

Method for barometers calibration based on radiosonde observations

Luis G. Hidalgo

Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Teléfonos: 0212-6053208; 0212-2399792. Fax 0212-6053039. E-mail: lhidalgo@reacciun.ve

Abstract

A new method to calibrate fixed and portable barometers is described and tested: The method is based on data from the World Net of Radiosonde (WNR). The World Meteorological Organization (WMO) coordinates the WRN operations. A demonstration of the method that includes the calibration of a pair of barometers used jointly gave a standard estimation error of ± 0.49 hPa (1014-779 hPa). The level of that error permits the use of the pair in meteorological applications. An additional test of validation was undertaken successfully. The method was developed for the continental equatorial area of South America, although, there is no restrictions to its use in other tropical areas covered by the WNR.

Key words: Calibration, barometer, radiosonde, South America.

Método para calibrar barómetros basado en radiosondeos

Resumen

Un método nuevo para calibrar barómetros fijos y portátiles es descrito y comprobado. El método incorpora datos aportados por la Red Mundial de Radiosondeos (RMR). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) coordina esta red. Un conjunto de jornadas experimentales de mediciones para calibrar un par de barómetros digitales portátiles constituyó la base para la comprobación del método. El método produjo una función de calibración con un error estándar de estimación de ± 0.49 hPa (1014-779 hPa); esta función pasó exitosamente por un proceso adicional de validación. El nivel de ese error permite usar el par de barómetros en aplicaciones meteorológicas. Aunque el método se desarrolló para el área ecuatorial de Suramérica; no hay restricciones para su uso en otras áreas tropicales de la RMR.

Palabras claves: Calibración, barómetro, radiosondeo, Suramérica.

Introducción

Actividades relacionadas con Ingeniería pueden requerir datos de presión atmosférica (P, hPa) para muchas tareas tales como el cálculo de humedad relativa psicrométrica, la reducción de volúmenes gaseosos a condiciones normales y el estudio de la refracción atmosférica. Los barómetros para medir esta presión necesitan mantenimiento, lo cual incluye la comparación (*calibración*) de sus mediciones con otras homologas de mayor exactitud en jornadas experi-

mentales. De esta comparación se obtiene la *función de calibración* que transforma la lectura instrumental en un valor calibrado. La gráfica de esta función se denomina *curva de calibración*. Cada barómetro puede venir de fábrica respondiendo según una de estas curvas, la cual puede cambiar con el tiempo por fatiga instrumental o por accidentes. Además, los barómetros digitales actuales pueden perder la calibración por falla eléctrica o por error de operación. Por estos y otros motivos, los barómetros necesitan frecuente calibración.

La calibración tradicional incluye comparaciones con barómetros mercuriales patrones; pero estas comparaciones pueden presentar problemas de traslados y permisología. Estos problemas fueron planteados por usuarios de 3 barómetros mercuriales y 9 aneroides empleados en importantes aplicaciones. Además, la ausencia de patrones estacionados en diversas áreas y altitudes, en oficinas de pesas y medidas, impulsa el desarrollo de nuevos y alternativos métodos de calibración. La bibliografía actual no presenta alternativas al método tradicional. El objetivo del presente trabajo es entonces el diseño y la comprobación de un método para calibrar barómetros tanto fijos como portátiles sin los problemas mencionados. Aquí se trabaja principalmente dentro del área ecuatorial suramericana (AES) entre las latitudes 13°N y 13°S.

Método de Calibración Basado en Radiosondeos

Un radiosonda es un conjunto de instrumentos combinados con un radio transmisor. Este conjunto es llevado hacia arriba por un globo inflado con hidrógeno o helio. Mediciones meteorológicas efectuadas por el conjunto son transmitidas a un receptor de una "estación de radiosondeo". Después de constatar la disponibilidad de datos de altura (H, msnm) y presión (P, hPa) aportadas por la Red Mundial de Radiosondeos (RMR), se emprendió el diseño de un método nuevo y alternativo de calibración de barómetros basado en radiosondeos o sondeos. La Organiza-

ción Meteorológica Mundial (OMM) [1, 2] coordina esta red. Algunas estaciones de la AES según [3] están reseñadas en la Tabla 1. Desde 1997, Venezuela no realiza radiosondeos.

