

## ACTAS ALEXANDER: LA ELABORACIÓN DE LA INFORMACIÓN

*Esteban Dörries*

Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia  
Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica  
edorries@una.ac.cr

### RESUMEN

Para comparar la información obtenida de las "Actas Alexander" con la situación actual, se diseñó, midió y calculó una campaña GPS a lo largo de la parte amojonada de la frontera norte. La transformación de coordenadas en diversas variantes, junto a otros criterios, permitió realizar el estudio comparativo de los mojones fronterizos.

**PALABRAS CLAVES:** frontera, demarcación, Nicaragua, Costa Rica, E. P. Alexander.

### ABSTRACT

To compare the obtained data of the "Actas Alexander" with the present situation, it was necessary to design and calculate a crossed GPS measurement along the pegged limits of the northern border. The transformation of coordinates in diverse variants, next to other criteria, allowed to make the comparative study of border landmarks.

**KEYWORDS:** border, demarcation, Nicaragua, Costa Rica, E. P. Alexander.

### INTRODUCCIÓN

Este segundo artículo es producto del proyecto de investigación de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional llamado "Estudio Comparativo de la Posición de los Mojones de la Delimitación de la Frontera Norte según el Trazado de Alexander y según la

Determinación en el Sistema WGS84". En el primero, titulado "Actas Alexander: la extracción de la información", se explicó el complejo y laborioso proceso para obtener, controlar, depurar y seleccionar la información numérica, gráfica y literal, contenida en las actas. Como el objetivo general del proyecto se centra en la comparación de esa información con la que se pueda obtener con métodos GPS, comenzaremos con ese aspecto para continuar con la elaboración y comparación de datos.

### LA INFORMACIÓN OBTENIDA POR LOS LEVANTAMIENTOS DE CAMPO CON GPS

Las coordenadas WGS84 en el marco de referencia ITRF2000 de los mojones de la frontera norte de Costa Rica representan uno de los insumos fundamentales para uno de los objetivos del proyecto, que consiste en compararlas con las posiciones de los mojones según el trazado de Alexander, considerando solamente la parte horizontal.

El vínculo con el marco de referencia ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame) se obtuvo al incluir en las mediciones las estaciones de observación continua más cercanas, MANA, en Managua, TEG1, en Tegucigalpa, y ETCG. Las dos primeras pertenecen a la red mundial, los datos de coordenadas y los archivos de datos GPS están disponibles en la página de National Geodetic Survey (NGS) <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>. La estación ETCG, con su antena ubicada en la azotea del edificio de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, registra datos cada 30 segundos en sesiones de 24 horas.

Las coordenadas en el ITRF2000 fueron calculadas a partir de siete sesiones de 24 horas, obteniendo exactitudes de  $\pm 3$  mm,  $\pm 8$  mm y  $\pm 7$  mm en latitud, longitud y altura elipsoídica, respectivamente. El cálculo se realizó por medio del programa GIPSY-OASIS II de la NASA.

## EL DISEÑO DE LAS CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

En la etapa de diseño de las campañas de medición se partió de la disposición de dos receptores geodésicos Trimble 4000SST y que se utilizarían como estaciones de amarre MANA y ETCG, ya que su posición en el sistema WGS84 fue determinada con alta exactitud en el proyecto de investigación "Estudio Comparativo entre los Datum Ocotepaque y WGS84" y actualizada a la época de la medición.

Las campañas de medición estuvieron condicionadas a la aplicación de dos receptores geodésicos móviles y dos permanentes en las CORS.

Para el levantamiento de los detalles de accesos y de mojones intermedios se usó un receptor Geoploter de una frecuencia con capacidad de medir con la fase de la portadora.

Para minimizar la duración de la medición se optó por el uso de un solo vehículo, estacionando uno de los receptores 4000SST en un punto base cercano a la frontera, de coordenadas a determinar, en el que se midieron sesiones de más de diez horas. En los mojones con un solo receptor 4000SST, denominado móvil I, se midieron sesiones de dos horas. Las sesiones distribuidas en varios días y su prolongación temporal en la estación fija permitieron utilizar parte del tiempo de registro de los archivos, el no común al de los archivos de los mojones, para lograr la independencia de los vectores y una alta calidad en la determinación de las coordenadas de esta estación a partir de las CORS.

El diseño de la medición debió modificarse contemplando TEG I como estación CORS de amarre en sustitución de MANA, que dejó de registrar datos por razones que se desconocen, durante los días en que se efectuaron las mediciones en los mojones II, III, IV, V, VI y VII. Las mediciones GPS en la configuración de diseño y con el receptor Trimble 4000SST fueron complementadas con mediciones hechas con un receptor Geoploter, obteniendo coordenadas de la estación corregidas diferencialmente con una exactitud que se estima en  $\pm 30$  cm en longitud y latitud. Además, hubo necesidad de realizar mediciones

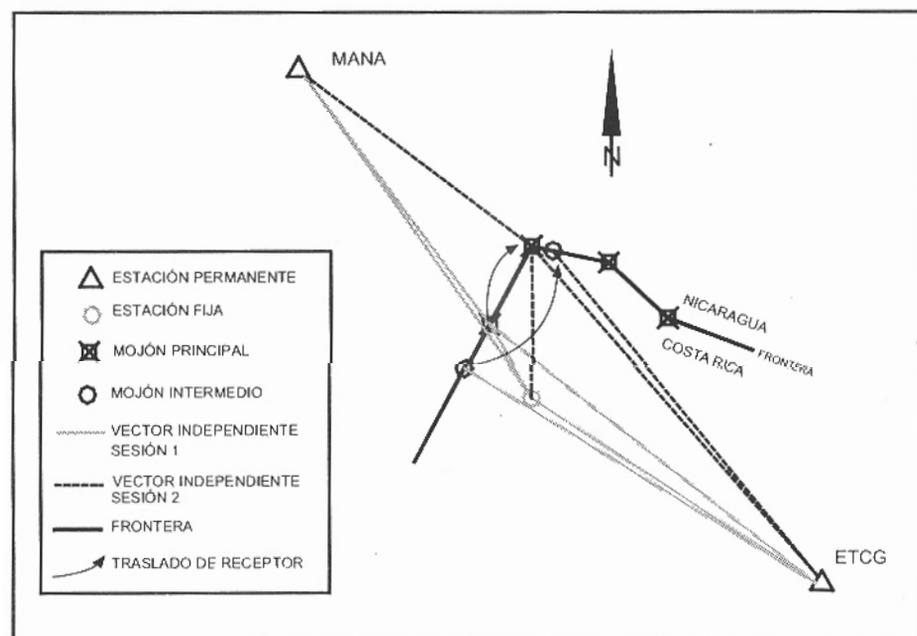


Figura 1. Configuración de la medición original.

