comparación entre serie de datos de caudales estimados y observados.

%Abs bias	Desempeño
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Mal

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se había planteado en el estudio, la presión atmosférica varía linealmente con la altura en el rango altitudinal estudiado (Figura 2b). En el observatorio de Zhurucay se encontró un  $R^2=0,99$  y la pendiente de la línea de regresión fue de -0,08 cm/m, valor que se asemeja a la gradiente de la presión dada por la WMO (2008) de -0,1 cm/m. Para el observatorio de Soldados la gradiente de la presión fue de -0,077 cm/m con un  $R^2$  de 0,99 y para el observatorio de Mazar la gradiente fue de -0,095 cm/m con un  $R^2 = 0,97$ .



**Figura 2.** (a) variación teórica de la presión atmosférica respecto a la altura a 7°C. Las líneas entrecortadas representan el intervalo de altura en que están instalados los sensores de presión en el observatorio de Zhurucay (3000 – 4000 m s.n.m.). (b) variación de la presión atmosférica media respecto a la altura registrada por los sensores instalados en el observatorio (círculos) y la línea de tendencia que sigue la presión.

### Estimación de la presión atmosférica

En el observatorio de Zhurucay se obtuvo buenos resultados tanto en la calibración como en la validación de la ecuación de regresión lineal (Tabla 4), alcanzando un  $R^2$  que varía entre 0,86 y 0,98 para la calibración y de 0,81 a 0,96 para la validación de la ecuación, coeficientes que están dentro del rango recomendado por la FAO (2006). De igual forma, la pendiente de la ecuación de regresión lineal varía entre 0,91 y 1,13, valores que están dentro del rango de 0,7 a 1,3 (FAO, 2006). Esto indica que se tienen buenas condiciones y suficiente homogeneidad para estimar o rellenar los datos que faltan en la serie in-

completa. Las ecuaciones lineales utilizadas para el relleno tuvieron una alta eficiencia de acuerdo al coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ). Se determinaron valores de  $E_{NS}$  entre 0,72 y 0,96 (Tabla 4), y para todos los casos el valor p fue menor a 0,01 y por lo tanto se tiene una confianza del 99% sobre la correlación de las variables. Los errores de la presión atmosférica calculados con el Abs bias y bias, de las ecuaciones lineales respecto a los valores reales de observación, están dentro del rango de precisión de los barómetros dados por el fabricante (0,5 cm) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Resultados estadísticos de la validación de las ecuaciones de regresión lineal para la estimación de datos de presión atmosférica en el observatorio de Zhurucay.

