

# Checking of Optical-Electronic Equipment Used in Seismic Exploration Projects

*Antony Prince<sup>1</sup>, Melvin Hoyer<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA), Geodesia, Puerto La Cruz - Venezuela  
Edif. PDVSA Refinación Oriente, calle Guaragua. PB-MA-Ofic. 23*

*Teléfono: 58-412-840.19.96. Fax: 58-281-260.30.58 E-mail princeam@pdvsa.com*

*<sup>2</sup>La Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Maracaibo - Venezuela  
Av. 16 (Guajira) con calle 67 (Cecilio Acosta), Edif. de Profesores (nivel azotea)  
Teléfono: 58-412-165.32.00. E-mail melvinhoyer@gmail.com*

## Abstract

During the topography in a seismic exploration project, conventional surveying instrument and GNSS receivers are used complementarily. The proper functioning of the equipments must be guaranteed throughout the project and like quality control, is needed a constant verification to detect, model and correct, if possible, instrumental drift, thus ensuring the quality the stakeout of the seismic lines. This paper proposes a procedure that verifies the associated basic components of a modern total station: EDM (Electronic Distance Measurement) and the electronic theodolite. This method is based on defining and certifying calibration base line using high-precision GNSS measurements and then, on that line, verifies measurements of distances and angles that allow monitoring the correct performance of conventional equipment considered the technical specifications of the manufacturer and established tolerances. The methodology is supported by theoretical and evaluated through specific tests that indicate the convenience and advantages of its application.

**Key words:** Checking, Total Station, EDM, GNSS, Seismic Exploration.

# Verificación de Equipos Ópticos-Electrónicos Usados en Proyectos Sísmicos de Exploración

## Resumen

Durante la fase de topografía en un proyecto sísmico de exploración se usan instrumentos geodésicos convencionales y receptores GNSS en forma complementaria. El buen funcionamiento de los equipos debe garantizarse durante todo el proyecto y como control de calidad es necesario realizar una verificación constante que permita detectar, modelar y corregir, si es posible, derivas instrumentales, garantizando así la calidad del replanteo de las líneas sísmicas. En este trabajo se propone un procedimiento que permite verificar los componentes básicos asociados a una Estación Total moderna: EDM (Electronic Distance Measurement) y el teodolito electrónico. Este método se basa en definir y certificar una línea base de calibración mediante mediciones GNSS de alta precisión y luego, sobre dicha línea, verificar las mediciones de distancias y ángulos que permitan observar el correcto desempeño de los equipos convencionales en función de las especificaciones técnicas del fabricante y de las tolerancias establecidas. La metodología está apoyada en fundamentos teóricos y evaluados mediante pruebas específicas que indican la conveniencia y ventajas de su aplicación.

**Palabras clave:** Verificación, Estaciones Totales, EDM, GNSS, Exploración Sísmica.

## Introducción

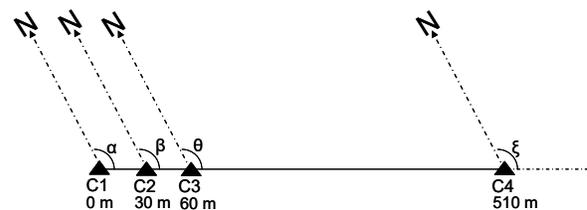
En todo proyecto sísmico de exploración de hidrocarburos se contempla una fase de trabajos topográficos y geodésicos de la cual depende la debida orientación y georreferenciación espacial de la componente geofísica. En este artículo se presenta un procedimiento que tiene como objetivo verificar el buen estado de los equipos ópticos-electrónicos antes y durante las operaciones topográficas de un proyecto sísmico de exploración. Considerando las condiciones ambientales y el tipo de terreno donde se realizan estos proyectos, estos instrumentos están expuestos a producir errores en las observaciones cuyas fluctuaciones deben ser detectadas para ser modeladas y corregidas o para simplemente reemplazar el equipo. La metodología consiste en definir, establecer y certificar una línea base de calibración, mediante mediciones GNSS de alta precisión, con el fin de observar la constante aditiva y errores cíclicos presentes en el EDM (Electro-Optical Distance Meters) de una Estación Total (ET), así como también verificar los valores angulares (horizontales y verticales) del teodolito electrónico y los cierres verticales medidos. Algunos autores ([1] y [5], por ejemplo) han presentado procedimientos con fines similares, sin embargo ninguno de ellos satisface las necesidades y requerimientos de los proyectos sísmicos de exploración en nuestro país como se demostrará más adelante.