El método incluye comparaciones de la presión indicada por el barómetro bajo estudio (P_B , hPa) con un valor homólogo de presión (P_R , hPa) obtenido mediante interpolación entre las estaciones de la RMR. La latitud, la longitud y la altitud (H_B , msnm) del "punto" B donde se encuentra el barómetro deben ser conocidas. La hora de lectura del barómetro debe ser próxima a la hora de sondeos. En la AES los sondeos son iniciados cerca de las 00:00 y de las 12:00 GMT (Greenwich Mean Time), las cuales son las horas reglamentarias principales sugeridas por la OMM [4]. Durante el desarrollo del presente trabajo, la Hora Legal de Venezuela (HLV) estaba definida por $HLV=GMT-4$, por lo tanto las horas reglamentarias GMT pasan a ser 08:00 y 20:00 HLV. En la práctica, las estaciones de la AES lanzan las sondas unos 10 minutos antes de estas horas. El procedimiento aquí usado para interpolación es "gravitatorio" apoyado por cuatro (4) estaciones situadas en los cuadrantes NE, SE, NW y SW alrededor de B [5, 6]. Las fórmulas de interpolación son:

$$D = 1/D_1^2 + 1/D_2^2 + 1/D_3^2 + 1/D_4^2 \quad (1)$$

$$P_R = (P_1/D_1^2 + P_2/D_2^2 + P_3/D_3^2 + P_4/D_4^2) / D \quad (2)$$

donde D_1 a D_4 son las distancias en km entre B y las 4 estaciones de apoyo; P_1 a P_4 son las presio-

Tabla 1

Datos de algunas estaciones de radiosondeos del área ecuatorial suramericana

Sigla OACI	Serial OMM	Latitud (°N)	Longitud (°O)	Altitud (H, msnm)	Ciudad o localidad
SKGV	80241	4.55	-70.92	167	Gaviotas
KPP	78970	10.58	-61.35	12	Trinidad
ACC	78988	12.2	-68.97	54	Curacao
SKBO	80222	4.7	-74.13	2548	Bogotá
SKLT	80398	-4.17	-69.95	84	Leticia
SOCA	81405	4.83	-52.37	9	Cayenne
SBMN	82332	-3.15	-59.98	84	Manaus
SKRH	80035	11.53	-72.93	4	Río Hacha

nes (hPa) en las estaciones 1 a 4 en la altura H_B . Las distancias se calculan en base a las coordenadas geográficas tanto de B como de las 4 estaciones. Para una hora determinada y una fecha específica, entrando con la altura H_B en las relaciones presión (P, hPa) vs altitud (H, msnm) de los 4 sondeos se obtienen las presiones P_1 a P_4 . El modelo de ajuste polinomial de segundo grado (mínimos cuadrados) se usa para obtener las relaciones P vs H mencionadas. Luego se calcula P_R (hPa) según la fórmula (2) dada antes.

La planificación de las jornadas de mediciones depende del tipo de uso del barómetro. Dado que el presente trabajo abarca el caso de barómetros portátiles para altitudes por debajo de 4800 msnm, las jornadas abarcaron altitudes diversas. Deben evitarse los días con lluvia y/o ventisca. En cada jornada se obtiene un valor P_J calculado con varias lecturas barométricas y un valor P_R calculado con datos de sondeos que se pueden obtener en la actualidad vía "Internet". Varios pares de estos valores forman una gráfica P_R vs P_J a la cual se le pueden ajustar funciones (modelos) de calibración por el método de mínimos cuadrados. Luego se hace un estudio para determinar el modelo aceptable como *la función de calibración*. El error estándar de estimación asociado a esta curva es comparado con las tolerancias establecidas por la OMM [4] para determinar el mejor uso del barómetro. Durante el proceso de calibración, cualquier barómetro puede sufrir desperfectos y la función de calibración obtenida podría ser no verdadera. Esta falta de veracidad se verá reflejado durante el uso posterior del barómetro o en otras calibraciones. En general este problema puede ser minimizado tomando las debidas precauciones contra errores accidentales; pero en el presente caso de desarrollo de método se hicieron dos comparaciones adicionales con barómetros mercuriales en jornadas denominadas *validación*. Se necesita una comparación antes y otra después de la calibración. Estas comparaciones se usan para verificar si no hubo alteraciones durante la calibración, en cuyo caso se podría aceptar la función de calibración como verdadera. Cuando se sabe el uso que va a tener el barómetro después de calibrado se pueden efectuar cálculos adicionales de errores.