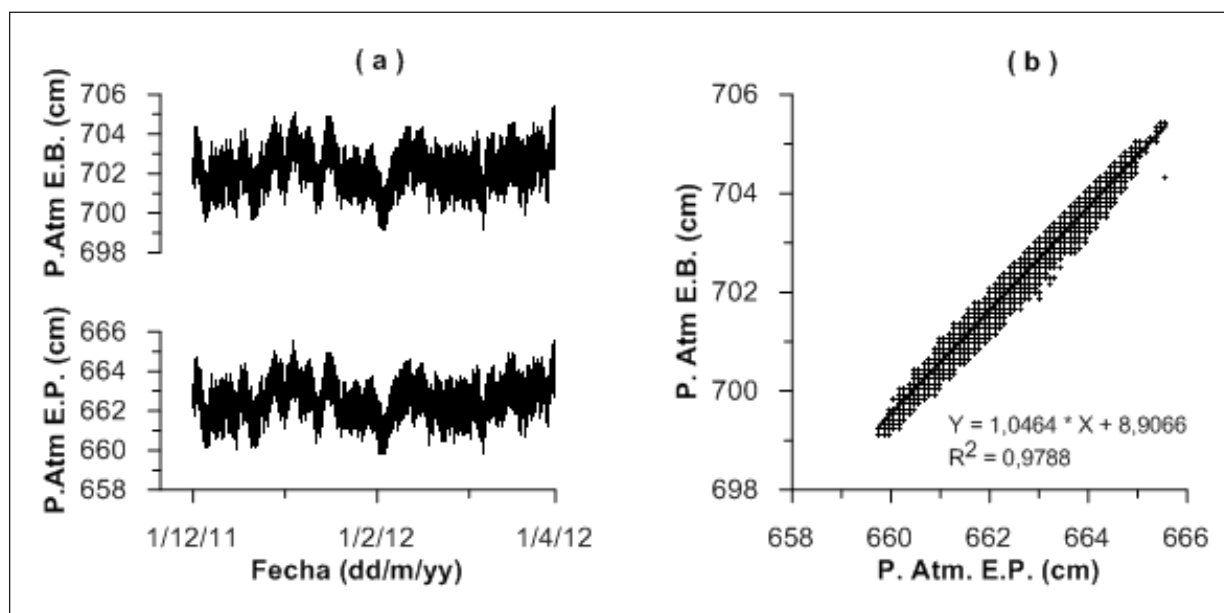
Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Calibración		Validación				
		b	R2	R2	1 - p value	$E_{NS}$	Abs bias (cm)	bias (cm)
Meteo. Principal	3780	-	-	-		-	-	-
Vertedero 1	3777	1.08	0.9097	0.9322	1,00	0.8561	0.31	0.26
Vertedero 5	3767	1.02	0.9572	0.9324	1,00	0.7219	0.42	0.41
Vertedero 3	3732	1.04	0.9654	0.9575	1,00	0.9496	0.17	-0.06
Vertedero 10	3696	0.91	0.947	0.9209	1,00	0.864	0.27	0.2
Vertedero 7	3680	0.97	0.8596	0.8083	1,00	0.7537	0.41	0.22
Vertedero 6	3645	1.04	0.9659	0.9698	1,00	0.9592	0.19	0.1
Vertedero 9	3495	1.13	0.9233	0.8985	1,00	0.8967	0.29	0.01
Meteo. Base	3290	1.04	0.9788	0.9492	1,00	0.9648	0.17	0.024

En la zona de estudio de Soldados, la regresión lineal se realizó entre los registros de los sensores de presión de las estaciones hidrológicas. Al igual que en la zona de Zhurucay los resultados son buenos en la calibración y validación de la ecuación de regresión lineal. Se encontraron valores de  $R^2$  superiores a 0,9 y pendientes entre 0,89 y 1,02. Además los errores promedios fueron menores a 0,5 cm, que es la precisión de los barómetros. Se obtuvieron eficiencias  $E_{NS}$  entre 0,8 y 0,9.

En el observatorio de Mazar, las regresiones lineales se realizaron respecto a los registros de presión atmosférica del barómetro instalado en la estación meteorológica. En Mazar los datos de presión atmosférica presentan mucho mayor ruido que en los otros dos observatorios y los sensores se dañan con mayor frecuencia. De todas maneras, incluso en este caso los coeficientes de determinación variaron entre 0,71 y 0,86, con pendientes de las ecuaciones de calibración entre 0,98 y 1,07. Las eficiencias ( $E_{NS}$ )

de las ecuaciones de regresión estuvieron entre 0,62 y 0,82. Sin embargo los errores producidos no están tan alejados de rango de precisión, con Abs bias entre 0,56 y 0,77 cm.

Se encontró además que no existe una correlación entre los coeficientes de determinación y la altura y distancia entre los sensores analizados. Para cualquier diferencia de altura y distancia entre sensores, los coeficientes de determinación fueron altos ( $R^2 > 0,7$ ). La mejor regresión lineal se encontró entre las estaciones meteorológicas de Zhurucay (Figura 3b), entre las cuales existe la mayor diferencia de altura (490 m) y distancia (4778 m). En síntesis, se puede concluir que la eficiencia de la regresión lineal es alta, lo cual se debe a que la presión atmosférica varía en forma similar (forma sinusoidal, Eslava, 1991) en cada observatorio estudiado, aunque las magnitudes de la presión sean diferentes entre los sensores (Figura 3a).