**Los Errores instrumentales presentes en las mediciones de distancias electrónicas (EDM) son:** *constante aditiva* (error cero o error de índice), *error de escala* y *error cíclico* (error periódico corto) [1]. Todas las distancias medidas con un EDM/REFLECTOR particular están expuestas a un error constante llamado **constante aditiva**. Este error está ajustado a cero al salir el equipo de la fábrica, sin embargo, este puede cambiar con el tiempo siendo necesario determinarlo periódicamente y usarlo para corregir las distancias medidas [2]. El error cero, característico para cada instrumento y prisma, es un error sistemático de magnitud constante y no proporcional a la distancia medida. **El error de escala** es directamente proporcional a la longitud de la línea medida y se debe a: 1. Variaciones en la modulación de la frecuencia del EDM. 2. Cambios que no pueden ser modeladas debido a las condiciones atmosféricas que afectan la velocidad de propagación. 3. Errores en la colección y uso de datos atmosféricos incorrectos [1]. **El error cíclico** es inversamente proporcional a la intensidad de la señal de retorno, por lo que sus efectos se incrementan al aumentar la distancia. Existen procedimientos de calibración para determinar el error cíclico de un EDM que consisten en tomar mediciones, a través de una modulación de longitud de onda completa, y luego comparando estos valores con distancias conocidas, se procede a modelar las tendencias

cíclicas que se encuentran en las discrepancias [3]. La unidad de longitud es la escala con la cual el EDM mide la distancia y esta es derivada de la medición fina de la frecuencia. Como el error cíclico se repite para cada unidad de longitud contenida dentro de una distancia medida, su signo y magnitud varían en función de la longitud medida. La magnitud del error puede estar en el orden de  $\pm 5$ -10mm, sin embargo, en EDM modernos por lo general es mucho menor a  $\pm 2$ mm (insignificante) [1]. El error cíclico puede aumentar en magnitud en función de la edad de los componentes del EDM [1]. Generalmente este error es más pequeño que los otros dos descritos anteriormente y se debe a la contaminación electrónica interna entre los circuitos de transmisión y recepción [4].

**Establecimiento de la línea base de calibración propuesta:** consta de cuatro (4) estaciones alineadas: **C1, C2, C3 y C4**. El punto inicial comienza en cero metros (0m) y luego a partir de él se materializan los tres puntos restantes: 30m, 60m y 510m. (Ver figura 1). Técnicamente, una línea base de calibración debe cumplir con 2 aspectos fundamentales: **1.** Para ser considerada como alineada, los puntos intermedios (C2 y C3) no deben estar fuera de la línea más de 2 minutos de arco [5], aunque algunos autores definen este valor en 4 minutos de arco cuando no se trata de monumentos tipo pilares sino con trípodes [3]. **2.** La desviación estándar mínima de las longitudes entre los comparadores deber ser [5]:

$$\sigma L = \left[ 0,0017^2 + (L \times 10^{-6})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$



**Condición 1.**  $\alpha = \beta = \theta = \xi$ ;  $\sigma$ :  $00^\circ 02' 00''$  (para monumentos tipo pilares)  
 $\sigma$ :  $00^\circ 04' 00''$  (para monumentos tipo trípodes)

**Condición 2.** C1C2, C2C3 y C3C4;  $\sigma L$ :  $\pm [0,0017^2 + (L \times 10^{-6})^2]^{1/2}$  m  
 $\sigma L$ : 95%  
 L: distancia en metro

**Figura 1.** Comparadores que conforman la línea base de calibración.

Para rangos de distancias cortas ( $< 300$ m), verificar sólo la constante aditiva y el error cíclico es suficiente. Para distancias más largas ( $> 1000$ m), el error de escala y los sensores meteorológicos (especialmente los termómetros) también deben ser revisados. En muchos casos es posible (con un mismo arreglo) poder chequear la constante aditiva y el error cíclico, cumpliendo con ambos requerimientos [6]. Considerando **a)** que el posicionamiento de las líneas sísmicas requiere de una

exactitud en el orden de  $\pm 1\text{m}$ , **b)** que las distancias entre estaciones son cortas (lo que permite omitir el impacto del error de escala y no determinar los parámetros de presión, humedad y temperatura,) y **c)** que con un mismo arreglo se pueden chequear al menos la constante aditiva y el error cíclico de un instrumento; se plantea la línea base de calibración descrita en la figura 1. Las distancias cortas (0m-60m) servirán para determinar la constante aditiva del instrumento y la línea base larga de 510m (en conjunto con las cortas) permitirán observar el error cíclico. Para detectar el error cíclico, las distancias deben ser múltiplos de la unidad de longitud de onda del EDM. Hoy día, las unidades de longitud más frecuentes que usan los EDM en el mercado son: 1.5m, 2m, 3m, 5m, 10m y 20m [1 y 5]. El arreglo 0m, 30m, 60m y 510m es múltiplo de 1.5m, 2m, 3m, 5m, 10m; lo cual garantiza que diversas ET en el mercado puedan ser verificadas con un mismo diseño. El NGS (National Geodetic Survey) usa

múltiplos de 30m [5], lo cual también se cumple con el diseño propuesto.

