

SOLUCIÓN ALTERNATIVA PARA LA TRANSFORMACIÓN DIRECTA DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: EL CASO DE COSTA RICA ANTE EL CAMBIO DEL SISTEMA OFICIAL DE COORDENADAS (LAMBERT A CRTM05)

ALTERNATIVE SOLUTION FOR DIRECT TRANSFORMATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION: THE CASE OF COSTA RICA CHANGING THE OFFICIAL SYSTEM OF COORDINATES (LAMBERT TO CRTM05)

Manuel Ramírez Núñez¹

José Francisco Valverde Calderón²

Universidad Nacional, Costa Rica

RESUMEN

En Costa Rica se utilizó durante muchos años oficialmente una cartografía basada en el sistema de proyección Lambert, datum Ocotepeque. En el año 2007 se establece el sistema CR05 como sistema de referencia oficial, lo cual obliga a las instituciones públicas a transformar toda su cartografía a este nuevo sistema. Este cambio repercute en la manera de generar nueva información espacial

-
- 1 Máster Manuel Ramírez Núñez pertenece a la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: manuel.ramirez.nunez@una.cr
 - 2 Ingeniero José Francisco Valverde Calderón pertenece a la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jose.valverde.calderon@una.cr

Fecha de recepción: 26 de enero del 2014

Fecha de aceptación: 11 de junio del 2014

y además, conlleva la transformación de la anterior cartografía al nuevo sistema oficial del país. Surge entonces, para estas instituciones, la necesidad de establecer una metodología de transformación adecuada a la escala y exactitud de sus productos cartográficos. En este artículo se propone una metodología que permite la transformación directa al sistema oficial de referencia CR05 de los datos espaciales basados en el antiguo sistema. Los resultados de esta investigación proveen a las instituciones públicas y privadas en Costa Rica de una forma simple y eficiente de transformar sus mapas digitales mediante la configuración de sus plataformas de sistemas de información geográfica, reduciendo así costos económicos y el tiempo de conversión de sus datos.

Palabras clave: Datum, Transformación, Proyección, Lambert, CRTM05

ABSTRACT

For many years, Costa Rica officially used cartography based on the Lambert projection system, datum Ocotepaque. In 2007 the official reference system was changed to CR05, forcing public institutions to transform all their cartography to this new system. This change affects the way new spatial information is generated and also involves the transformation of all the previous cartography to the country's new official system.

Therefore, it's necessary for these institutions to establish an appropriate methodology for the conversion, considering the scale and accuracy of their cartographic products. This paper proposes a methodology that allows for direct transformation of the spatial data contained in the former system to the official reference system CR05. The results of this research provide public and private institutions alike in Costa Rica a simple and efficient method to transform their digital maps by setting up Geographic Information System platforms, thus reducing the costs and time in converting their data.

Keyword: Datum, Transformation, Projection, Lambert, CRTM05

Introducción

En la década de los 50's del siglo pasado se estableció en Costa Rica como sistema oficial de coordenadas el sistema Lambert, cuyo datum es Ocotepaque. En el año 2007 mediante el decreto ejecutivo 33797-MJ-MOPT (Costa Rica, 2007a) se establece como nuevo sistema de referencia el CR05 y la proyección cartográfica CRTM05, y se ordena a las instituciones públicas adoptarlo en un periodo de máximo 9 años, una vez que el decreto entró en vigencia (lo cual ocurrió el 30 de marzo de 2007).

El cambio en el sistema de coordenadas oficial del país tiene implicaciones técnicas y prácticas, ya que se deberá establecer un mecanismo estandarizado, sencillo y que tome en cuenta las escalas y exactitudes requeridas para mantener la calidad de los datos transformados, considerando que un gran porcentaje de los datos geográficos a transformar son capas de información que alimentan sistemas SIG. Debe destacarse que el cambio de sistema de referencia tiene también implicaciones legales y por lo tanto es mandatorio permitir el contraste de información en ambos sistemas.

En el marco de ejecución del Programa de Regularización del Catastro y Registro de Costa Rica, se estableció un nuevo sistema de referencia geodésico oficial que cumple con los criterios de exactitud, densidad y que es accesible para todo tipo de usuarios, dándose el marco de referencia para la generación de nueva cartografía. Por lo tanto, es necesario efectuar toda una serie de cambios en la forma de tratar la información espacial y elaborar productos para que los usuarios y generadores de información no tengan dificultades para trasladar sus datos cartográficos al nuevo sistema de referencia.

Características de los sistemas cartográficos anteriormente usados en Costa Rica

Se describe en los siguientes párrafos las características principales de los sistemas cartográficos usados en Costa Rica antes del CRTM05.

Proyección Lambert

La proyección Lambert utilizada de forma oficial en Costa Rica desde los años 50's tiene como datum Ocatepeque, su elipsoide asociado es Clark 1866 y la proyección es cónica conforme secante con dos paralelos de contacto (IAGS, 1950). Se establecieron dos proyecciones para Costa Rica (Lambert Costa Rica Norte y Lambert Costa Rica Sur). Los parámetros de las proyecciones se pueden encontrar en Costa Rica, (2007a).