La poca variabilidad espacial y temporal de las superficies isobáricas del AES, durante situa-

ciones sin perturbaciones ciclónicas próximas, que favorece el uso de la interpolación espacial, es la base física que permite intuir el éxito del método de calibración ya explicado.

Debido a que en cada radiosondeo se usa una sonda nueva, ésta debe ser previamente calibrada con respecto a un barómetro de gran exactitud. Los datos de los sondeos por lo general no indican el error de esta calibración; pero se supone que en las estaciones de la RMR que han funcionado en los mismos lugares, con pocas interrupciones a través de los años, se siguen procedimientos de mantenimiento y operación en forma sostenida y por lo tanto sus sondeos son confiables. El uso de sondeos provenientes de países diversos, calibrados en forma independiente, con los inevitables errores aleatorios (accidentales) positivos unos y negativos otros, es aconsejable. La teoría de errores permite suponer que esta aleatoriedad minimiza la suma de los errores accidentales de calibración de sondas y previene la formación de errores sistemáticos de signos constantes que podrían ser trasladados al método aquí presentado. El lanzamiento de la sonda desde una referencia de altitud conocida exactamente es también importante ya que un error en el orden de -1 m (+1 m) en esa altitud produce un error en el orden de +0.1 hPa (-0.1 hPa). A las altitudes también se pueden aplicar razonamientos de mínima suma de errores. El conocimiento del desarrollo cartográfico de cada país puede ayudar en la selección de las estaciones de sondeos.

Calibración de un Par de Barómetros Portátiles

Dos barómetros portátiles de la misma marca y modelo, uno marcado como A y otro marcado como N, denominados {A, N}, fueron sometidos a un proceso de calibración conjunta que representa una comprobación del método ya descrito. Estos barómetros (modelo CDI 560) son digitales de cápsula aneroide. Las lecturas instrumentales están formadas por 3 dígitos enteros desde 600 hPa hasta 999 hPa o por 4 dígitos desde 1000 hasta 1050 hPa. Las jornadas de calibración se realizaron en el año 2000 en las localidades de Venezuela indicadas en la Tabla 2.

Se efectuaron 22 jornadas de calibración (año 2000). Cada jornada duraba 15 minutos, co-

Tabla 2
Localidades incluidas en las jornadas de mediciones para calibración

Área (Ciudad)	Sector (Local)	Sigla (sssss)	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (msnm)
Ocumare	Playón	OCUMP	10°30'	67°46'	1.8
Maracay	San Isidro	MCAYS	10°15'24"	67°36'14"	448
Caracas	California	CCCFN	10°29'3"	66°49'45"	883
Caracas	Hidrom.	UCVHD	10°29'41"	66°53'12"	892.1
Dolorita	La Pereza	KS157	10°26'58"	66°44'10"	934
Mérida	Terminal-T	MRDAT	8°35'3"	71°10'52"	1503
Tabay	Plaza	TABYP	8°38'6"	71°4'35"	1685
Tabay	La Becerra	TABYB	8°39'13"	71°4'23"	2265

menzaba cerca de la hora reglamentaria y se realizaban varias lecturas con cada barómetro. Luego se calculó el valor modal de cada barómetro y después se determinó la media de esos valores para obtener la presión media de la jornada (P_J , hPa). Los datos de los cuatro radiosondeos de cada jornada se obtuvieron vía Internet. Como se mencionó, el valor de P_R se determinó mediante el promedio gravitatorio de los valores P_1 , P_2 , P_3 y P_4 obtenidos con cada sondeo. A manera de ilustración, en la Figura 1 se presenta un ajuste polinomial para calcular P_1 relacionado con una de las jornadas realizada en Tabay.