Para las mediciones de los comparadores se utilizará la técnica GNSS. Los parámetros de observación recomendados se muestran en la tabla 1. Las soluciones finales se obtendrán determinando los vectores **C1C2**, **C1C3**, **C1C4**, **C3C2** y **C3C4** mediante un postprocesamiento de tipo diferencial. El marco de referencia puede ser el ITRF más actual (International Terrestrial Reference Frame [7]) y la proyección debe ser la UTM (Universal Transversal de Mercator). Para certificar la línea base de calibración (Figura 1), se recomienda realizar comparaciones con procesamientos PPP "Posicionamiento GNSS de Punto Preciso" [8] y/o con mediciones repetidas (de los vectores que conforman la línea base de calibración) mediante equipos ópticos-electrónicos que se tengan disponibles.

**Tabla 1**

Parámetros de observación GNSS usados para determinar las coordenadas de los comparadores C1, C2, C3 y C4.

<b>Tipo de Observación</b>	Estático
<b>Intervalo de Captura</b>	15 seg.
<b>Angulo de Elevación</b>	10°
<b>Máscara de PDOP</b>	$\leq 3$
<b>Tiempo de Observación</b>	8 horas
<b>Observaciones</b>	Códigos y fases de las Portadoras

### Metodología propuesta para la verificación de ET en los proyectos sísmicos de exploración

**1) Verificación del EDM:** Una vez nivelada y centralizada la ET en el comparador **C1**, se procede a realizar las mediciones. Se realizan tres (3) lecturas

de distancia **C1C2**, **C1C3** y **C1C4**. Luego se obtiene un promedio por rango medido. Este promedio se resta con las distancias conocidas (**C1C2 CON**, **C1C3 CON** y **C1C4 CON**) y la diferencia se compara con las tolerancias (**RMS 95%**) previamente establecidas para cada tramo. Ver tabla 2. La metodología contempla también medir las distancias **C3C2** y **C3C4**. Ver tabla 3.

**Tabla 2**  
Verificación del EDM – Parte 1.

FECHA:	18-oct-14
OBSERVADOR:	José Parra
MARCA:	LEICA
MODELO:	Serie 1203
N° SERIAL:	224399
EXACTITUD DISTANCIA $\pm(a + b \text{ ppm})$	5 mm 10 ppm
PRECISIÓN O EXACTITUD ANGULAR ( $\sigma_a$ )	01"
PRECISIÓN COMPENSADOR O LECTURA MINIMA ( $\sigma_{DIN}$ )	01"
PRECISIÓN ÁNGULO CENTRAL ( $\sigma_z$ )	02"

TEMPERATURA:	°C
PRESIÓN ATMOSFÉRICA:	mmHg
HUMEDAD RELATIVA:	%
PPM:	
CONSTANTE DEL PRISMA:	mm
ERROR CENTRADO INSTRUMENTO ( $\sigma_i$ ):	1 mm
ERROR CENTRADO PRISMA ( $\sigma_p$ ):	2 mm
ERROR ALTURA INSTRUMENTO ( $\sigma_{hi}$ ):	2 mm
ERROR ALTURA PRISMA ( $\sigma_{hp}$ ):	2 mm

### VERIFICACIÓN DE DISTANCIAS MEDIDAS VS TOLERANCIAS

COMPARADOR	C1C2 (m)	C1C3 (m)	C1C4 (m)	C1C2 CON (m)	C1C3 CON (m)	C1C4 CON (m)
DISTANCIA	30,001	60,003	510,003	30	60	510
HORIZONTAL O REDUCIDA MEDIDA (DH)	30,001	60,002	510,003	$\sigma D$ (m)	$\sigma D$ (m)	$\sigma D$ (m)
PROMEDIO	30,001	60,002	510,004	0,005	0,006	0,007
DIFERENCIA	0,001	0,002	0,003	RMS(95%) (m)	RMS(95%) (m)	RMS(95%) (m)
ERROR RELATIVO (ER)	75000	42857	30000	0,009	0,010	0,013