Proyección CRTM90 y CRTM98

En la década de los 90's el Catastro Nacional de Costa Rica realizó esfuerzos por definir un sistema de referencia que facilitara los levantamientos catastrales mediante tecnologías de medición por satélite y que además cubriera el país de forma continua en contraste a la versión oficial de esa época que utilizaba dos proyecciones, la Lambert Norte y la Lambert Sur. Es entonces que el Catastro Nacional define primeramente la proyección CRTM90 y posteriormente una segunda propuesta denominada CRTM98. Lamentablemente ninguna de las dos propuestas fue oficializada por el Instituto Geográfico Nacional.

Estas proyecciones surgen como una modificación a la proyección UTM. Si en Costa Rica se usará la proyección UTM, el país quedaría dividido por dos fajas: la faja 16 y la faja 17, las cuales tienen como límite común el meridiano 84° W. Por tanto, con el fin de evitar la dualidad

de sistemas, se mantuvo la definición de la proyección, pero se definió como meridiano central el meridiano 84° W. Esto da como resultado que el país quede cubierto por una sola faja. Los parámetros de las proyecciones CRTM90 y CRTM98 se dan en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la proyección CRTM90 y CRTM98

Parámetro	Valor
Elipsoide	WGS-84
Paralelo origen	0°
Meridiano de referencia	84° W
Factor de escala en el meridiano central	0,9996
Falso este del meridiano central	500 000,000 m

Fuente: Costa Rica, 2007a

Características del nuevo sistema de coordenadas

El nuevo sistema de referencia denominado CR05, es oficial a partir de la publicación del decreto 33797-MJ-MOPT (Costa Rica, 2007b), publicado el 30 de marzo de 2007. Las características del sistema CR05 tienen como marco de referencia el ITRF2000, y época de referencia de las coordenadas la 2005.83. Los parámetros de la proyección CRTM05 se dan en la tabla 2:

Tabla 2: Parámetros de la proyección CRTM05

Parámetro	Valor
Elipsoide asociado	WGS-84
Paralelo origen	0°
Meridiano de referencia	84° W
Factor de escala en el meridiano central	0,9999
Falso este del meridiano central	500 000,000 m

Fuente: Costa Rica, 2007a

Estrategias de transformación de datum

Con el advenimiento de los modernos sistemas satelitales, la tendencia actual es adoptar sistemas coordenados de referencia referidos a datum geodésicos globales. La problemática de la transformación de datum ha ganado importancia debido al auge de los Sistemas de Navegación Global

por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés), donde destaca el GPS, según Grafarend (2010).

Un datum geodésico es un conjunto de parámetros y constantes que definen un sistema coordenado, incluyendo su origen, su orientación y su escala, de tal manera de hacerlo accesible para aplicaciones geodésicas (Jekeli, 2002). Un sistema de referencia consiste en una serie de prescripciones y convenciones junto con un modelo requerido para definir en cualquier momento un sistema de ejes coordenados.

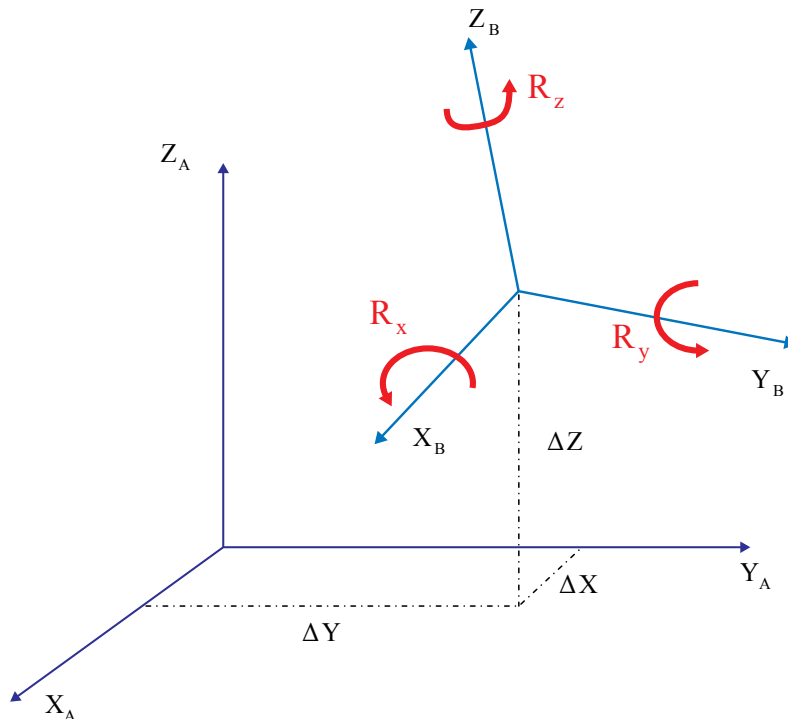
Las tecnologías modernas satelitales (e.g. GPS) proporcionan coordenadas referidas a un sistema global (e.g. WGS84). En general, y tradicionalmente, cada país ha definido su propio datum de referencia local. Con el fin de referenciar las mediciones realizadas por medio de técnicas satelitales, es necesario transformar las mediciones para representarlas en el sistema coordenado y datum local.