**Figura 3.** Regresión lineal entre los datos registrados por el barómetro de la estación principal y de la estación base, (a) variación de las presiones atmosférica registradas por los barómetros de las estaciones meteorológicas. (b) gráfica de dispersión entre los datos.

El método de interpolación/extrapolación dio resultados de inferior eficiencia en comparación con el método de regresión lineal. Para las zonas de estudio de Zhurucay y Mazar, si bien los coeficientes de determinación son buenos ( $R^2 > 0,811$  para Zhurucay y  $R^2 > 0,71$  para Mazar), los errores medios entre las presiones observadas y estimadas fueron altos (entre 2,5 y 4,4 cm en Zhurucay y 5,4 cm en Mazar) y los coeficientes de eficiencia ( $E_{NS}$ ) resultaron negativos en la mayoría de los casos. La principal causa para que las interpolaciones y extrapolaciones sean ineficientes es que la variación de la presión con la altura no es perfectamente lineal y si bien cuando

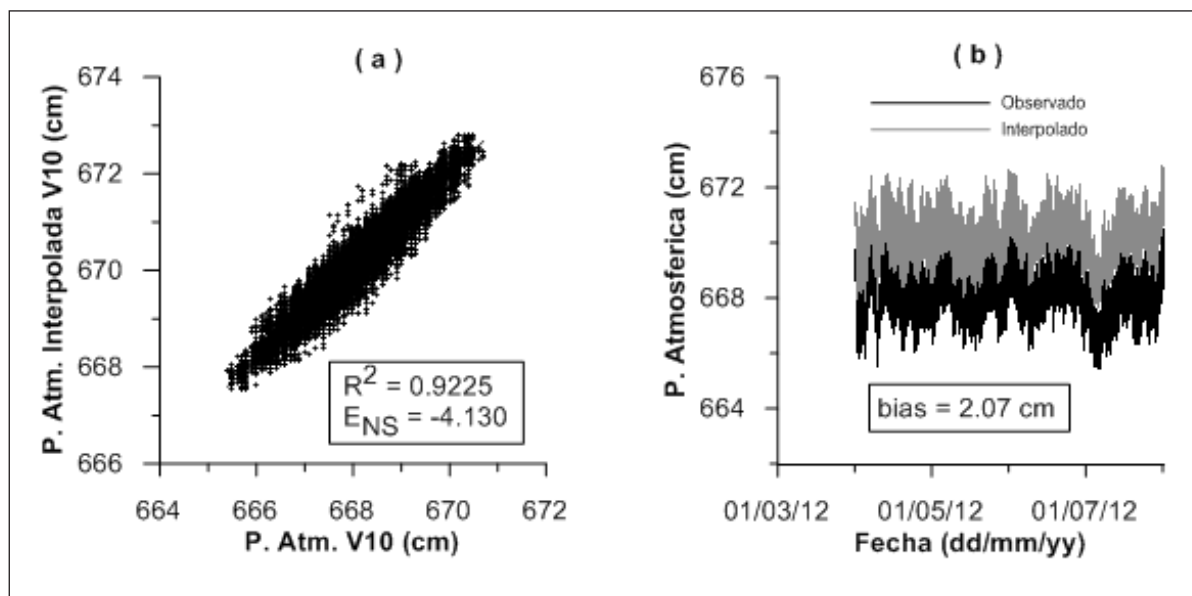
hay pequeños desniveles la relación es muy cercana a la lineal (demostrada por buenos valores de  $R^2$ ), las variaciones son suficientemente fuertes para ocasionar alto error y un bajo  $E_{NS}$ . Esto último incluso puede darse simplemente por no poder medir con precisión las elevaciones a las que se encuentran los sensores. Un ejemplo de interpolación se muestra en la Figura 4. Se observa que la presión interpolada sobrestima los valores, obteniendo un bias 2,07 cm. A pesar de existir una buena correlación entre los datos observados y estimados, la eficiencia es baja. Como se puede ver en la Figura 4b, la variación de la presión de las dos series es similar



pero se encuentra desfasada 2,07 cm hacia arriba; el problema se da porque probablemente la altura a la que está el sensor (vertedero 10) no fue medida correctamente.