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95% C1C2 CON); OK

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95% C1C3 CON); OK

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95% C1C4 CON); OK

Para conocer si las distancias medidas son aceptables, se deben considerar los errores presentes en las observaciones de distancias electrónicas. La siguiente fórmula define la desviación estándar que debe poseer un EDM particular [9]:

$$\sigma D = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_p^2 + a^2 + (D * b \text{ ppm})^2} \quad (2)$$

En donde:

$\sigma_i$  = Error del centrado del instrumento

$\sigma_p$  = Error del centrado del prisma

$\pm(a + b \text{ ppm})$  = Precisión del instrumento para mediciones de distancias

$D$  = Distancia en metros

En general, si se usan equipos con plomada óptica o láser sobre una marca nítida y bien definida, el valor

de incertidumbre típica en el centrado  $\sigma_i$  se podría considerar con valores en torno a  $\pm 0,5-1 \text{ mm}$  [4]. Sin embargo, podrá ser el usuario quién los establezca, dependiendo del tipo de sistema de centrado a utilizar y de las características de la marca sobre la que se estaciona. Para efectos de este trabajo se considerará un error típico de  $\pm 1 \text{ mm}$  para  $\sigma_i$  y  $\pm 2 \text{ mm}$  para  $\sigma_p$ . Luego, mediante el factor horizontal  $1.7308 * \sigma D$  se estima el **RMS al 95%** de confiabilidad para cada distancia [10], cuyo resultado será asumido como la tolerancia. Por ejemplo, en la tabla 2 se observa que para el tramo **C1C4** se obtuvo un valor "**PROMEDIO**" de  $\pm 510,003 \text{ m}$ , la diferencia con la distancia conocida (**C1C4 CON** =  $510 \text{ m}$ ) es  $\pm 0,003 \text{ m}$ . Si este resultado es menor al RMS (95%) estimado para la distancia  $510 \text{ m}$  ( $\pm 0,012 \text{ m}$ ), entonces es satisfactorio. Posteriormente, en la tabla 3 se muestra el procedimiento correspondiente para determinar la constante aditiva "a" de cada ET, para ello se aplican los siguientes modelos matemáticos [6]:

$$\begin{aligned} C1C2 + C3C2 + C3C4 - C1C4 &= -2a \\ C1C3 + C3C4 - C1C4 &= -a \end{aligned} \quad (3)$$

El valor final de "a" sería el promedio de los resultados que se obtengan con ambos modelos matemáticos ( $\pm 0,002\text{m}$ , en el ejemplo mostrado en la tabla 3) y en el cálculo deberá considerarse para

el tramo **C1C4** la distancia conocida (510m). Para conocer las tendencias cíclicas del instrumento se determina la amplitud "c" mediante: **(a - DIF C1C2)**, **(a - DIF C1C3)** y **(a - DIF C1C4)** [6]. Ver tabla 3. El valor que se asume para **DIF C1C2**, **DIF C1C3** y **DIF C1C4** es el que se obtiene en el campo "DIFERENCIA" de la tabla 2.

**Tabla 3**  
Verificación del EDM – Parte 2.

### CÁLCULO CONSTANTE ADITIVA Y ERROR CÍCLICO DEL EDM

COMPARADOR	C1C2 (m)	C3C2 (m)	C3C4 (m)	TOTAL (m)		
DISTANCIA CONOCIDA	30	30	450	510		
DISTANCIA HORIZONTAL O REDUCIDA MEDIDA (DH)	30,001	30,001	450,002	510,004		
	30,001	30,003	450,001	510,005		
	30,002	30,002	450,001	510,005		
PROMEDIO	30,001	30,002	450,001	510,005		
$C1C2 + C3C2 + C3C4 - C1C4 = -2a$				-0,002		
$C1C3 + C3C4 - C1C4 = -a$				-0,004		
<b>PROMEDIO CONSTANTE ADITIVA (a)</b>				<b>-0,002</b>		
ERROR CÍCLICO (c), amplitud del error				(a - <b>DIF C1C2</b> ) m	(a - <b>DIF C1C3</b> ) m	(a - <b>DIF C1C4</b> ) m
				-0,003	-0,004	-0,005
<b>PROMEDIO ERROR CÍCLICO (c), amplitud del error</b>				<b>-0,004</b>		