Varios modelos de transformación han sido desarrollados para resolver el problema descrito, aplicables tanto en el área de la geodesia como en los sistemas de información geográfica. A continuación se describen y analizan algunos modelos matemáticos para realizar una transformación de datum. Se detallan el fundamento matemático, así como las ventajas y desventajas de cada método.

Transformación de Bursa-Wolf

Este método de transformación de datum presentado por Bursa (1965) y Wolf (1936), utiliza un modelo matemático de transformación de siete parámetros para hacer el paso de un datum a otro. Es usado para transformar las coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) de un datum "A" a las coordenadas geocéntricas de un datum "B". Se asume que la geometría interna (distribución) de los puntos idénticos en ambos datum es consistente, es decir, que entre los puntos idénticos sólo se consideran traslaciones, giros y un posible factor de escala, como se muestra en la figura 1.

Figura 1: Transformación de siete parámetros entre dos sistemas



Fuente: Elaboración propia, 2014

La forma de transformar las coordenadas cartesianas de un sistema triaxial a otro, consiste en utilizar una transformación de siete parámetros, los cuales son: tres traslaciones (ΔX , ΔY , ΔZ), tres rotaciones (R_x , R_y , R_z) y un cambio de escala (s).

La relación entre los dos sistemas geodésicos de coordenadas está dada por el siguiente modelo (Hoffmann-Wellenhop *et al.* 1992, p.239):

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}^B = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+s & R_z & -R_y \\ -R_z & 1+s & R_x \\ R_y & -R_x & 1+s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}^A \quad (1)$$

En el modelo anterior se asume que los ángulos de rotación son muy pequeños, generalmente alrededor de 5 segundos de arco en redes geodésicas.

Los parámetros de transformación son determinados aplicando un ajuste por mínimos cuadrados basándose en al menos tres puntos idénticos (puntos en común entre ambos sistemas de coordenadas), aunque entre más puntos idénticos sean utilizados más confiables serán la determinación de los parámetros. Las ecuaciones de observación expresadas en forma matricial, basadas en los puntos idénticos se encuentran a continuación:

$$\begin{array}{c}
 \begin{bmatrix} X_1^B - X_1^A \\ Y_1^B - Y_1^A \\ Z_1^B - Z_1^A \\ X_2^B - X_2^A \\ Y_2^B - Y_2^A \\ Z_2^B - Z_2^A \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_1^A & Y_1^A & X_1^A \\ 0 & 1 & 0 & Z_1^A & 0 & -X_1^A & Y_1^A \\ 0 & 0 & 1 & -Y_1^A & X_1^A & 0 & Z_1^A \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_2^A & Y_2^A & X_2^A \\ 0 & 1 & 0 & Z_2^A & 0 & -X_2^A & Y_2^A \\ 0 & 0 & 1 & -Y_2^A & X_2^A & 0 & Z_2^A \\ \vdots & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \\ s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2) \\
 \mathbf{y}_{n \times 1} = \mathbf{A}_{n \times 7} \boldsymbol{\xi}_{7 \times 1} + \mathbf{e}_{n \times 1}
 \end{array}$$

Con el vector de observación $\mathbf{y} \sim (\mathbf{A}\boldsymbol{\xi}, \sigma^2 \mathbf{I})$ y rango $(\mathbf{A}) = u=7$, y n el número de observaciones.

La estimación del vector de las incógnitas $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ y su respectiva matriz de dispersión $\hat{D}\left\{\hat{\boldsymbol{\xi}}\right\}$ está dada por las siguientes relaciones:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

$$\hat{D}\left\{\hat{\boldsymbol{\xi}}\right\} = \hat{\sigma}_o^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{\mathbf{e}}^T \hat{\mathbf{e}}}{n-u} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{y} - \mathbf{A} \hat{\boldsymbol{\xi}} \quad (6)$$

Si los dos sistemas no son homogéneos, la solución no es confiable sin importar la cantidad de puntos idénticos usados. Aunque la exactitud de este método está limitada por los datos usados, en la práctica se ha visto que en general la exactitud está en el rango de 1 a 2 metros (DMA, 1991).

Un problema asociado a este modelo de transformación es que si la red de puntos usada para determinar los parámetros cubre áreas pequeñas de la superficie terrestre, existirá entonces una alta correlación entre los giros y las traslaciones.

Modelo Molodensky-Badekas

Este modelo presentado por Badekas (1969) es similar al de transformación de siete parámetros, pero elimina la alta correlación que existe entre los parámetros mediante la reducción de los puntos idénticos a su centro de gravedad. Conceptualmente, la única diferencia entre los modelos Molodensky-Badekas y Bursa-Wolf es el punto alrededor del cual las rotaciones y las traslaciones son aplicadas. La ecuación de transformación está dada por:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}^B = \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix}^A + \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+s & -R_z & R_y \\ R_z & 1+s & -R_x \\ -R_y & R_x & 1+s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - \bar{X} \\ Y_i - \bar{Y} \\ Z_i - \bar{Z} \end{bmatrix}^A \quad (7)$$

Donde:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_i X_i^A, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_i Y_i^A, \bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_i Z_i^A = \text{Coordenadas del Baricentro}$$

$\Delta X', \Delta Y', \Delta Z'$ = traslaciones en el modelo Molodensky-Badekas.