También se encontró que no existe una buena relación entre  $E_{NS}$  y la altura o distancia a la estación a ser interpolada. La más baja eficiencia de interpolación se dio entre las estaciones que tienen menor diferencia de altura (3 m) y distancia (200 m), con un

$E_{NS} = -0,88$ . Por el contrario para una diferencia de altura (490 m) y distancia (4778 m) mayores el  $E_{NS}$  fue de 0,64; para las demás variaciones de distancia y altura el  $R^2$  y  $E_{NS}$  no sigue una tendencia definida. Con lo anterior se sostiene más aún que para el método de interpolación y extrapolación lineal depende de una correcta estimación de la altura de las estaciones y la buena calidad de los datos con los que se va a interpolar.



**Figura 4.** Estimación por interpolación de la presión atmosférica de la estación hidrológica 10 del observatorio de Zhurucay. Ecosistema de páramo – 3696m s.n.m. (a) Correlación lineal entre la presión atmosférica observada por el sensor y estimada mediante interpolación. (b) Error entre las presiones observadas y estimadas.

Para el caso de Soldados, al estar las tres estaciones hidrológicas prácticamente a la misma altura (10 m) y tener datos de buena calidad, los resultados de interpolación y extrapolación son buenos. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) están alrededor de 0,92, el coeficiente de Nash-Sutcliffe está entre 0,7 y 0,9 y los errores entre la presión estimada y observada alrededor de 0,5 cm.

De este análisis se concluye que el método de regresión lineal es mejor que el de interpolación/extrapolación y que además de los buenos resultados, la facilidad de aplicación para la estimación y relleno de datos de la presión atmosférica lo vuelven muy atractivo.

#### Efecto de la estimación de la presión atmosférica sobre el caudal

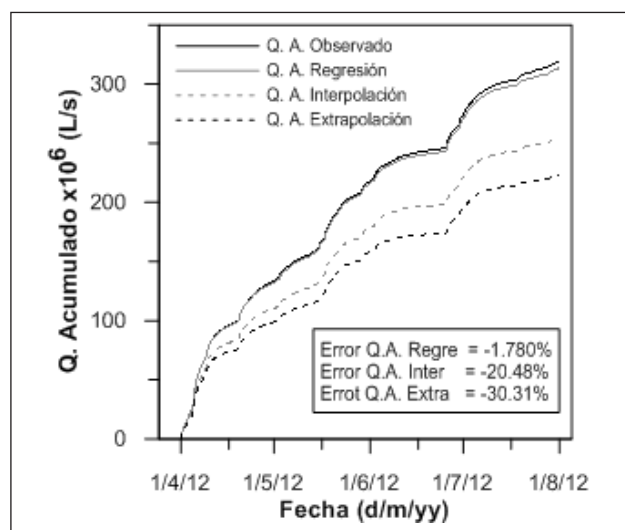
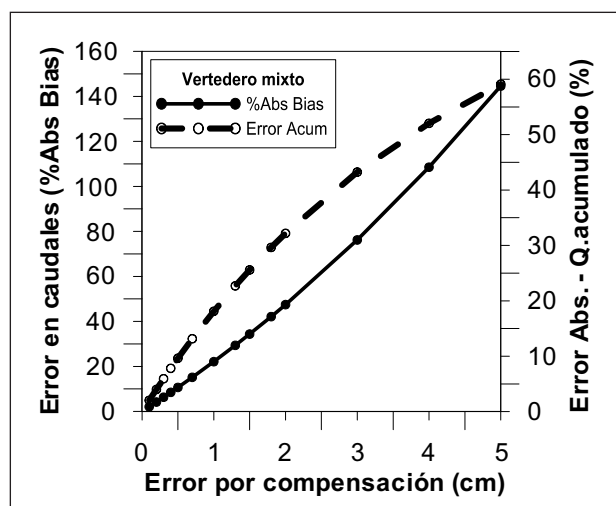
Los caudales calculados a partir de la presión atmosférica estimada mediante regresiones lineales