**2) Verificación del desnivel:** En las estaciones C1, C2, C3 y C4 se asume que poseen alturas elipsoidales precisas (cumpliendo con los parámetros de observación descritos en la tabla 1); sin embargo son alturas geométricas referidas a un elipsoide de referencia (h) y no al Nivel Medio del Mar (H). El desnivel medido mediante la ET proviene de una nivelación trigonométrica que, para efectos prácticos y considerando distancias cortas entre las estaciones, puede ser asumido como diferencia de altura ortométrica. Algunos autores consideran que sobre distancias cortas (menores a 1Km), las diferencias de alturas elipsoidales pueden ser asumidas como ortométricas también [11]. Sin embargo, lo que se debe tener en cuenta es que la línea base de calibración sea construida sobre un terreno relativamente plano en donde las ondulaciones de las estaciones sean muy similares entre sí (superficie del geoide y del elipsoide paralelas). Varias fuentes de error que afectan a la precisión de alturas ortométricas, elipsoidales y los valores de las alturas geoidales (ondulaciones), generalmente son comunes en estaciones cercanas entre sí. Debido a que las fuentes de error son comunes, la incertidumbre de las diferencias de alturas entre los puntos adyacentes es significativamente menor que la incertidumbre de

las alturas absolutas de cada punto [12]. Dada esta conceptualización, lo recomendable sería, para calcular los desniveles patrones, aplicar diferencias de alturas haciendo uso de ondulaciones (N) conocidas en las estaciones de la línea base de calibración y aplicando el siguiente modelo matemático [10]:

$$\Delta H_1^2 \approx (h_2 - h_1) - (N_2 - N_1) \quad (4)$$

Por ejemplo, en la tabla 4 se tienen 2 estaciones separadas a 349.924m, cuyas coordenadas geodésicas y desnivel entre ellas ( $\Delta H$  ET: 0,375m) se conocen mediante mediciones GNSS y nivelación trigonométrica convencional respectivamente. Al comparar los desniveles provenientes de las diferencias de alturas elipsoidales y las diferencias de las ondulaciones de varios modelos geoidales con respecto al "ΔH ET", se observa que los resultados son unos pocos milímetros. Si no se toman en cuenta las ondulaciones, las diferencias de alturas elipsoidales no son tan exactas ( $\pm 0.024\text{m}$ ). Estas estaciones forman parte de una *línea base de calibración* que consta de 3 vértices alineados y que se estableció en el marco del Proyecto Sísmico Huyapari 11M 3D3C, en la localidad de El Tigre, Estado Anzoátegui, Venezuela [13].

Tabla 4

Evaluación de desniveles usando diferencias de alturas elipsoidales y ondulaciones de varios modelos geoidales y comparando con patrones provenientes de métodos convencionales.

ESTACIÓN	h Elip (m)	N (MGCV-04) m	N (MGCV-06) m	N (VGM-03) m	N (VGM-12) m	N (EGM-2008) m
B01	153,748	-24,133	-23,924	-24,198	-24,060	-24,215
B02	154,147	-24,106	-23,898	-24,175	-24,036	-24,193
$\Delta H_{B01}^{B02} = \Delta h_{B01}^{B02} - \Delta N_{B01}^{B02} (m)$	0,399	0,372	0,373	0,376	0,375	0,377
$\Delta H_{ET} (m)$	0,375					
$DIF = (\Delta H_{B01}^{B02}) - \Delta H_{ET} (m)$	0,024	-0,003	-0,002	0,001	0,000	0,002
Longitud B01-B02 (m)	349,924					

Una vez estimados los desniveles a usar como patrones, se procede a calcular las tolerancias. El error

estándar ( $\sigma_{\Delta H}$ ) de las observaciones de la nivelación trigonométrica se define así [9]:

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\sigma_{hi}^2 + \sigma_{hp}^2 + \left[ \left( \cos z + \frac{CR \left( \frac{DH}{\sin z} \right) \sin^2 z}{500000} \right) \sigma_D \right]^2 + \left[ \left( \frac{CR \left( \frac{DH}{\sin z} \right)^2 \sin z \cos z}{500000} - DH \right) \frac{\sigma_z}{\rho} \right]^2} \quad (5)$$

En donde:

$\sigma_{hi}$  = Error medición de altura del instrumento ( $\pm 2$ mm para efectos de este trabajo)

$\sigma_{hp}$  = Error medición de altura del prisma ( $\pm 2$ mm para efectos de este trabajo)

$z$  = Ángulo vertical medido

$\sigma_D$  = Desviación estándar en las observaciones de distancias electrónicas

$CR$  = Corrección por curvatura terrestre y refracción (0.0675 en unidades de metro).