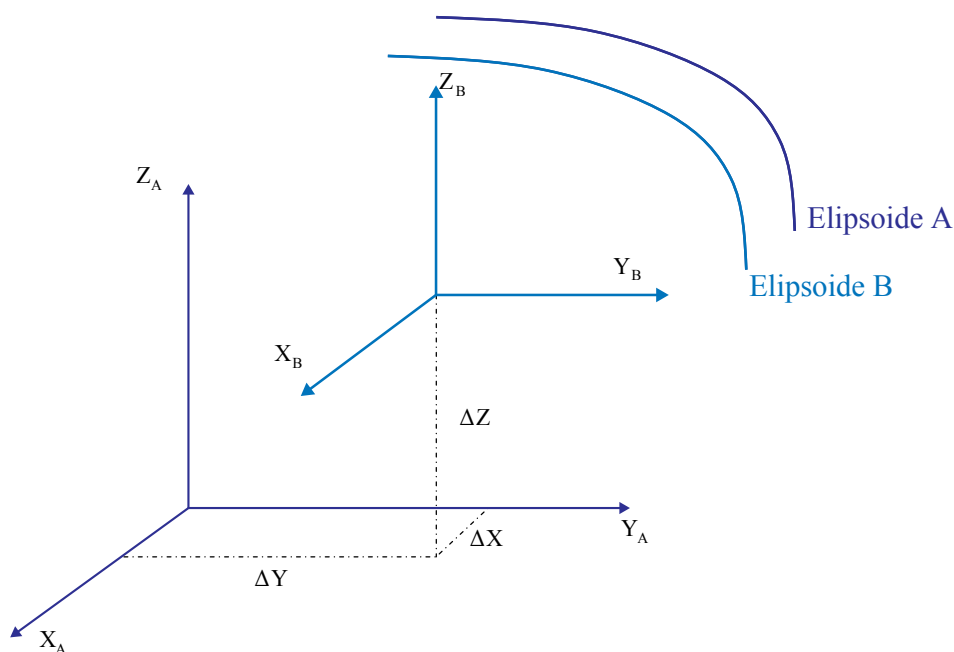
R_x, R_y, R_z, s = rotaciones alrededor de los ejes X, Y, Z, respectivamente, y s el factor de escala.

El factor de escala y las rotaciones determinados con este modelo son los mismos que los determinados mediante el modelo de siete parámetros (utilizando mínimos cuadrados), pero las traslaciones son diferentes, ya que están referidas al Baricentro, además sus precisiones son por lo general un orden de magnitud más pequeños.

Transformación de Molodensky

La transformación o fórmulas de Molodensky permite transformar la latitud (φ), longitud (λ) y la altura elipsoídica (h) de un sistema a otro sin tener que pasar por las coordenadas rectangulares (X, Y, Z). Este método es ideal cuando el elipsoide de referencia local es paralelo al elipsoide global, es decir, cuando los sistemas de referencia son paralelos. Los parámetros que intervienen en este método son tres traslaciones ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), la diferencia de achatamientos (Δf) y la diferencia de los semiejes mayores de los elipsoides de referencia (Δa), como se muestra en la figura 2.

Figura 2: Transformación de Molodensky



Fuente: Elaboración propia, 2014

Las traslaciones ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) pueden ser determinadas calculando el promedio de las diferencias entre los puntos idénticos. Las diferencias de achatamientos (Δf) y la diferencia de los semiejes mayores (Δa), son calculadas simplemente por sustraer los parámetros de ambos elipsoides de referencia. En la práctica la exactitud de este método está alrededor de 5 metros.

El modelo de transformación es el siguiente (Raap, 1985, p.70):

$$\varphi_B = \varphi_A + \Delta\varphi \quad (8)$$

$$\lambda_B = \lambda_A + \Delta\lambda \quad (9)$$

$$h_b = h_A + \Delta h \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = \frac{1}{(M+h)} * & \left(-\Delta X \sin \varphi_A \cos \lambda_A - \Delta Y \sin \varphi_A \sin \lambda_A + \right. \\ & + \Delta Z \cos \varphi_A + \frac{\Delta a}{a} (N e^2 \sin \varphi_A \cos \varphi_A) + \\ & \left. + \Delta f \left(M \frac{a}{a} - N \frac{b}{a} \right) \sin \varphi_A \cos \varphi_A \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta\lambda = \frac{(-\Delta X \sin \lambda_A + \Delta Y \cos \lambda_A)}{(N+h) \cos \varphi_A} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta h = \Delta X \cos \varphi_A \cos \lambda_A + \Delta Y \cos \varphi_A \sin \lambda_A + \\ + \Delta Z \sin \varphi_A - \Delta a \frac{a}{N} + \Delta f \frac{b}{a} N \sin^2 \varphi_A \end{aligned} \quad (13)$$

Siendo:

φ_A, λ_A = latitud y longitud geodésica del punto a ser transformado.