mostraron errores relativamente bajos. Los errores medios del caudal calculado con la presión atmosférica estimada respecto a la observada resultaron menores al 5% en 16 de los 18 casos analizados, lo cual los ubica dentro del rango de estimación excelente según el criterio adoptado (Tabla 5). De igual forma las correlaciones lineales medidas con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), entre los caudales observados y los caudales estimados son altas, llegando prácticamente a ser 1, y con un valor de p menor a 0,01 para todos los casos. Por otra parte, el error relativo en caudales acumulados no supera el 5%. Estos resultados corroboran la excelente precisión alcanzada para los caudales estimados. Únicamente en 2 vertederos de Mazar (vertederos 2 y 4), el %Abs bias superó el 10%, lo cual ubica a la estimación dentro del rango calificado como bueno. Sin embargo, aún en este caso el error en los caudales acumulados es menor al 5%, por lo que su impacto en estudios de balance hídrológico será aceptable.

**Tabla 5.** Resultados estadísticos del error en el cálculo de caudales debido a la estimación de la presión atmosférica mediante regresiones lineales. Observatorio de Zhurucay.

Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Validación					
		R2	1 - p value	Abs bias (cm)	Abs bias (%)	bias (l/s)	% Error Acumulado
Meteo. Principal	3780	-		-	-	-	-
Vertedero 1	3777	0.9961	1,00	0.43	6.32	-0.3	-5.02
Vertedero 5	3767	0.9987	1,00	1.07	4.37	-0.86	-4.05
Vertedero 3	3732	0.998	1,00	0.36	2.71	0.11	0.99
Vertedero 10	3696	0.9987	1,00	0.97	2.75	-0.53	-1.78
Vertedero 7	3680	0.9963	1,00	5.36	4.62	3.32	3.43
Vertedero 6	3645	0.9997	1,00	0.23	2.72	-0.17	-2.22
Vertedero 9	3495	0.9964	1,00	11.25	4.45	-1.04	-0.41
Meteo. Base	3290	-		-	-	-	-

Por otro lado, los caudales calculados a partir del uso de la extrapolación lineal para estimar la presión atmosférica muestran resultados distintos en los 3 observatorios. En el observatorio de Soldados los errores en la estimación de los caudales son mínimos, siendo inferiores al 5% en las 4 estaciones hidrológicas. Esto se da porque todos los vertederos están prácticamente a la misma altura sobre el nivel del mar, con una diferencia menor a 10 m entre estaciones. Sin embargo, en los observatorios de Zhurucay y Mazar el error en la estimación de los caudales es alto, llegando a obtener un %Abs bias de hasta 30% en Zhurucay y 86% en Mazar, lo que los ubica en el rango de pésimos según los rangos de desempeño adoptados (Tabla 3). Esto sugiere que el método de interpolación y extrapolación lineal de presiones atmosféricas, no es aplicable para el relleno de datos. La Figura 5 muestra los grandes errores encontrados en los caudales acumulados, a diferencia del método de regresión lineal para el cual el error es mínimo (-1,78%).

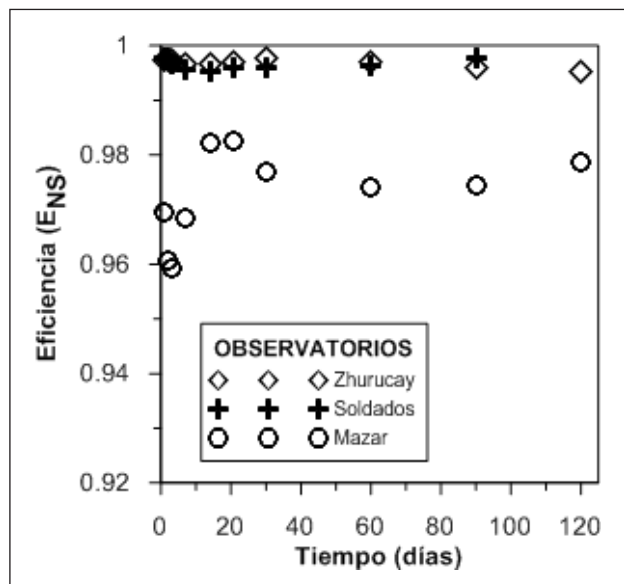
**Figura 5.** Caudales acumulados observados y calculados a partir de diferentes métodos de estimación de la presión atmosférica. Vertedero 10 – Zhurucay, 3696 m s.n.m.**Figura 6.** Análisis de sensibilidad del error en el caudal producido por el error en la estimación de la presión atmosférica. Vertedero compuesto 01 de Zhurucay para datos de 2012.