Este ajuste presentó un coeficiente de correlación $r^2 \approx 0.999993$ y una expresión:

$$P = 4.71E-06 \cdot H^2 - 0.11385 \cdot H + 1013.164 \quad (3)$$

donde P (hPa) es la presión indicada por la sonda y H (msnm) es la altitud indicada por el sistema de rastreo. El valor de la presión según esta relación para la altitud de Tabay ($H = 2265$ m) resulta $P_1 = 779.44$ hPa. En esa jornada los otros valores de presiones resultaron $P_2 \approx 779.27$ hPa, $P_3 \approx 778.97$ hPa y $P_4 \approx 779.37$ hPa. El promedio pesado de esos cuatro valores resultó $P_R \approx 779.19$. Los sondeos de todas las jornadas presentaron ajuste polinomial con alto coeficiente de correlación. En la Tabla 3 se presenta un resumen de cada jornada. En esa tabla HLV es la hora de la mitad del intervalo de 15 minutos durante el cual se efectuaron las lecturas barométricas.

La obtención de la función de calibración se realizó mediante el ajuste de funciones sencillas

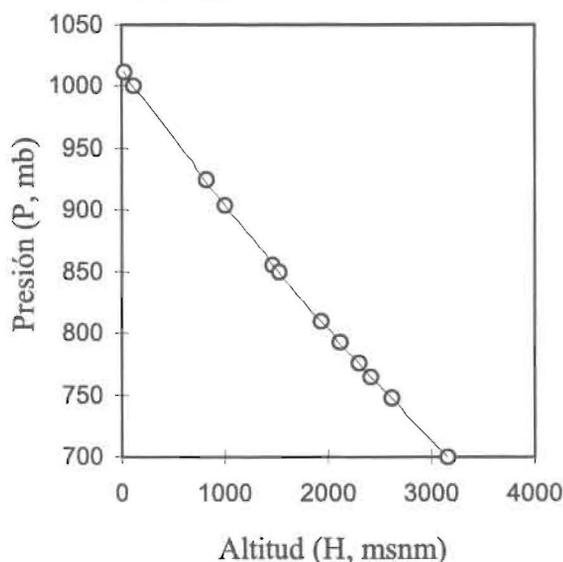


Figura 1. Parte baja de un sondeo de Trinidad y ajuste polinomial de orden 2 (5/Sep/2000 12:00 GMT).

a los datos de presión media de jornada (P_J) y presión interpolada en la red (P_R), ambos de la Tabla 3. En la Figura 2 se presentan tanto el graficado de puntos como el ajuste de una recta por mínimos cuadrados.

En la Figura 2 hay puntos ocultos detrás de otros debido a la cercanía de los valores. La ecuación de la recta de ajuste en la Figura 2 es:

$$Y = 0.99284 X - 2.5624 \quad (4)$$

donde Y es la presión barométrica calibrada o también corregida, X es el valor de la presión ba-

Tabla 3
Resumen de las jornadas de mediciones para calibración (Año 2000)

J (#)	Lugar (sssss)	Fecha (dd-mm)	Hora HLV	P _J (hPa)	P _R (hPa)
1	OCUMP	18-04	08:15	1023	1013.49
2	OCUMP	19-04	07:34	1023	1013.45
3	OCUMP	20-04	07:50	1023.5	1012.76
4	OCUMP	21-04	08:07	1022	1011.47
5	CCCFN	01-08	07:46	925	915.45
6	UCVHD	09-08	07:47	925.5	916.8
7	UCVHD	10-08	07:45	926	916.85
8	CCCFN	17-08	20:00	924	914.98
9	CCCFN	18-08	07:43	925	916.46
10	MCAYS	27-08	07:53	971.5	961.68
11	KS157	02-09	19:45	917	908.43
12	KS157	03-09	07:47	917	908.64
13	KS157	15-09	18:51	917.5	908.28
14	KS157	16-09	07:48	918.5	909.05
15	CCCFN	04-09	07:39	924	914.56
16	MRDAT	05-09	06:45	862	853.92
17	TABYP	05-09	07:40	842.5	834.45
18	TABYB	05-09	07:57	788	779.19
19	TABYB	06-09	20:03	787.0	778.5
20	TABYB	07-09	07:39	787.0	778.15
21	MCAYS	09-09	08:30	969.5	959.79