$N = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_A)}} =$ radio de curvatura en el primer vertical.

$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} =$ radio de curvatura meridional.

$\Delta a = a_B - a_A =$ diferencia de semiejes mayores

$\Delta f = f_B - f_A =$ diferencia de achatamientos.

Método de regresión múltiple o interpolación bilinear

El método de regresión múltiple consiste en el ajuste de un polinomio en dos variables (U, V), las cuales son a su vez una función de las

coordenadas φ y λ . El polinomio representa una superficie de mejor ajuste entre los dos sistemas de coordenadas, por lo tanto, a diferencia de los métodos anteriormente mencionados, este no depende de que los sistemas de coordenadas sean homogéneos, mejorando en forma notable la exactitud.

Los coeficientes del polinomio de transformación se encuentran aplicando un ajuste por mínimos cuadrados, basándose en los puntos idénticos. Este método puede ser utilizado cuando se cuenta con muchos puntos idénticos. La exactitud va a depender del conjunto de puntos idénticos que se utilice, pero en general se puede hablar que el método permite alrededor de 0.2 metros de exactitud. En general la forma del polinomio de transformación es la siguiente (NIMA, 1997):

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & A_{00} + A_{10} U + A_{01} V + A_{20} U^2 + A_{11} UV + \\ & + A_{02} V^2 + A_{30} U^3 + A_{03} V^3 + A_{21} U^2 V + (14) \\ & + A_{12} UV^2 + \dots + A_{99} U^9 V^9 \end{aligned}$$

Donde:

A_{00} = constante

A_{ij} = coeficientes o parámetros de transformación de terminados en el ajuste.

$U = k(\varphi_A - \varphi_m)$ = latitud geodésica normalizada del punto a ser transformado.

$V = k(\lambda_A - \lambda_m)$ = longitud geodésica normalizada del punto a ser transformado.

k = factor de escala, y conversión de grados a radianes.

φ_A, λ_A = latitud y longitud geodésica local del punto a ser transformado.

φ_m, λ_m = latitud y longitud media del área del datum local.

Ecuaciones similares son obtenidas para $\Delta\lambda$ y Δh , reemplazando $\Delta\varphi$ por $\Delta\lambda$ y Δh respectivamente en la ecuación 14. Las fórmulas de transformación son las siguientes:

$$\varphi_B = \varphi_A + \Delta\varphi \quad (15)$$

$$\lambda_B = \lambda_A + \Delta\lambda \quad (16)$$

$$h_B = h_A + \Delta h \quad (17)$$

Transformación de coordenadas planas

Esta estrategia se basa en transformar las coordenadas de cuadrícula, es decir, las coordenadas planas de la proyección cartográfica que se aplicó al datum "A", hacia las coordenadas de cuadrícula de la proyección cartográfica que se aplicó al datum "B". Para realizar la transformación se pueden usar los métodos de Helmert (en dos dimensiones) o interpolación bilinear.

Las ecuaciones de transformación utilizando el método de Helmert, toman en cuenta dos traslaciones (Δx , $\alpha \Delta y$), una rotación (α) y un factor de escala (m). La relación entre los dos sistemas de coordenadas queda expresada por la siguiente ecuación (Keller, 2001):

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}^B = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m \cos \alpha & m \sin \alpha \\ -m \sin \alpha & m \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}^A \quad (18)$$

Tomando $a = m \cos \alpha$ y $o = -m \sin \alpha$, entonces, la ecuación 18 puede ser rescrita de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}^B = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a & -o \\ o & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}^A \quad (19)$$

Una vez resueltos los parámetros a y o , podemos encontrar el ángulo de rotación y el factor de escala entre los dos sistemas como:

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{o}{a}\right) \text{ y } m = \sqrt{o^2 + a^2} \quad (20)$$

Para encontrar los parámetros de transformación se necesita un mínimo de dos puntos idénticos. La solución general en donde se pueden considerar más de dos puntos idénticos se puede ver en (Keller, 2001).

Contrario a lo que sucede con el modelo de transformación de Helmert en tres dimensiones, en este caso no se le impone ninguna restricción a los ángulos de rotación. También es posible utilizar el método de interpolación bilinear tomando U y V en función de las coordenadas planas.

Se debe recordar que cuando se aplica una proyección cartográfica se van a tener distorsiones, lo que implica una degradación en la exactitud de este método. Para más información sobre este tipo de transformación el lector es referido a Hofmann-Wellenhof *et al*, 1992, p.242.

Análisis del problema de la transformación en Costa Rica

El problema que surge a raíz del cambio del sistema de referencia, se puede analizar principalmente desde dos perspectivas, a) la generación de nuevos productos cartográficos y b) la transformación de los productos anteriores al nuevo sistema.

La colaboración entre instituciones públicas debe ser tomada en cuenta en la solución planteada. El intercambio de los productos cartográficos entre las instituciones debe estar bajo un marco de referencia estandarizado, es decir, que no se deban realizar ajustes o corrección a los datos recibidos de otras fuentes.