Por otro lado, en un análisis realizado para el vertedero compuesto número 1 del observatorio de Zhurucay con datos del año 2012, se introdujo un error de 0,5 cm (precisión de los sensores) a las mediciones del nivel de agua durante toda la serie de tiempo (i.e. año hidrológico). Como resultados se obtuvo un error medio anual del caudal del 10% (%Abs bias) y un error relativo acumulado del -9.64%. La figura 6 muestra el resultado de un análisis de sensibilidad del error en el cálculo del caudal respecto al error en la estimación de la presión atmosférica. Se observa que el error en el caudal (medido con el %Abs bias) crece de manera exponencial respecto al error producido en la estimación de la presión atmosférica (desfase en cm), y el error absoluto en volumen de caudal acumulado de manera logarítmica. Si se toma como referencia que un error de 10 % de sesgo absoluto es muy bueno según el criterio de la tabla 3, a partir de un error superior a 0,5 cm en la estimación de la presión atmosférica el error en el caudal

se hace significativo (Figura 6). Es decir, si se realizara un cierre de balance hídrico anual en la microcuenca del vertedero 1, solo por los datos de entrada de caudales potencialmente se tendría un error del 9.64% en el balance, producido por un desfase de 0,5 cm en los niveles de agua. Por tal motivo es de vital importancia controlar los niveles de agua reales que pasan por los vertederos y compararlos con los niveles compensados que entregan los sensores automáticos.

#### Sensibilidad de la calibración de la ecuación de regresión lineal a la extensión del periodo de datos disponibles

Los resultados revelan que, para los tres observatorios, cualquier duración del periodo de calibración de la ecuación (de 4 meses a 1 día tomados con una frecuencia de 5 minutos) produce excelentes resultados, encontrando coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe superiores a 0,96 (Figura 7). Es decir, que para hacer un relleno de datos entre dos sensores de presión, lo mínimo que se necesitaría es 1 día de registros con una frecuencia de 5 min. La explicación radica en que con un día de registro de datos se cubren los valores máximos y mínimos de la variación diaria de la presión atmosférica. Como en el resto del tiempo (días) la variación de la presión es similar (Eslava, 1991), la estimación de la presión con la ecuación calibrada produce errores mínimos (menores a 5 mm). En particular, debido a la calidad de los datos, en el observatorio de Mazar la eficiencia fue menor (entre 0,96 y 0,98) comparada a los observatorios de Zhurucay y Soldados ( $E_{NS}$  mayores a 0,99).



**Figura 7.** Análisis de sensibilidad de la calibración de la ecuación de regresión lineal. Eje x: periodo de datos usados para la calibración de la ecuación. Eje y: eficiencia en el periodo de validación de la ecuación calibrada. ( $E_{NS}$ ).

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo por objetivo determinar la magnitud en la que la estimación de datos de presión atmosférica (registrado por sensores automáticos) afectan al cálculo del nivel de agua en pequeños cauces, y cómo éstos a su vez afectan la estimación de caudales. Según la bibliografía revisada, para los Andes no existen estudios que se enfoquen en el control de calidad de los datos y en los efectos que producen sobre los procesos hidrológicos. Por otra parte, existen varios estudios con modelos hidrológicos que identifican que la deficiencia del modelo se da por la incertidumbre en los datos de entrada. Por lo tanto, el estudio es de alta importancia en el campo de la hidrología y en particular para los ecosistemas altoandinos, donde las labores de monitoreo son más complejas debido a las dificultades de acceso. El estudio fue realizado con datos de 3 observatorios ecohidrológicos ubicados entre los 2600 y 4200 m s.n.m al sur del Ecuador.