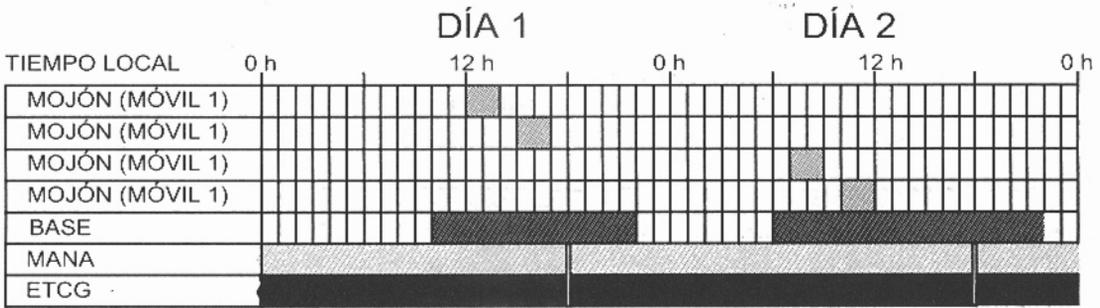


Figura 2. Programación de las mediciones en estaciones permanentes, bases y mojones.

excéntricas para determinar las coordenadas WGS84 de los mojones VII, XIIA y XVII, que se efectuaron sobre dos estaciones que conformaron una base.

En el cuadro 1 se especifican los receptores y estaciones definitivos utilizados durante la campaña de medición.

El ajuste general se efectuó con el programa Trimble Geomatic Office (TGO) de manera libre, considerando 135 vectores para obtener 349 grados de libertad. El ajuste se hizo considerando sólo la parte horizontal, debido a que la calidad de la determinación de la altura de algunos mojones fue muy pobre por la cortina de obstáculos formada por árboles. En cuanto a la calidad de las coordenadas de los 28 puntos en el ajuste, la desviación estándar al 95% de probabilidad de las coordenadas ajustadas tiene valores entre  $\pm 2$  cm y  $\pm 10$  cm en latitud, sólo seis coordenadas de latitud muestran valores entre 11 y 20 cm. Las longitudes ajustadas tienen desviaciones estándar entre  $\pm 2$  y  $\pm 10$  cm, pero hay 10 coordenadas de longitud con desviaciones estándar entre 11 y 25 cm.

## METODOLOGÍAS DE LEVANTAMIENTO Y SUS EXACTITUDES

**ALEXANDER:** Mediciones astronómicas para determinación de acimutes por observaciones solares en las proximidades de los mojones I, XIX y XX. El acimut de partida de la estación al faro se redondea al 1'; la desviación estándar del promedio es de 74"; triangulación para vincular el centro de la Plaza Victoria en San Juan del Norte con el sitio

### Cuadro 1. Receptores y antenas utilizados.

ESTACIÓN	RECEPTOR	ANTENA
MANA* (CORS)	Trimble SSI*	Choque Ring*
TEG1* (CORS)	Trimble 5700*	TRM29659.00*
ETCG (CORS)	Trimble 5700	Zephyr geodésica
MÓVIL 1	Trimble 4000SST	Zephyr geodésica
MÓVIL 2	Trimble Geoexplorer	Incorporada
BASE	Trimble 4000SST	Geodésica L1/L2

donde emplazar el mojón inicial; poligonación con medida de direcciones, generalmente más de dos sobre el Río San Juan y sólo dos en el resto de los levantamientos.

**GPS:** Como los valores de la desviación estándar con una probabilidad del 95% son aproximadamente el doble de la convencional, podemos afirmar que ésta es de a lo sumo 0.1 m, totalmente suficiente para los efectos del proyecto.

Teniendo en cuenta las características de los métodos aplicados, es evidente que la exactitud GPS no sólo es la mayor, sino que es prácticamente homogénea para todo el campo puntual. Por sus características de vínculo con vértices existentes, los métodos convencionales pero geodésicos, utilizados por el IGN, son menos exactos y dependen en mayor grado de la configuración. La medición realizada por la Comisión Alexander se mantiene dentro de ciertos límites de exactitud en la parte del Río San Juan, pero la situación empeora sensiblemente en los

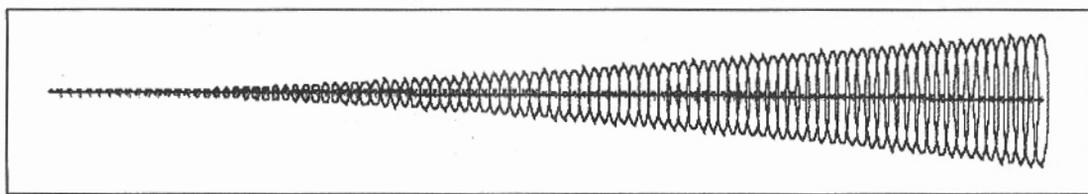


Figura 3. Propagación de errores en poligonal extendida.

tramos por la orilla del lago, los de vínculo y la astronómica.

Una poligonal extendida de 100 lados de 300 m cada uno, amarrada en un extremo, con un error angular de 1' y un error lineal de 1 m, tiene un comportamiento teórico de la propagación de errores que puede verse en la figura 3, que no tiene escala. Las elipses de confianza al 95% de probabilidad primero son pequeñas y con el semieje mayor longitudinal, pero pronto pasa a predominar el error angular, lo que origina la orientación transversal de las elipses. En este caso teórico, la centésima elipse tiene un semieje menor de 350 m y el mayor de 1750 m. Esto justifica plenamente la falta de necesidad de una reducción de los datos Alexander al plano Lambert, en el que se encuentran los datos IGN y se van a trasladar los GPS.