El proceso de la creación de nuevos productos cartográficos y la transformación de productos anteriores debe ser sencillo de aplicar por parte de las instituciones, de manera tal, que su complejidad no sea un obstáculo para su aplicación. Los costos económicos para las instituciones deben ser razonables, de lo contrario, esto se constituirá en una barrera para lograr la puesta en marcha del nuevo sistema de referencia para el país. Por lo tanto, el proceso de adecuación de las plataformas informáticas para la creación de nuevos datos debe ser sencillo y automatizable.

La comparación entre productos cartográficos basados en ambos sistemas (antiguo y nuevo), deberá ser posible. Este tópico tiene implicaciones legales, por ejemplo, a nivel del Registro Inmobiliario siempre deberá ser posible la comparación entre planos antiguos y planos nuevos referidos al nuevo sistema para fines jurídicos.

Las instituciones públicas deberán trabajar todas ellas basadas en el mismo conjunto de parámetros de transformación, de forma tal que independientemente de cuál institución realice el proceso de transformación los resultados sean siempre los mismos en cuanto a calidad posicional y escala de los elementos cartográficos en el mapa. Entonces la solución a este problema debe cumplir las siguientes características: a) simple, b) permitir la estandarización del cálculo y c) debe ser susceptible de automatizar.

Se debe destacar que el problema de transformación de datos desde el sistema Lambert al nuevo sistema oficial CRTM05, no es trivial, ya que no existen suficientes puntos idénticos entre los sistemas que permita la transformación directa desde un sistema al otro. Esto obliga realizar un procedimiento de tres etapas, transformar desde el sistema Lambert al sistema CRTM90; luego del CRTM90 al CRTM98 y finalmente del CRTM98 al CRTM05, lo cual dificulta, ralentiza y encarece la transformación de los mapas.

La generación de nuevos productos cartográficos

Los nuevos productos cartográficos generados por las diversas instituciones del país deberán apearse al nuevo sistema de referencia, esto se logra mediante la adecuada configuración de las plataformas informáticas de producción cartográfica. Se debe prestar especial atención a los siguientes requerimientos técnicos de la plataforma:

- El sistema debe permitir la utilización de la proyección UTM (o permitir variaciones en los parámetros, manteniendo la definición de la proyección) como base para la generación de información espacial.
- Debe permitir exportar los datos creados a formatos abiertos, sin alterar el sistema de coordenadas.
- Debe ser capaz de incorporar datos referidos al antiguo sistema de coordenadas y transformarlos al nuevo sistema oficial.

La transformación de los productos cartográficos anteriores

La transformación de productos cartográficos anteriores al nuevo sistema de referencia es el aspecto más delicado y complejo ya que cualquier cambio de forma escala ubicación u orientación en los objetos cartográficos tendrá serias implicaciones legales. Por ejemplo el cambio de ubicación de un predio debido a una transformación de las coordenadas de sus vértices, podría llevar a conflictos de traslape con otros predios colindantes al mismo, si los parámetros envueltos en el cálculo no son confiables o presentan variaciones importantes respecto a la zona donde se realice la transformación. Por lo tanto el proceso de transformación debe asegurar la menor distorsión posible en las coordenadas de los vértices de los objetos a transformar.

Metodología propuesta

Los mapas son una herramienta fundamental en el desarrollo de las sociedades, los requerimientos de cartografía de una región o país son cada vez mayores, debido a su uso e integración en diversas aplicaciones, como la navegación utilizando sistemas de posicionamiento global; además, una cartografía actual resulta fundamental para conocer el territorio y poder desarrollar políticas de desarrollo sostenible y la planificación en general.

La base cartográfica usada en Costa Rica por muchos años data de la década de los 50's, tiempo en que se estableció también el sistema geodésico de referencia que dio sustento a esta cartografía. Al ser ésta la cartografía oficial, dio origen a que cartografía derivada de esta también este referida al sistema Lambert e inclusive mucha información espacial se generó tomando como sistema de referencia el citado anteriormente.

En la década de los 90's, se hicieron dos intentos por reemplazar el sistema Lambert por uno más actual. Producto de estos intentos, se desarrollaron los sistemas cartográficos CRTM90 y CRTM98 por parte del Catastro Nacional, sin embargo, no se consolidó el hecho de sustituir al sistema Lambert o generar nueva cartografía oficial para todo el país.

La consecuencia de tener varios sistemas de referencia en uso, aunque únicamente uno fuera oficial, fue que para los usuarios no especializados en el tema, se convirtiera muchas veces en una dificultad trabajar con un sistema o con otro y/o tener que transformar su información entre sistemas. El objetivo de reemplazar el sistema se logró finalmente en el 2007, en el marco de ejecución del Programa de Regularización del Catastro y Registro, mediante el decreto ejecutivo 33797-MJ-MOPT, que oficializó el sistema de referencia CR05 y la proyección asociada CRTM05 como oficiales.

Una necesidad que surgió tras establecer el sistema coordinado CRTM05 fue la de trasladar toda la información disponible y que está referida a la proyección Lambert Norte o Lambert Sur al CRTM05. Esto obliga a que tanto las entidades públicas como empresas privadas deban buscar o desarrollar metodologías para trasladar su información. Dada esta circunstancia y debido a que el mayor porcentaje de usuarios y generadores de información espacial tiene su información en alguna plataforma SIG, se les debe de proveer de las herramientas para que haciendo uso de estas plataformas, trasformen su información.