Para el relleno de datos faltantes o registrados incorrectamente por los sensores se plantearon dos métodos de relleno: regresión lineal e interpolación/extrapolación lineal. Además fue de interés identificar el periodo mínimo de datos requeridos en las estaciones barométricas para identificar ecuaciones de estimación confiables.

Al finalizar el estudio se concluyó que el mejor método para el relleno de datos de presión atmosférica en los tres observatorios es el método basado en regresiones lineales. Se obtuvo coeficientes de eficiencia medidas con Nash-Sutcliffe mayores a 0,71. Esto quiere decir que cuando se pierdan datos de presión atmosférica en un sitio es posible rellenarlos si se cuenta con observaciones realizadas en un sitio cercano. Además, los errores de sesgos absolutos (Abs bias) fueron menores a 0,5 cmH<sub>2</sub>O, valor que corresponde a la precisión especificada de los barómetros utilizados en el estudio. La eficiencia alcanzada con las regresiones no tuvo una relación con respecto a la altura y distancia entre los sensores analizados.

Se encontró que el error producido al calcular el caudal a partir de datos de presión atmosférica estimada con regresión lineal es bajo y está en el rango de excelente (%Abs bias < 5%) a muy bueno (%Abs bias < 10%). Este resultado confirma que el relleno de datos de caudal, cuando se ha perdido la serie de datos de presión, es posible y tiene un alto grado de confiabilidad. Por otra parte, el método de interpolación y extrapolación lineal produjo errores en el cálculo del caudal de hasta un 86 % (%Abs bias), esto debido principalmente a la dificultad de estimar con precisión las alturas sobre el nivel del mar a las que se encontraban los sensores y a la calidad de los datos para realizar las interpolaciones.

Finalmente el estudio mostró que es necesario tener un registro de datos de al menos un día en el sitio donde se desea estimar la presión atmosférica para calibrar la ecuación de regresión. En el análisis de

sensibilidad se encontró valores de  $E_{NS}$  mayores a 0,96 para periodos de calibración de entre 1 día y 4 meses usando datos registrados cada 5 minutos.

A futuro deberán estudiarse los efectos de la precisión de los sensores sobre el cálculo de caudales y su impacto sobre el balance hidrológico de las cuencas. Otro tema de interés es el diseño de estrategias costo-efectivas de monitoreo utilizando una combinación de tecnologías avanzadas disponibles.

## AGRADECIMIENTOS

El estudio fue posible gracias a los proyectos PIC-08-460 y PIC-11-715 financiados por la SENES-CYT y la Universidad de Cuenca. El trabajo en los 3 observatorios ecohidrológicos tuvo el apoyo de varias personas y organizaciones. Se agradece a CELEC EP, Unidad de Negocio Hidropante, a Catherine Schloegel de la Fundación Cordillera Tropical y Stuart White de la Reserva de Vida Silvestre Mazar por el apoyo para implementar el observatorio Mazar; a IAMGOLD Ecuador por el apoyo logístico en Zhurucay; mientras que en Soldados se contó con la colaboración de los propietarios de los predios Sr. Jackson Fernández y Sr. Fernando Arias, así como del personal técnico y las autoridades de ETAPA - Parque Nacional Cajas.

## REFERENCIAS

Achig, A., 2009. Análisis del hábitat del oso andino (*Tremarctos ornatus*) en el bosque siempre verde montano y perspectiva comunitaria del conflicto humano – oso, Parque Nacional Sangay, Ecuador. Tesis de Master. Universidad de Costa Rica.

Amaya, G., Tamayo, C., Vélez, M., Vélez, J., Álvarez, O. 2009. Modeling the hydrological behavior of three catchments in the Uraba Region – Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*. Medellín – Colombia 19: 21 - 38.