### TRANSFORMACIÓN DE SIETE PARÁMETROS DE GPS A LAMBERT NORTE

Las coordenadas obtenidas a partir de las mediciones GPS en los puntos de la frontera norte, mojones Alexander nuevos y bases auxiliares, están referidas al elipsoide asociado al sistema WGS84. En este punto se describirá la forma de transformar esas coordenadas elipsoidicas  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  y  $H$  a coordenadas planas en la proyección cartográfica Lambert Norte. Debe aclararse que el programa TGO suministra tanto la altura elipsoidica  $h$  como la ortométrica  $H$ , para lo cual determina la ondulación del geode con el modelo Carib97.

Como las coordenadas elipsoidicas están referidas al elipsoide WGS84 debe aplicarse primero una transforma-

ción semejante de siete parámetros (Helmert espacial) para pasar al elipsoide Clarke 1866, referido al datum de Ocoatepeque. Los parámetros que permiten esa transformación fueron determinados en el marco del proyecto de investigación sobre el estudio comparativo de los datum de Ocoatepeque y WGS84 (DÖRRIES y ROLDÁN 1999). Una vez realizada la transformación de datum, se aplican las fórmulas clásicas de proyección al plano cartográfico Lambert conforme de cono secante, evidentemente con los parámetros que corresponden al sistema Lambert Norte de Costa Rica.

Para realizar la transformación con un programa existente, se utilizó la hoja de cálculo en EXCEL denominada TRANS7, que está basada en macros en Visual Basic. La entrada a esta hoja está protegida por un código, pero una vez inicializada, presenta el aspecto de la figura 4. En ella quedan destacados dos sectores de columnas, las de entrada (2 a 5) y las de salida (19 a 21). Configurada de esta manera, la hoja de cálculo está prevista para transformaciones rigurosas de coordenadas entre los sistemas Lambert Norte o Sur y CRTM y viceversa.

	1	2	3	4	5	19	20	21
1	PUNTO	ENTRADA DE COORDENADAS			ONDULACIÓN WGS	SALIDA DE COORDENADAS		
2		NORTE	ESTE	COTA		NORTE	ESTE	PROYECCIÓN
3	ACOSTA	281047,366	470341,374	290,400	9,776	1166172,670	434094,863	C.R.T.M.
4	BALLENA	262987,368	376767,843	107,860	9,894	1149163,586	341430,701	C.R.T.M.
5	BASE ESTE	229093,818	613689,259	10,470	10,603	1114034,889	577336,158	C.R.T.M.
6	BASE NORTE	224075,445	449597,896	20,290	10,218	1109189,434	413300,212	C.R.T.M.
7	BRUJO	207619,469	427959,965	692,160	10,636	1092758,059	391653,584	C.R.T.M.
8	BUVIS	171096,527	563111,628	3490,856	16,638	1056118,492	526713,056	C.R.T.M.
9	CABUYAL	236011,193	452685,334	654,790	10,811	1121118,397	416598,123	C.R.T.M.
10	CAMPOS	69930,454	665266,173	912,155	14,157	954872,190	626670,538	C.R.T.M.

Figura 4. Transformación de siete parámetros en hoja de cálculo TRANS7.

Como los datos GPS obtenidos estaban en coordenadas elipsoidicas, no tenía sentido calcular las coordenadas CRTM para poder introducir las directamente en la hoja, ya que TRANS7 comenzaría por recalculas las elipsoidicas WGS84. Se procedió entonces a abrir las columnas para poder cambiar algunos pasos del proceso y entrar directamente las coordenadas GPS ajustadas por el programa TGO. De esta forma se procesaron todas las coordenadas y se copiaron como valores en una hoja independiente, de la cual se muestran en la figura 5 el encabezado y algunas líneas.

TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS ELIPSOÍDICAS GPS A LAMBERT NORTE CON PROGRAMA TRANS7							
PUNTO	COTA	Ondulación WGS	Latitud original	Longitud original	h WGS84	SALIDA DE COORDENADAS	
						NORTE	ESTE
MO2	55,922	9,122	10,9952300	84,3592867	65,044	330446,496	496951,293
MO3	51,846	9,144	10,9778023	84,3764674	60,390	328518,900	495073,323
MO4	51,956	9,133	10,9751925	84,3998333	61,089	328230,706	492519,437
MO5	56,192	9,150	10,9546955	84,4202553	65,342	325963,981	490286,716

Figura 5. Hoja TRANS7 modificada.

## TRANSFORMACIONES

Las transformaciones entre sistemas de referencia son necesarias para poder comparar las coordenadas de los mojones según su origen. Ya se había expuesto que se consideró conveniente tener en cuenta las coordenadas asignadas a los mojones por el IGN en el plano Lambert Norte y, por otro lado, se detectaron grandes discrepancias entre el material numérico y el gráfico contenido en las "Actas Alexander", lo que permite usar la transformación semejante de Helmert. Para llegar al criterio de transformación más adecuado a los propósitos comparativos del proyecto, se considerarán a continuación las coordenadas en cuatro sistemas y de acuerdo con la siguiente nomenclatura:

- ALEn:** coordenadas en el plano Alexander como dato numérico, extraído de las tablas  
**ALEg:** coordenadas en el plano Alexander como dato gráfico, extraído de los croquis  
**IGN:** coordenadas en el plano Lambert Norte determinadas por el IGN

**GPS:** coordenadas GPS determinadas por el proyecto y transformadas al plano Lambert Norte

Las primeras transformaciones se realizaron considerando los datos del IGN, con la finalidad primordial de compararlas con las dos variantes de coordenadas en el plano Alexander. Aunque las discrepancias son grandes, es clara la mayor calidad de los puntos ubicados con el sistema gráfico, lo que conduce a seleccionarlo como el plano Alexander. También las transformaciones GPS al plano Alexander se realizaron usando ALEn y ALEg, y siempre se mantiene el producto obtenido de los croquis como el mejor.

Al comparar GPS e IGN, ambos en Lambert Norte, los resultados de la transformación para 23 puntos idénticos deberían coincidir a menos de los errores propios de todo proceso de medición. El mayor residuo en este es tolerable, pero en norte el mayor es de 73 m, lo que indica que hay otro tipo de problema. Éste se refleja en una rotación de 5 mgon, pero fundamentalmente en un factor de escala de 32 mm/1 km, valor muy grande para este caso.