En términos de información oficial, el documento citado en (Costa Rica, 2007a) recomienda para los usuarios SIG el uso de la transformación de Molodensky de cinco parámetros, para que efectúen sus transformaciones, ya que si bien es cierto se conocen los parámetros para efectuar una transformación de Helmert de siete parámetros, estos se basan en la aplicación del modelo de Molodensky-Badekas, el cual es un modelo baricéntrico y muchas plataformas SIG no son capaces de trabajar con este modelo. Además, los parámetros para realizar la transformación de Molodensky de cinco parámetros se basa en una simplificación del modelo de Molodensky-Badekas, asumiendo que los elipsoides Clark 1866 y WGS-84 son paralelos y tienen la misma escala, situación que no es correcta.

Después de analizar todos los aspectos citados anteriormente, los autores establecieron la hipótesis de que matemáticamente puede ser posible generar una estrategia de transformación de coordenadas entre el sistema Lambert y el sistema CRTM05, que sea fácilmente aplicable, que se pueda programar en la mayoría de plataformas SIG disponibles en la actualidad, que no consuma mucho tiempo en su aplicación y que garantice un nivel de exactitud al menos semejante a la alcanzada si se usan los parámetros oficiales. Por tanto y para corroborar la hipótesis planteada, se ha desarrollado una metodología para la determinación de los parámetros de transformación al nuevo sistema de coordenadas de Costa Rica, la cual se detalla a continuación.

El hecho de que no existe una cantidad óptima de puntos idénticos entre el antiguo y nuevo sistema de referencia hace que la utilización de los métodos de transformación citados en las secciones anteriores no sean aptos (aunque posibles) para el caso de Costa Rica, ya que producirán parámetros de transformación de baja exactitud. Aunado a este faltante de puntos idénticos está el hecho de que los pocos puntos que existen no tienen una distribución espacial óptima sobre el territorio costarricense, lo que implica variaciones en los resultados de la transformación de acuerdo a la zona del país. Por lo tanto la determinación de los parámetros de transformación debe ser realizada tomando en cuenta estas limitantes.

Si se utilizarán los métodos de transformación tradicionales y con base en los parámetros conocidos, habría que pasar del sistema Lambert al sistema CRTM90; luego del CRTM90 al CRTM98 y finalmente del CRTM98 al CRTM05. Esta estrategia de cálculo es compleja y tediosa si se quiere

aplicar de forma manual, pero además la mayoría de los sistemas de GIS o CAD están diseñados para realizar solo un tipo de transformación a la vez y no una secuencia de ellas, lo que complica aún más la transformación.

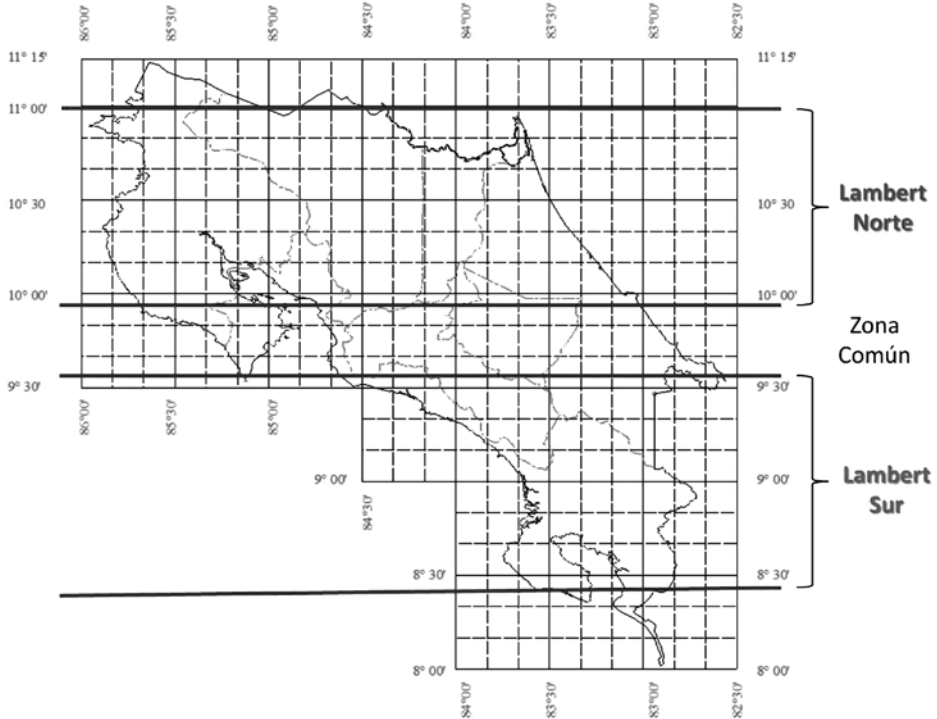
Ante esta situación, se procedió a calcular un conjunto de parámetros, basados en la transformación de Bursa-Wolf. Se detalla a continuación la metodología usada para la determinación de los mismos. La metodología propuesta pretende entonces determinar un único conjunto de parámetros de transformación, de fácil aplicación, confiables e invariante a la zona donde del país donde se encuentros los objetos cartográficos a transformar.