$DH$  = Distancia reducida o distancia horizontal

$\sigma_z$  = Desviación estándar del ángulo cenital

$\rho$  = Convierte segundos a radianes (206264.8"/rad)

$\sigma_z = \sqrt{2\sigma_{DIN}^2 + \sigma_a}$

$\sigma_{DIN}$  = Precisión del compensador o lectura mínima del instrumento (especificaciones del fabricante)

$\sigma_a$  = Precisión o exactitud angular del instrumento (especificaciones del fabricante)

Obtenida la desviación típica estándar para cada desnivel, se procede a aplicar el factor vertical  $1.96 * \sigma_{\Delta H}$  que permite estimar el **RMS al 95%** de confiabilidad [10]. La verificación del desnivel se realiza de manera similar a la descrita en el punto 1, es decir, se toman los datos de distancias y desniveles simultáneamente. Adicionalmente se deberá tomar lectura de los ángulos verticales en posición directa en cada una de las tres mediciones de desniveles. En la tabla 5 se muestra un ejemplo de cálculo, supongamos que el  $\Delta H$  "PROMEDIO" medido que se obtuvo en el tramo C1C2 fue  $\pm 0,028$ m, el residual con respecto al desnivel conocido ( $\Delta H$  C1C2 CON =  $\pm 0,026$ m) es  $\pm 0,002$ m. El RMS (95%) determinado para el  $\Delta H$  C1C2 conocido es  $\pm 0,006$ m, lo que indica que la medición está dentro de la tolerancia. Se puede realizar un control del cierre vertical.

Tabla 5  
Verificación de desniveles medidos.

VERIFICACIÓN DE DESNIVELES MEDIDOS VS TOLERANCIAS												
COMPARADOR	$\Delta H_{C1C2}$ (m)	$\Delta H_{C1C3}$ (m)	$\Delta H_{C1C4}$ (m)	<Vert C1C2 (°")			<Vert C1C3 (°")			<Vert C1C4 (°")		
DESNIVEL MEDIDO	0,028	0,402	0,031	89°	58'	15"	89°	26'	33"	89°	50'	28"
	0,028	0,404	0,032	89°	58'	20"	89°	26'	33"	89°	50'	30"
	0,027	0,405	0,032	89°	58'	21"	89°	26'	32"	89°	50'	29"
PROMEDIO	0,028	0,404	0,032	Promedio <Vert (°")			Promedio <Vert (°")			Promedio <Vert (°")		
DIFERENCIA	0,002	0,003	0,004	89°	58'	19"	89°	26'	33"	89°	26'	33"
$\Delta H_{C1C2}$ CON (m)	$\Delta H_{C1C3}$ CON (m)	$\Delta H_{C1C3}$ CON (m)		<Vert (° dec) (z)			<Vert (° dec) (z)			<Vert (° dec) (z)		
0,026	0,401	0,028		89,9719			89,4424			89,4425		
$\sigma_{\Delta H}$ (m)	$\sigma_{\Delta H}$ (m)	$\sigma_{\Delta H}$ (m)										
0,003	0,010	0,012										
RMS(95%) (m)	RMS(95%) (m)	RMS(95%) (m)										
0,006	0,020	0,023										

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95%  $\Delta H_{C1C2}$  CON); OK

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95%  $\Delta H_{C1C3}$  CON); OK

SI (DIFERENCIA) < (RMS 95%  $\Delta H_{C1C4}$  CON); OK

### VERIFICACIÓN DE CIERRE VERTICAL

COMPARADOR	$\Delta H_{C1C2}$ (m)	$\Delta H_{C2C3}$ (m)	$\Delta H_{C3C4}$ (m)	TOTAL $\Delta H_{C1C4}$ (m)
DESNIVEL CONOCIDO	0,026	0,375	-0,373	0,028
DESNIVEL MEDIDO	0,028	0,378	-0,379	0,027
	0,028	0,378	-0,37	0,036
	0,027	0,379	-0,374	0,032
PROMEDIO	0,028	0,378	-0,374	0,032
CIERRE VERTICAL				0,004

En la verificación de los desniveles se debe tener mucho cuidado con las alturas del instrumento (ET) y de los bastones, una mala lectura en ello incide directamente en las mediciones. También es importante destacar que las mediciones de desniveles dependen en gran medida de la influencia del ángulo vertical (z), por lo cual se recomienda comprobar en campo el cierre del ángulo complementario (error de índice) al momento de tomar las lecturas de los mismos.