Los resultados obtenidos llevan a concentrar las transformaciones al caso GPS en Lambert Norte a Alexander de gráficos, o bien, de GPS a ALE, y naturalmente también IGN a ALE. Como los resultados todavía son demasiado discrepantes, se procedió a analizar dos variantes de transformación parcial para los valores GPS, por selección de puntos y por sectores fronterizos, como se describe en los dos próximos temas.

## LAS TRANSFORMACIONES CON SELECCIÓN DE PUNTOS IDÉNTICOS

La primera transformación se realizó en una hoja de cálculo con los 27 puntos idénticos GPS-ALE disponibles. Para no considerar por separado los residuos en este y en norte, se calculó la distancia  $\Delta$  entre el punto transformado y el punto destino, y se ordenó en la hoja de cálculo por sus valores crecientes. El punto con la mayor discrepancia resultó ser el correspondiente al mojón XX, con

384 m en la diferencia de posición. Para la segunda transformación se escogieron los 20 primeros puntos, es decir, los 20 con menor  $\Delta$  en la primera. Al transformar con ellos como idénticos, las distancias  $\Delta$  promedios disminuyeron de 171 a 108 m, aspecto en principio esperado y alentador. Sin embargo, para detectar una eventual tendencia, se calcularon las diferencias entre los  $\Delta_0$ , o sea, los  $\Delta\Delta$ . Estos valores tienen signo por ser resultado de una diferencia, si el valor es negativo la situación para el punto mejoró, lo que ocurre para la mayoría, 14 de 20. Al reordenar la hoja en sus primeras 20 filas por valores crecientes de  $\Delta$ , se notó que el máximo en el mojón XIII A no era sensiblemente menor que en la transformación de 27 puntos, y además pudo observarse una tendencia natural de aglomeración de puntos próximos. Como comprobación final, se limitó la transformación a los diez primeros puntos, con lo cual se obtuvo la configuración final. Los  $\Delta$  bajan a menos de la mitad en promedio, pero los  $\Delta\Delta$  continúan mostrando un comportamiento divergente.

Los diez puntos que quedaron después de este proceso definitivamente muestran, por su ubicación, que de esta forma no se logra una buena transformación, con un buen acercamiento a los puntos destino. Los siete primeros puntos pertenecen al tramo que rodea al Castillo Viejo y se mantiene paralelo al Río San Juan, y los otros tres son parte de la paralela al Lago, pero son casi un solo punto, el XVII D un poco antes y el XVII A un poco después del mojón XVII. Las coordenadas transformadas de los puntos que dejaron de ser idénticos son calculadas, y por ejemplo la diferencia de posición transformada del mojón XX en la primera y la última transformación es de unos 175 m.

## LA TRANSFORMACIÓN POR SECTORES FRONTERIZOS

El criterio de realizar más de una transformación considerando diferentes sectores de la frontera amojonada, de modo que cubran el total de mojones, se basa tanto en los resultados de las transformaciones parciales y globales realizadas anteriormente, como en los siguientes fundamentos: los trabajos de levantamiento de la comisión fueron realizados en etapas y por tramos, que desde un punto de vista que en parte es conceptual y en

parte metodológico, están definidos por el Río San Juan, la poligonal por el Lago de Nicaragua, los vínculos con la poligonal fronteriza, y la poligonal astronómica; los vínculos con la poligonal fronteriza muchas veces son endeables o no existen; la naturaleza del terreno tuvo su influencia en la metodología de levantamiento y en la distancia entre mojones principales.

El primer intento contempló tres sectores, entre los mojones II y XI, XII y XIV A, y XV y XX. El primero corresponde a la zona próxima al Río San Juan, dejando sin embargo el mojón XII para el siguiente tramo, que es de lados extremadamente largos, centrados en el muy conocido mojón XIII y culminando donde la línea fronteriza se vuelve a aproximar al Lago. El siguiente y último tramo en esta transformación tiene varios puntos próximos al Lago y luego tiene un quiebre en el mojón XIX, para culminar con la extensa recta astronómica.

Se calcularon para cada punto: las coordenadas transformadas, los residuos en este y norte, la distancia entre el punto transformado y el destino, el acimut de esa línea, y para cada transformación: las traslaciones, la rotación, el factor de escala y los errores medios de la unidad de peso y de punto. De la magnitud y orientación de los vectores de posición no puede deducirse un comportamiento sistemático. La rotación del primer tramo llega casi al grado, la del segundo es semejante, pero la última es totalmente diferente y cambia de signo. Los factores de escala son todos menores que uno, pero con valores muy diferentes, 3,3 m/1 km, 6,2 m/1 km, y 8,0 m/1 km. Estos resultados confirman que es imposible considerar una transformación global que se mantenga semejante, habría que utilizar una polinómica u otra variante, pero para los fines del proyecto sería negativo perder la semejanza de las figuras.

Estos resultados llevaron a buscar una mejor aproximación contemplando cinco tramos: el primero del mojón II al VI (crítico), el segundo del VII al XII, el tercero manteniendo el XII (por la gran distancia al XIII) y terminando en el XIV-XIV A, el cuarto del XIV B al XVIII, y el último cubriendo la recta astronómica, del XIX al XX. Las magnitudes de los vectores diferencia pasan a ser todas menores que 100 m, lo que no ocurría antes,

la diferencia en los giros de los distintos sectores es más marcada, varía prácticamente entre  $+1'$  y  $-1'$ , el factor de escala del primer tramo es ahora mayor que uno y el del segundo prácticamente uno, y el tramo central se mantiene con el mismo error de punto, pero es superado en ese sentido por el primer tramo.

El conjunto de coordenadas GPS transformadas a Lambert Norte y posteriormente al plano Alexander mediante las transformaciones en cinco sectores, configura el punto de partida para las siguientes etapas del proceso de evaluación, y para que se pueda efectuar también un análisis comparativo con los datos del IGN, se procedió a realizar las mismas cinco transformaciones por sectores para las coordenadas IGN, las que de por sí ya estaban en el plano cartográfico Lambert Norte.

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS ALEXANDER, IGN Y GPS

La representación gráfica conjunta de los datos numéricos, procesados de acuerdo con lo explicado en el primer artículo, tiene la importancia de facilitar la interpretación de la ubicación relativa de los puntos. Desde el comienzo de la elaboración de los datos se fueron generando gráficos que en esos momentos servían fundamentalmente para la confirmación o el rechazo de la información, la detección de incongruencias y la confirmación de las partes correctas.