Bergmann, J.M. 1963. Compound Weir Study. Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-505, Bureau of Reclamation.

Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R. 2004b. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews* 79: 53 – 72.

Cuarteras, L., Tomasella, J., Nobre, A., Nobre, C., Hodnett, M., Waterloo, J., De Oliveira, S., Randow, R., Trancoso, R., Ferreira, M. 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of Hydrology*, 462–463, 15–27.

Céleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., Villacís, M. 2012a. Guía Metodológica para el Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos. Iniciativa de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos – IMHEA, 21 p.

Céleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., Llambí, L., Soto, A., Borja, P. 2012b. Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino, capítulo 2.

Céleri, R., Feyen, J. 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status and perspectives. *Mountain Research and Development* 29: 350 - 355.

Crespo, P., Feyen, J., Wouter, B., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H., Ramírez, M. 2011. Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology* 407: 164–174.

De Bièvre, B., 2002. Water Demand-Supply and Administrative Management in Medium Sized irrigation Schemes in the Sierra of Ecuador.» Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven.

Eslava, J., 1991. Variación Temporal de la Presión Atmosférica en Bogotá. *Academic Science Colombia* 18 (69): 175-181.

ETAPA, 2003. Plan del Manejo del Parque Nacional El Cajas. Descripción biofísica de la zona, publicación interna.

FAO, 2006. Irrigation and Drainage Paper: Statistical analysis of weather data set. Food and Agriculture Organization, p 229 - 244.

Gribovszki, Z., Kalicz, P., Szilágyi, J. 2013. Does the accuracy of fine-scale water level measurements by vented pressure transducers permit for diurnal evapotranspiration estimation?. *Journal of Hydrology* 488: 166–169

Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., Cisneros, F. 2008. Importancia de la Hidropedología en la Determinación de Procesos Hidrológicos a Escala de Ladera en Zonas de Páramo. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Quito.

Liu, Y., Feer, J., Beven K., Matgen, P. 2009. Towards a limits of acceptability approach to the calibration of hydrological models: Extending observation error. *Journal of Hydrology* 367: 93 – 103.

Ochoa, B., De Bièvre, B., Crespo, P., Villazón, M., Céleri, R., Gualpa, M., Cedillo, S. 2013. Problemas con la compensación de datos por presión barométrica y temperatura en sensores de nivel Schlumberger. IMHEA, publicación interna.

Pao-Shan Yu, Tao-Chang Yang, Shen-Jan Chen. 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall - runoff model. *Journal of Hydrology* 244: 43 – 59.

Possia, N., Cerne, B., Campetella, C. 2003. Análisis Preliminar de la Tendencia de Presión en Argentina. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

- Quichimbo, E., 2011. Estudio comparativo de los modelos NAM y DBMM. Facultad de Ingeniería - Universidad de Cuenca, tesis de pregrado.
- Sorensen, Linda, 2006. Introduction to the Practice of Statistics. United States of America: W. H. Freeman and Company.
- Thompson, S., 20012. Análisis histórico de la cobertura del suelo de la subcuenca del bajo río Mazar. Fundación Cordillera Tropical (FCT).
- Tokay, A., Bashor, P., McDowell, V. 2010. Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid - Atlantic Region. Journal of Hydrometeorology, pag: 553 - 565.
- Vázquez, R., J. Feyen., 2002. Effect of potential evapotranspiration estimates on effective parameters and performance of the MIKE SHE-code applied to a medium-size catchment. Journal of Hydrology 270: 309 - 327.
- Ven Te Chow, Maidment, D., Mays, L. 1996. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, p 58 – 62.
- Wang, Y., Traore, S., Kerh, T. 2009. Computational performance of reference evapotranspiration in semi-arid zone of Africa. Scientific Research and Essay 4: 577 - 583.
- Whiteman, D., 2000. Mountain Meteorology, Fundamentals and Applications. Oxford University Press. New York, USA, 450 p
- WMO, 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organization.