**3) Verificación de ángulos horizontales y verticales:** Para el caso de las direcciones horizontales se debe estacionar la ET en C3 y se determina el ángulo C1C3C4. El mismo se obtiene a partir del método de las series (4 series en total, una en cada posición del anteojo: directa e inversa). Luego, se compara éste con el **ángulo GPS conocido** a través del azimut de la línea base de calibración (ver figura 1), es decir:

$$(360^\circ - AZ_{C3}^{C1}) + AZ_{C3}^{C4} = \theta \quad (6)$$

En donde:

$$AZ_{C3}^{C1} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta E_{C3}^{C1}}{\Delta N_{C3}^{C1}} \right) \text{Azimut de C3 a C1}$$

$$AZ_{C3}^{C4} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta E_{C3}^{C4}}{\Delta N_{C3}^{C4}} \right) \text{Azimut de C3 a C4}$$

$\Delta E$  y  $\Delta N$  = Diferencia coordenada este UTM y coordenada norte UTM entre las 2 estaciones.

$\theta$  = Ángulo GPS conocido.

La diferencia del ángulo promedio obtenido de las series realizadas (179° 59' 21") con respecto al ángulo GPS conocido (179° 59' 20") debe ser mejor a 10". También se necesita verificar el error de colimación del Limbo del instrumento (Lectura Directa + Lectura Inversa = 180° ± 20") cuyo límite o tolerancia entre lecturas es 20". El ángulo obtenido para cada posición del anteojo ("Prom Dir" y "Prom Inv") debe ser menor de 10", este dato es observado en el campo "DIFERENCIA" de la tabla 6. La toma de las lecturas en posición vertical se realiza de manera simultánea con los ángulos horizontales. Se realizan 4 series, una en cada posición del anteojo: directa e inversa. Al sumar las lecturas directas e inversas en cada estación (C1 y C4), el resultado debe ser 360° ± 20", la diferencia con 360° representa el error de índice de la Lidada del equipo y no debe ser mayor a 20", valor establecido como límite para el control de calidad. Ver tabla 7.

**Tabla 6**  
Verificación del ángulo horizontal

VERIFICACIÓN DE ÁNGULOS HORIZONTALES							
ESTACIÓN	PTO.OBS	LECTURAS		PROM. DIR	PROM. INV	DIFERENCIA	PROM (DIR+INV)/2
		DIRECTO	INVERSO				
C3	C1	00° 00' 00"	179° 59' 55"	179° 59' 20"	179° 59' 23"	00° 00' 03"	179° 59' 22"
	C4	179° 59' 20"	359° 59' 18"				
	C1	90° 00' 00"	269° 59' 54"	179° 59' 21"	179° 59' 19"	00° 00' 02"	179° 59' 20"
	C4	269° 59' 21"	89° 59' 13"				
C3	C1	180° 00' 00"	359° 59' 55"	179° 59' 16"	179° 59' 23"	00° 00' 07"	179° 59' 19"
	C4	359° 59' 16"	179° 59' 18"				
	C1	270° 00' 00"	90° 00' 01"	179° 59' 25"	179° 59' 21"	00° 00' 04"	179° 59' 23"
	C4	89° 59' 25"	269° 59' 22"				
ANG PROM							179° 59' 21"
ANG GPS							179° 59' 20"
DIF ANG							00° 00' 01"

**Tabla 7**  
Verificación del ángulo vertical.

VERIFICACIÓN DE ÁNGULOS VERTICALES						
ESTACIÓN	PTO.OBS	LECTURAS		ANG. VERT	DIFER. en C1	DIFER. en C4
		DIRECTO	INVERSO			
C3	C1	90° 03' 26"	269° 56' 27"	359° 59' 53"	00° 00' 07"	00° 00' 05"
	C4	89° 26' 32"	270° 33' 23"	359° 59' 55"		
	C1	90° 03' 27"	269° 56' 24"	359° 59' 51"	00° 00' 09"	00° 00' 03"
	C4	89° 26' 28"	270° 33' 29"	359° 59' 57"		
C3	C1	90° 03' 22"	269° 56' 23"	359° 59' 45"	00° 00' 15"	00° 00' 06"
	C4	89° 26' 32"	270° 33' 22"	359° 59' 54"		
	C1	90° 03' 23"	269° 56' 30"	359° 59' 53"	00° 00' 07"	00° 00' 06"
	C4	89° 26' 32"	270° 33' 22"	359° 59' 54"		
ERROR DE ÍNDICE					00° 00' 10"	00° 00' 05"
PROMEDIO					00° 00' 07"	