Los gráficos originales provenientes de su generación por el programa ARGE<sup>®</sup> son en un formato literal propio del programa DesignCAD<sup>®</sup>, que en todos los casos fueron pasados a un formato vectorial más moderno de DCAD<sup>®</sup>. Todos los gráficos derivados de los originales fueron procesados con el mismo programa. Como este formato no es reconocido por muchos programas, se convirtieron los archivos a formatos de Autodesk<sup>®</sup> y en algunos casos a un formato raster. En los croquis de levantamientos y de las proximidades de un mojón, el gráfico original se realizó con AutoCAD<sup>®</sup> en formato .dwg y guardado también en el formato supuestamente universal .dxf. Estos gráficos se convirtieron al formato .dcd de DCAD<sup>®</sup> y a algún formato raster, fundamentalmente .tif, .wmf y .jpg.

Los gráficos generados por el programa ARGE tienen ciertas particularidades, de modo que fueron procesados en su escala y el tamaño de ciertos objetos, se cambiaron los colores para que fueran uniformes a lo largo de todos los gráficos de este tipo en el proyecto, y se colocaron puntos de enlace de coordenadas “redondas” para unir los tramos.

Con estas condiciones generales de partida, se fueron uniendo los distintos tramos del Río San Juan para formar un gráfico único. Posteriormente se unieron al gráfico del río todos los demás tramos, los del lago, los de enlace y la recta astronómica. A medida que se avanzaba en la construcción del gráfico general se utilizaban capas diferentes para cada tramo o elemento auxiliar, hasta llegar al archivo IMM1aXXentornos.dcd que se encuentra como figura 6. Es natural que no puedan distinguirse detalles de ningún tipo, se muestra aquí sólo con el fin de ilustrar la cantidad de información contenida originalmente en las “Actas Alexander” y que fue procesada por el proyecto. Para generar gráficos impresos que permitieran distinguir los detalles, se partió de un formato de 10 km x 13 km, que graficado en escala 1:50000 representa 20 cm x 26 cm, y que apenas cabe en una hoja tamaño carta. Ese rectángulo, tomado en forma vertical u horizontal, da lugar a los 22 “entornos” en que se subdividió la frontera para su representación.

Aunque no puedan apreciarse detalles, en la figura 6 puede verse parcialmente un trazo que corresponde a la poligonal fronteriza. En realidad se incorporaron cuatro conjuntos de vértices y lados que corresponden a la inserción de las cuatro variantes definidas anteriormente: ALEn en color naranja, ALEg en color rojo, IGN en color verde y GPS en color azul, los que en la figura no se distinguen. A partir del gráfico general se seleccionaron partes para poder representarlas en escalas mayores. Se consideraron la margen derecha del Río San Juan y la parte amojonada, los cinco sectores de transformación en la parte amojonada, los 22 entornos de 10 km x 13 km, y detalles en escalas mayores.

En un proceso de superposición gráfica, se comenzó con el recorte de la imagen del mapa para que cubriera la región considerada, la determinación de la diferencia de acimutes respecto al gráfico del

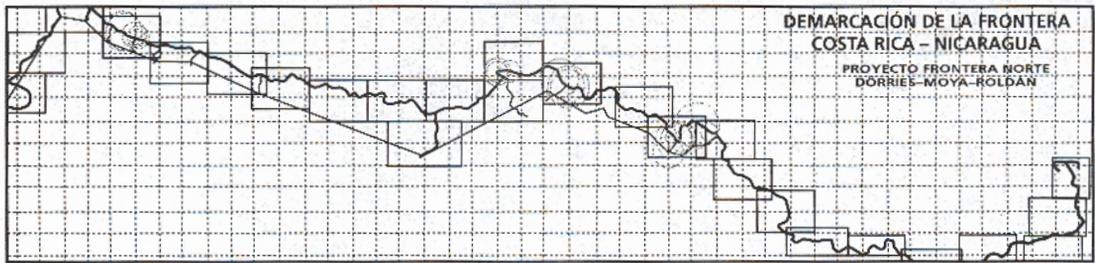


Figura 6. Demarcación de la frontera norte según las "Actas Alexander".

proyecto, y el factor de escala entre ambos. Los valores para cada uno de los sectores, el tercero subdividido en dos partes, no superaron el grado sexagesimal en acimut y el 1% en escala, pero de no tenerlos en cuenta hubieran sido notorios visualmente.

El mapa recortado fue girado y cambiado de escala antes de montarle la gráfica vectorial del mismo sector, cuidando la coincidencia de coordenadas.

El proceso de montaje fue realizado con DCAD, los archivos están en escala natural, el análisis se realiza en el monitor o imprimiendo recortes como el que se encuentra en la figura 7. En ella puede distinguirse el fondo en tonos de gris, que es parte del mapa básico, con la línea de frontera, el quiebre en el mojón VI y parte de la cuadrícula. El tramo final de la poligonal de la Comisión Alexander por el Caño Poco Sol se identifica por sus lados verdes, sus vértices indicados con círculos azules y sus números de identificación en rojo. Las cuatro poligonales fronterizas se distinguen una de otra por el código de colores señalado anteriormente.

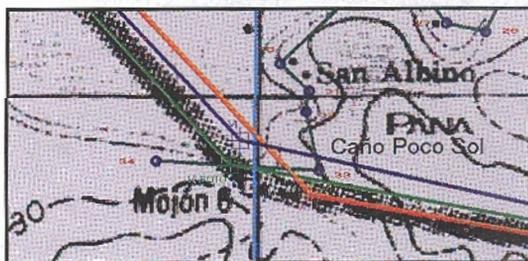


Figura 7. Montaje del mapa básico con gráfico vectorial DCAD.

Las de las actas aún coinciden muy bien, en las otras dos hay discrepancias, pero debe recordarse que su ubicación quedó definida en la correspondiente transformación sobre lo que aquí es la poligonal en rojo.

Para contribuir con un aspecto gráfico simple que fuera un elemento de juicio y de consulta en el análisis de resultados y la clasificación de los mojones que se hará más adelante, se hicieron recortes de los gráficos generados por el proyecto, sin la información cartográfica del punto anterior. Los recortes se unificaron a una escala de 1:5000, que es reforzada por una escala gráfica integrada en cada uno de ellos. Contienen la representación de los vértices y parte de los lados de cada una de las poligonales fronterizas en el color convenido para identificarla. Además, aparecen partes de poligonales de enlace u otros elementos, siempre que existan en las proximidades. Esto conduce a gráficos individuales que, siendo de la misma escala, tienen una cobertura muy diferente.