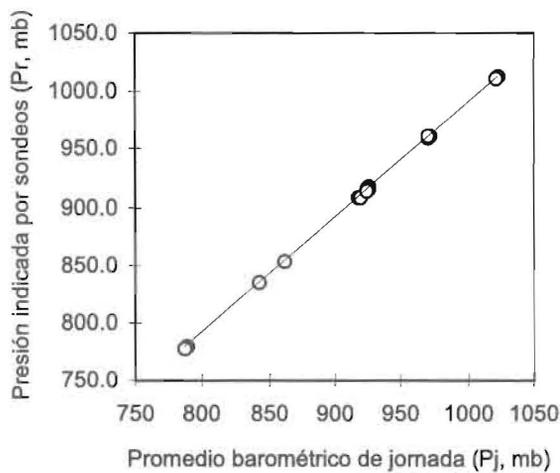


Figura 2. Curva de calibración para la respuesta media de dos barómetros digitales portátiles.

rométrica sin calibrar (P_J) y los valores numéricos son los parámetros de la recta. La expresión (4) es una función de calibración lineal. El cuadrado del coeficiente de correlación r^2 ($\cong 0.99995$) pasó la prueba estadística. El cálculo del error estándar de estimación ("rms") para Y resulta $\sigma = \pm 0.49$ hPa. El ajuste de un polinomio de segundo grado produjo una gráfica que es muy parecida a la Figura 2. Se escogió el ajuste lineal por sencillez.

Validación de la Calibración

Las jornadas de validación se efectuaron el 25/11/1999 antes de calibración y el 29/10/2000 después de calibración en Maracay (Venezuela) e incluyeron comparaciones entre el promedio de {A, N} con el Barómetro Patrón Re-

gional Mercurial #8046. Después de aplicar la función de calibración (4) al promedio de las lecturas de [A, N] y de aplicar la reducción a condiciones normales a las lecturas del barómetro patrón, se obtuvo un error absoluto ± 0.4 hPa en la primera jornada y de ± 0.1 hPa en la segunda.

Para analizar la aplicación del par [A, N] en las tareas indicadas al comienzo, se realizaron cálculos de humedad relativa sicrométrica según [7] entre 50% y 70%, dentro de un amplio rango de presiones, temperaturas secas y de bulbo húmedo, que produjeron errores absolutos dentro de ± 0.007 unidades de porcentaje de humedad relativa y errores relativos de $\pm 0.12\%$. Cálculos de la reducción a condiciones normales (1013.25 hPa y 0°C) de un volumen gaseoso de 0.040 m^3 , condujeron a errores absolutos de $\pm 0.00002 \text{ m}^3$ y relativos de $\pm 0.5\%$. Cálculos de ángulos de refracción atmosférica [8] en un amplio rango de ángulos solares de elevación, presiones y temperaturas del aire, indicaron valores entre 0.2 y 6 minutos de grado con errores relativos menores que $\pm 0.5\%$.

Resultados Principales

Los resultados principales obtenidos con la aplicación del método en una serie de 22 jornadas experimentales, relativamente complejas, donde se usaron dos barómetros aneroides de precisión $\varepsilon = \pm 0.5$ hPa están representados por la función de calibración (4) con su correlación lineal de $r^2=0.999953$ y error estándar de estimación $\sigma = \pm 0.49$ hPa y por errores de las lecturas barométricas calibradas en dos jornadas de validación que son $\delta_1 = 0.40$ hPa y $\delta_2 = 0.10$ hPa. La estimación de errores relativos en cálculos de frecuente aplicación industrial y de ingeniería produjo errores relativos menores que $\pm 0.5\%$. El excelente ajuste de polinomios de segundo grado a la relación H (msnm) vs P (mb) para la tropósfera de la AES por debajo de 2500 msnm es un resultado que es necesario incluirlo en la discusión.

Discusión de Resultados

El uso conjunto de un par de barómetros similares es en la actualidad factible debido a los