Actualmente, en los proyectos sísmicos de exploración, se aplican diversas metodologías que varían de un proyecto a otro y carecen de ciertos fundamentos técnicos. En algunos casos se usan 3 comparadores alineados a una distancia de 500m espaciados entre sí a 0m-150m-350m ó 0m-250m-250m, sin considerar que estas distancias deben ser múltiplos de la unidad de longitud de onda que posee el instrumento para poder observar las tendencias cíclicas del mismo. No se modela la constante aditiva ni se realizan comparaciones de los ángulos horizontales medidos con algún patrón externo. No se consideran las precisiones que establece el fabricante de los equipos sino las tolerancias del proyecto y tampoco se realiza alguna certificación de la línea base de calibración. Dada la importancia de la fase de topografía en los proyectos de adquisición sísmica terrestre y a la naturaleza de las mediciones (replanteo de coordenadas), es vital poder detectar de manera adecuada y oportuna los posibles errores que pueda presentar alguna ET. Es muy importante destacar que los datos empleados en este artículo son netamente teóricos; sin embargo, se

han realizado algunas pruebas de cálculos (por ejemplo, en el Proyecto Sísmico Huyapari 11M 3D3C [14]) usando el principio de esta metodología y se observó que si se consideran todos los elementos resaltados en el desarrollo de este trabajo, los resultados pueden ser satisfactorios y determinantes. También se recomienda considerar el factor PPM (parámetro atmosférico del lugar: presión, humedad y temperatura) aunque este influya solamente en mediciones de distancias largas (>1000m).

## Conclusión

El procedimiento descrito permite evaluar los errores presentes en un EDM (constante aditiva y error cíclico), verifica los valores angulares del teodolito electrónico de una Estación Total, así como también los desniveles medidos por el equipo. La línea base de calibración propuesta considera los estándares del NGS y se adapta a las necesidades operativas de un proyecto sísmico de exploración. Se recomienda contar con profesionales

calificados y con experiencia, ya que los errores personales (equivocaciones) deben ser minimizados del procedimiento. La metodología permite verificar y/o calibrar una Estación Total en campo, sin embargo, para el proceso de calibración será necesario considerar las especificaciones técnicas y recomendaciones del fabricante.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Land VICTORIA: "EDM calibration handbook, Edition 15". Department of Transport, Planning and Local Infrastructure, Melbourne (2014), 8-13. [Links]
- [2] Estudio de Topografía Meridiano 0.: Manual Técnico Procedimiento Verificación Equipos Topográficos. Blog Estudio de Topografía Meridiano 0, España (2011), 8. [Links].
- [3] U.S Army Corps of Engineers: "Structural Deformation Surveying". EM 1110-2-1009, Pub., Washington, 2003. [Links].
- [4] García J., Ruiz A., Mesa J.: "Evaluación de la incertidumbre de medida de ángulos, distancias y desniveles medidos con instrumentación topográfica". Rev. Téc. Ing. Mapping, No. 149 (2011) 5-12. [Links].
- [5] Dracup J., Fronczek C., Tomlinson R.: "Establishment of Calibration Base Lines". NOAA Technical Memorandum NOS NGS 8, Silver Spring (2014), 4-10. [Links].
- [6] Rudolf Staiger: "Recommended Procedures for Routine Checks of Electro-Optical Distance Meters". FIG - A technical Monograph, No 9 (1994) 8-10. [Links].
- [7] ITRF: International Terrestrial Reference Frame.: "ITRF solutions". Paris, 2016. [Links].
- [8] Acuña G.: "Introducción al Posicionamiento GPS de Punto Preciso (PPP): Fundamentos Teóricos". Trabajo de Ascenso para optar a la categoría de Profesor Asociado. Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2008.
- [9] Ghilani C., Wolf P.: "Adjustment Computations, Spatial Data Analysis, Forth Edition". JOHN WILEY & SONS, INC. Pub. New Jersey y Canada, 2006.
- [10] Federal Geographic Data Committee: Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. FGDC-STD-007.3, Virginia (1998), 10-11. [Links].
- [11] US Army Corps of Engineers: "NAVSTAR Global Positioning System Surveying". EM 1110-1-1003. Pub., Washington, 2003. [Links].
- [12] Dracup J., Fronczek C., Tomlinson R.: "Guidelines for Establishing GPS-Derived Orthometric Heights". NOAA Technical Memorandum NOS NGS 59, Silver Spring (2008) 3-5. [Links].
- [13] Prince A., Empresa Sísmica Biellovenezolana.: «Establecimiento de la Línea Base de Calibración». Proyecto Sísmico Huyapari 11M 3D3C. Informe Técnico de PDVSA, Venezuela (2013).
- [14] Prince A., Empresa Sísmica Biellovenezolana.: «Verificación de Equipos Convencionales (Estaciones Totales)». Proyecto Sísmico Huyapari 11M 3D3C. Informe Técnico de PDVSA, Venezuela (2013).

Recibido el 15 de Junio de 2016  
En forma revisada el 27 de Marzo de 2017