El ejemplo de la figura 8 muestra la casi perfecta coincidencia entre el verde (IGN) y el azul (GPS), y algo semejante para las variantes Alexander, pero sólo hasta el vértice XI, a partir del cual el trazo rojo pasa por el punto poligonal 3 y continúa en forma casi paralela a las dos primeras, pero en color naranja (ALEn) el trazo se aleja con un acimut mucho mayor al real.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La definición de la identidad de los mojones es hipotéticamente el resultado de la comparación de las coordenadas Alexander y las coordenadas GPS, si estadísticamente son concordantes, el mo-

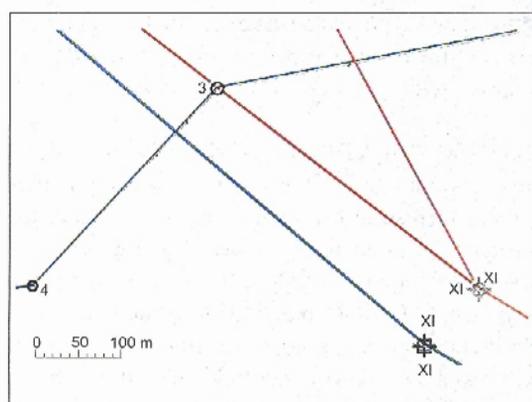


Figura 8. Recorte de gráfico vectorial del proyecto.

jón pasa la prueba, y es dudoso o falso en caso contrario. Esta hipótesis de trabajo no puede mantenerse como único criterio de definición de identidad, ya que las coordenadas obtenidas de las actas son mucho menos confiables que lo esperado. Esto se debe a varios factores que ya se han analizado con detenimiento, desde errores groseros hasta exactitudes y propagación de errores francamente muy por debajo de los estándares de la época. Sin embargo, es factible realizar un diagnóstico con un adecuado nivel de certeza si se recurre a fuentes de información adicionales, tanto de las actas mismas como de las visitas de campo: distancia entre la posición GPS transformada y la posición ALE destino en comparación con los valores grupales; comportamiento de la línea fronteriza en el esquema

Cuadro 2. Estado de los mojones principales e intermedios.

HITO	TIPO	DIST.	CRITERIO			CLASE	OBSERVACIONES
			LÍNEA	UBICACIÓN	ESTADO		
M01	A	ORIGEN	-----	-----	DESTRUIDO	P	DOS MOJONES PERDIDOS
M02	C+	8	MUY BUENA	MUY BUENA	AFECTADO	Ad	CÚSPIDE Y REPELLO
M03	C+	9	MUY BUENA	MUY BUENA	VOLCADO	Ar	1976
M04	C+	19	MUY BUENA	MUY BUENA	DEFECTUOSO	Ad	SÓLO MITAD INFERIOR
M05	C+	10	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M06'	C+	328	FUERA 150 m	DESPLAZADO	AFECTADO	X	(1)
M07	C+	70	ACEPTABLE	COMO TRAMO	DEFECTUOSO	Ad	CÚSPIDE
M08	C+	62	ACEPTABLE	COMO TRAMO	DEFECTUOSO	Ad	SÓLO MITAD INFERIOR
M09	C+	37	BUENA	BUENA	DEFECTUOSO	Ad	MENOS DE MITAD
M10	C+	63	BUENA	COMO TRAMO	DESTRUIDO	Ad	RESTOS BASE
M11	C+	93	FUERA 100 m	MEDIOCRE	DESTRUIDO	Ad	SÓLO BASE
M12	C+	24	MUY BUENA	MUY BUENA	DESTRUIDO	Ad	VOLCADO, BASE (2)
M12A	B	273	FUERA 130 m	MALA	PERFECTO	A	(3)
M13	C	---	-----	-----	PERDIDO	P	(4)
M13A	B	39	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M13B	C	7	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M14	B	6	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M14A	C	8	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M14B	C	---	-----	-----	BUENO	A	NO SE MIDió
M15	B	30	MUY BUENA	BUENA	BUENO	A	
M15A	C	94	FUERA	MALA	ARRANCADO	X	ANEXO 8, FIGS. 49 y 50
M16	B	107	BUENA	MALA	MALO	A	(5)
M16D	C	40	BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M17	B	37	BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M17A	C	39	BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	
M18	B	90	ACEPTABLE	BUENA	DEFECTUOSO	Ad	FALSEADO
M19	B	23	MUY BUENA	MUY BUENA	PERDIDO	X	(6)
M19A	C	153	MUY BUENA	MALA	DIFERENTE	X	(7)
M19B	B	33	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENO	A	(8)
M19D	C	13	MUY BUENA	ACEPTABLE	ARRANCADO	Ad	
M20	B	22	MUY BUENA	MUY BUENA	DEFECTUOSO	A	

gráfico detallado; ubicación relativa de los mojones adicionales de Alexander próximos a los principales; estado de conservación, tipo de construcción y vínculo con la cimentación; descripción y fotografías de los mojones visitados. Estos aspectos fueron analizados para todos los mojones principales y la mayoría de los auxiliares, ubicándolos en categorías, como puede verse en el cuadro 2.

- A:** Auténtico y en su ubicación original.  
**Ad:** Auténtico pero defectuoso en posición correcta, con necesidad de mantenimiento o reconstrucción.  
**Ar:** Reconstruido en la posición original.  
**P:** Perdido, fuera del cuadro se indicarán las posibilidades de replanteo de búsqueda.  
**X:** Dudoso a problemático, no se debe confiar en su posición.

(1) **Mojón VI:** Este mojón siempre ha tenido discrepancias con respecto a la posición Alexander y en la transformación global respecto a IGN las diferencias son de una decena de metros, pero por ejemplo el V discrepa aún más. En las actas este mojón y el siguiente son los dos únicos casos en los cuales se anota en el texto una ubicación diferente a la programada, por lo cual se le ha designado siempre como VI', pero el desplazamiento sólo es de unos 7 m. La ubicación fue controlada con la distancia a la estaca 270. El tipo de construcción, la ubicación en el terreno y otros detalles hacen pensar que el mojón es original. Sin embargo, no puede ser utilizado con coordenadas Alexander como parte de la frontera, las coordenadas deben ser GPS.