relativos bajos costos y a la oferta normal de estos instrumentos. El uso de un solo barómetro de dígitos enteros podría ameritar un número mayor de jornadas de mediciones. El alto coeficiente de correlación de la función de calibración indica una respuesta lineal de los barómetros ante las variaciones de presión atmosférica. La obtención de un error estándar de estimación de $\sigma \cong \pm 0.49$ hPa indica que la exactitud de la respuesta conjunta de los barómetros es casi similar a la precisión de los mismos que es de ± 0.5 hPa. Los errores obtenidos durante la validación dentro del intervalo de σ , aseguran que no hubo alteraciones notables en los barómetros aneroides bajo estudio durante la calibración y que la función de calibración encontrada es verdadera. La reglamentación de la OMM [4, 9] indica que estos barómetros se pueden usar en aplicaciones prácticas e inclusive si el error estándar de estimación alcanzara ± 1 todavía los barómetros pudieran ser usados en algunas de ellas. Los errores obtenidos en cálculos relacionados con las tres áreas de aplicaciones son aceptables y están en el orden del $\%$, orden que es de difícil obtención con los instrumentos usados en esas aplicaciones. El presente desarrollo incluyó complejas jornadas en diversas áreas y altitudes; pero el usuario puede desarrollar jornadas de calibración mucho más sencillas, inclusive puede calibrar barómetros de estaciones automáticas remotas sin tener que ir a ellas. Se puede efectuar un menor número de jornadas sin validaciones pero, desde luego, debe evitarse todo accidente instrumental durante la jornadas.

La poca variabilidad de la estratificación ecuatorial es una propiedad casi permanente (que persiste en condiciones de no perturbaciones ciclónicas) es muy conocida como tendencia bartrópica. Esta tendencia es la responsable del éxito del método que es a la vez el éxito de la interpolación gravitatoria y está representada por el ajuste casi perfecto de los polinomios de segundo grado en las relaciones H (msnm) vs P (mb). Zonas de montañas como aquellas del Sur del Lago de Maracaibo variedad altitudinal y moderna viabilidad son muy favorables para la aplicación del método. Cuando Venezuela comience de nuevo a efectuar radiosondeos, el presente método adquirirá mucho más exactitud y aplicabilidad. Finalmente, el uso de barómetros calibrados, ya sea

por el método aquí presentado o por otro, es necesario para mantener la calidad de los datos meteorológicos.

Conclusión

Un nuevo método de calibración de barómetros para el área ecuatorial suramericana (13°N-13°S), basado en comparaciones de las lecturas instrumentales barométricas con datos homólogos de presión atmosférica obtenidos con radiosondeos, fue diseñado y comprobado con éxito para un par de barómetros digitales, durante un conjunto de mediciones experimentales que abarcaron diversas altitudes. Se espera que el método funcione exitosamente en otros experimentos de menor cobertura, ya que está basado en propiedades permanentes de la atmósfera tropical del sector ecuatorial suramericano.

Agradecimientos

Los datos de radiosondeos (RAOBS) para la realización del presente trabajo se obtuvieron vía *Internet* en una base de datos de acceso público mantenida por el "National Climate Data Center" (USA) a través del "Forecast System Laboratory" (FSL) y mantenida por Mr. Mark Govett. Se agradece el acceso casi ilimitado a estos datos. Se agradece a la Fuerza Aérea Venezolana la realización de las comparaciones con el barómetro mercurial patrón de Maracay.

Referencias Bibliográficas

1. Organización Meteorológica Mundial: "Manual del Sistema Mundial de Observaciones". OMM N° 544, Ginebra, 1981.
2. Organización Meteorológica Mundial: "Guía del Sistema Mundial de Observación", Ginebra, OMM N° 488, 1989.
3. Organización Meteorológica Mundial: "Weather Reporting". WMO N° 9, Geneva, 1989.
4. Organización Meteorológica Mundial: "Guide to Meteorological Instruments and Methods". OMM N° 8, Geneva, 1983.
5. Linsley, R. K, Kohler, M. A and Paulhus, J. L. H.: "Hydrology for Engineers", MacGraw-Hill, New York, 1975.
6. Yoeli, P.: Compilation of data for computed assisted relief cartography. In: Davis C. and M. J. MacCullagh (eds.). Display and Analysis of Spatial data, NATO Advanced Study Institute. London (1975), 352-366.
7. Deutchen Wetterdienst: "Aspirations-Psychrometer-Tefln", Verlag, Braunschweig, 1963.
8. U.S. Nautical Almanac Office, The Astronomical Almanac. Washington, U.S. Government Print Office, Washington, 1996.
9. World Meteorological Organization. "Guidance on Automatic Weather Systems and Their Instrumentation". WMO/TD N°862, 1997.

Recibido el 16 de Octubre de 2000

En forma revisada el 22 de Junio de 2001