(2) **Mojón XII:** Los buenos resultados de identificación se deben a la corrección de los valores defectuosos que se encuentran en las tablas de las actas, como se describió antes. Hay cartografía de mediana escala donde la ubicación del vértice es incorrecta, como la de color naranja en el gráfico, con un quiebre en la ubicación del mojón anterior.

(3) **Mojón XIII:** El primer mojón intermedio o auxiliar de Alexander, que como todos ellos no figura en las tablas, sólo en uno de los croquis. No aparece en el mapa básico de Costa Rica, probablemente por la misma razón, aunque tampoco se le dieron coordenadas en las campañas de 1965. Sien-

do uno de los peores desde el punto de vista métrico, su ubicación sobre el río Frío y su estado de conservación, obligan a aceptarlo como auténtico.

(4) **Mojón XIII:** De todos los mojones de la frontera norte, es el más citado y rodeado de preguntas sin respuestas. Aparece en las tablas y en los croquis de las actas, y es citado en el texto como mojón principal colocado; extrañamente el tipo de mojón es el C, de 1,15 m de altura, mientras que el siguiente, que es un mojón auxiliar, es del tipo B, con sus 2,25 m de altura es todo un monumento. El mojón no aparece, debe considerarse como perdido, aunque tiene coordenadas IGN de 1965 que dan una distancia al XIII A de 318,52 m, muy próxima a los 320 m de las actas.

(5) **Mojón XVI:** Muy deteriorado, le falta la cúspide y no tiene revestimiento. El punto GPS se ubica prácticamente en la prolongación de la línea que viene del mojón XV, pero cruza al oeste del río Mena. El levantamiento de este río no tiene control en las actas y es posible que la diferencia de posición sea aparente, ya que GPS e IGN coinciden muy bien, al igual las dos posiciones ALE, por lo menos en lo que respecta a la dirección este-oeste. Por lo anterior, debe ser considerado auténtico.

(6) **Mojón XIX:** Aspectos métricos de posición muy buenos, pero fueron obtenidos por reconstrucción analítica a partir de cuatro marcas de referencia en las que se hicieron mediciones GPS. El mojón como tal está perdido, aparentemente en el fondo del río Sapoa.

(7) **Mojón XIXA:** Se realizaron mediciones sobre un mojón sobre la cerca limítrofe que podría haber sido la reconstrucción del XIXA. Los datos demuestran lo contrario.

(8) **Mojón XIXB:** Tiene esa inscripción del lado costarricense, y XIXC del lado nicaragüense, la correcta es la primera.

## LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO DE HITOS PERDIDOS

Las experiencias de diversos organismos que han estado técnicamente vinculados a la parte amojonada de la frontera norte, incluyendo ahora el

detallado estudio de los registros en las actas por parte del proyecto, indican que hay una gran cantidad de mojones identificados y ubicados que requieren de mantenimiento o reconstrucción, pero que los efectivamente perdidos son sólo tres: el mojón inicial I sobre la costa caribeña, el mojón XIII en una región pantanosa y el mojón XIX aparentemente caído al río Sapotá al haber sido socavados sus cimientos. Los tres casos tienen en común que si llegaran a encontrarse los mojones como tales, enteros, disgregados o sólo restos, esta localización seguramente no evitaría la necesidad de un replanteo. Por lo tanto, el proceso resumido sería: replanteo de la posición —búsqueda y reconstrucción—. Veamos cada caso por separado, ya que tienen características muy diferentes.

**MOJÓN I:** El caso del mojón I tiene la particularidad de enfrentarnos a una doble búsqueda, ya que mientras la Comisión Alexander todavía estaba trabajando, se perdió el majestuoso mojón I con un bloque de granito en su parte superior. La misma comisión descartó la posibilidad de recuperarlo y realizó una segunda medición, registrada en las actas como triangulación de reposición.

La figura 9 integra en forma reducida la triangulación inicial con orientación astronómica, y la de vínculo o reposición, que es la que está en el recuadro de la derecha de la imagen. En el marco del proyecto se obtuvieron, procesaron y transformaron las coordenadas de todos los puntos involucrados. Es evidente que para poder efectuar un proceso de búsqueda de los dos mojones I, se requiere de puntos materializados en el terreno, para lo cual existen buenas posibilidades de éxito. De esta situación generada por el proyecto, se podría derivar una interesante actividad de investigación en el marco de una especialidad profesional

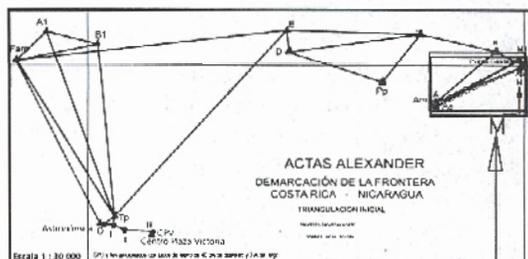


Figura 9. Triangulaciones iniciales.

que internamente hemos llamado “Arqueología Geodésica”, término no ortodoxo que podría aplicarse también a toda la investigación.

**MOJÓN XIII:** Desde el punto de vista técnico, la búsqueda del sitio en que se encontraba o encuentra sepultado el mojón XIII es de carácter más convencional.

El montaje de la figura 10 muestra una buena concordancia de la poligonal con el río Zapote, pero indudablemente es imposible encontrar las estacas que sirvieron hace más de cien años para medirla y ubicar los mojones XIII y XIII. Sin embargo, como se tienen todos los datos numéricos y las coordenadas GPS del mojón XIII, se puede establecer una base GPS de orientación acimutal y ubicar el sitio correspondiente al mojón XIII mediante una intersección con estación total. El mojón es de los pequeños, hecho tal vez ignorado por la mayoría, y puede haberse volcado y hundido en el fango.

**MOJÓN XIX:** La figura 11 muestra nuevamente una buena concordancia, pero lo fundamental es que, como se indica en el análisis de identificación, la posición del mojón fue determinada analíticamente por intersección de dos líneas. Esta podría ser la base de la ubicación precisa del sitio correspondiente al mojón para su eventual reconstrucción.

Talvez lo más importante de este sector fronterizo, es que marca un cambio de dirección y

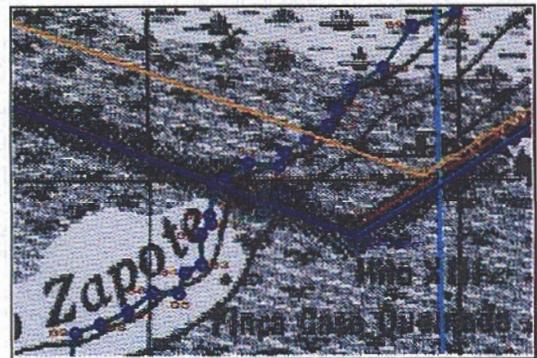


Figura 10. Detalle del montaje para el análisis del mojón XIII.



Figura 11. Detalle del montaje para el análisis del mojón XIX.

en parte de metodología en los trabajos de la Comisión Alexander.

Una actividad de ubicación del mojón principal podría estar acompañada de la determinación inequívoca de tres puntos más, los mojones auxiliares XVIII, XIX, y la estación astronómica, de la cual sólo se tienen coordenadas "pixeladas" y transformadas.

## LA DENSIFICACIÓN DE LA DEMARCACIÓN

Si bien existen algunos tramos fronterizos que en los últimos diez años han sido densificados intercalando mojones nuevos entre los existentes, persisten dudas respecto a la identificación de algunos mojones y también acerca de la metodología empleada. Nos referiremos a dos aspectos muy diferentes pero vinculados a la densificación y también entre sí, uno está relacionado con la frontera misma, y otro es de repercusión nacional:

El tratado Matus-Pacheco, ratificado por ambas partes, termina diciendo:

*"...Será..., el título de demarcación definitivo de sus límites".*

En las "Actas Alexander" la línea fronteriza se describe en el texto fundamentalmente mediante direcciones acimutales y distancias entre mojones principales, los numerados sin tener una letra adicional, y en las tablas o cuadros, los mojones

auxiliares no son contemplados, no reciben coordenadas. Estos mojones figuran en los croquis con información que permite darles coordenadas en forma más o menos directa solamente en algunos casos. Por otro lado, se citan como construidos en el texto, y en algunos casos con datos métricos, por lo menos aproximados.

Estos antecedentes se citan porque pueden darse dos interpretaciones a la demarcación, la estricta sería considerando únicamente los mojones principales, y la otra, de mayor amplitud, agregando los auxiliares. La diferencia entre ambos posibles criterios radica en sus consecuencias, al no ser los mojones auxiliares colineales con los principales correspondientes. Así, en la forma estricta algunos mojones auxiliares quedarían en el territorio costarricense, y otros en el nicaraguense. Además, y en vinculación estrecha con el título de este tema, los mojones auxiliares no deberían utilizarse en la densificación. Si por el contrario los auxiliares forman parte de la frontera, ésta tendría muchos más vértices y quiebres que los asumidos normalmente. La solución salomónica sería considerarlos como parte de la frontera si son del tipo B, como por ejemplo el solitario XIIA y los intermedios centrales de la extensa "recta astronómica".

El aspecto de repercusión nacional que deseamos citar aquí está relacionado con el llamado corredor fronterizo o Refugio de Vida Silvestre Corredor Fronterizo, zona de 2 km de ancho respecto a la cual en el Dictamen del Procurador Agrario N° 066 del 13/04/1998 en su primer punto dice:

*"Las zonas fronterizas en nuestro país gozan desde el siglo anterior de protección jurídica diferenciada, especialmente para impedir que los particulares puedan apropiarse de ellas. Hoy día están protegidas bajo el régimen de dominio público, con un ancho de dos kilómetros y la zona limítrofe con Nicaragua, sin perder su carácter de dominio público, constituye además Refugio Nacional de Vida Silvestre".*

La influencia de la línea limítrofe se extiende, por lo tanto, desde el punto de vista jurídico hasta 2 km dentro del territorio nacional. Ya se han

dado problemas en la frontera misma, pero en el interior del país se agrega el problema de demarcar la "otra frontera", 2 km Costa Rica adentro. Esto es técnicamente posible, pero no hay indicios de que se haya hecho. No entraremos a detallar en estas conclusiones las repercusiones jurídicas, catastrales y sociales de esa frontera sin demarcar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, E. P. 1900. *Actas Alexander*, sin publicar, tres originales en EE. UU. de América, Nicaragua y Costa Rica.
- Dörries, E. y J. Roldán. 1999. *Estudio comparativo del datum geodésico de Ocoatepeque y el datum satelitario del sistema WGS84*. Informe final de proyecto de investigación. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Núñez-García, A., J. L. Valbuena y J. Velasco. 1992. *GPS: La nueva era de la topografía*. Ediciones de las Ciencias Sociales. Madrid, España. 236 p.
- Seeber, G. 1993. *Satellitengeodäsie*. Walter de Gruyter. Berlín, Alemania. 531 p.

## TRATADOS DE REFERENCIA

LUGAR	FECHA	DOCUMENTO	SITUACIÓN
Managua	06/07/1857	Tratado Cañas-Juárez	No ratificado
Rivas	08/12/1857	Tratado Cañas-Martínez	No ratificado
San José	15/04/1858	Tratado Cañas-Jerez	Ratificado
Granada	05/02/1883	Tratado Álvarez-Zambrana	No ratificado por CR
San José	19/01/1884	Tratado Navas-Castro	No ratificado por CR
Guatemala	24/12/1886	Convención Arbitral Román-Esquivel	Ratificada
Washington	22/03/1888	Laudos Cleveland	Tratado
Managua	23/12/1890	Tratado Guerra-Castro	No ratificado por CR
San Salvador	27/03/1896	Convención Matus-Pacheco	Ratificada
San Juan del Norte	30/09/1897	Laudos Alexander Nº 1	En Libro de Actas
San Juan del Norte	20/12/1897	Laudos Alexander Nº 2	En Libro de Actas
San Juan del Norte	22/03/1898	Laudos Alexander Nº 3	En Libro de Actas
San Juan del Norte	26/07/1899	Laudos Alexander Nº 4	En Libro de Actas
San Juan del Norte	26/07/1899	Award #4 (Laudos Alexander)	Publicado en inglés
Nueva York	10/03/1900	Laudos Alexander Nº 5	En Libro de Actas