La determinación de los parámetros de transformación

Toda transformación se basa en la determinación de los parámetros necesarios para aplicar algún modelo, ya sea el de Bursa-Wolf, un polinomio, o algún otro. La característica que comparten es que requieren el uso de puntos idénticos, es decir, puntos que tienen coordenadas en los dos sistemas a considerar.

Dado que la cantidad de puntos idénticos entre el sistema Lambert y el sistema CRTM05 es muy poca, se procedió entonces a utilizar datos sintéticos. Sin embargo y para los fines que deben cumplir los parámetros a determinar, esto no se considera un inconveniente. Para ello, se dividió el país en una cuadrícula de 10 minutos por 10 minutos. Se debe tener claro que de esta cuadrícula, solo se tomaron en cuenta puntos que estuvieran “tierra adentro” en el mapa de Costa Rica. En la figura 3 se detalla la cuadrícula utilizada.

Figura 3: Cuadrícula definida para la determinación de los parámetros de transformación



Fuente: Elaboración propia, 2014

La determinación de los siete parámetros para el modelo de Bursa-Wolf se basa en la aplicación de un algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados; solo que para aplicar este algoritmo se requiere tener las coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z) de los puntos idénticos. Esto quiere decir que se necesita conocer las coordenadas (X, Y, Z) referidas al elipsoide Clark1866 y las coordenadas (X, Y, Z) referidas al elipsoide WGS84.

El insumo inicial son coordenadas elipsoidicas referidas al elipsoide de Clark1866, obtenidas de la cuadrícula de 10 minutos por 10 minutos, citada anteriormente. En total se obtuvieron 160 puntos con coordenadas elipsoidicas y al proyectarlas, 119 están en el sistema Lambert Norte y 41

están en el sistema Lambert Sur. Estas coordenadas elipsoidicas se transformaron en coordenadas X, Y, Z, referidas al elipsoide Clark1866.

Como se citó anteriormente, los datos a utilizar son “sintéticos” en el sentido de que estos no existen en el campo. Por esta razón, se debía buscar una estrategia para obtener las coordenadas (X, Y, Z) referidas al elipsoide WGS84, que se explica a continuación:

- Paso 1: Las coordenadas referidas al elipsoide de Clark1866 se proyectaron a coordenadas cartográficas, según la zona en que estaban.
- Paso 2: Las coordenadas obtenidas en el paso 1 se transformaron a CRTM05, utilizando un polinomio de tercer grado para pasar de del sistema Lambert a CRTM90, una transformación de Helmert 2D para transformar de CRTM90 a CRTM98 y una transformación de Helmert 2D para transformar de CRTM98 a CRTM05, usando los parámetros dados en (Costa Rica, 2007b)
- Paso 3: Las coordenadas obtenidas en el paso 2 se convirtieron a coordenadas elipsoidicas referidas al elipsoide WGS84.
- Paso 4: Las coordenadas obtenidas en el paso 3 se convirtieron a coordenadas X, Y, Z.
- Paso 5: Las coordenadas referidas al elipsoide de Clark1866 usadas en el paso 1 se convirtieron a coordenadas X, Y, Z.

Al finalizar el paso 5, se tienen las ternas de coordenadas X, Y, Z en ambos sistemas, con lo cual se pueden calcular los parámetros de transformación directa entre el sistema Lambert y CRTM05. Para este fin, se programó una rutina en MATLAB para efectuar el ajuste por mínimos cuadrados. Los resultados se muestran en la tabla 3. Estos parámetros están con los signos para efectuar la transformación del sistema Lambert a CRTM05.

Tabla 3: Parámetros determinados al aplicar el algoritmo de ajuste

Parámetro	Unidad	Magnitud
Traslación X	Metro	2.401481
Traslación Y	Metro	-26.277154
Traslación Z	Metro	86.037360
Rotación X	Segundo de arco	-5.004596
Rotación Y	Segundo de arco	-0.804558
Rotación Z	Segundo de arco	-6.938827
Factor de escala	Partes por millón	-16.144598

Fuente: Elaboración propia, 2014

Para efectuar un control del cálculo, se determinaron los parámetros usando el software llamado “SEVENPAR Helmert Parameters”, elaborado por Dipl.-Ing. F. Killet y descargado de la página <http://www.killetsoft.de>, dando resultados idénticos a los valores presentados en la tabla 3.

Análisis de resultados

Con el fin de determinar la calidad de la transformación, se efectuó la comparación con los parámetros dados por el Instituto Geográfico Nacional. Estos parámetros son oficiales y se pueden ver en (Costa Rica, 2007a).

El procedimiento efectuado fue el siguiente: Se definieron ocho puntos de forma arbitraria. A esto puntos, los cuales no existen en el terreno, se les definió sus coordenadas sobre el elipsoide de Clark 1866. Resolviendo el problema cartográfico directo y respetando si los mismos están en Lambert Norte o Lambert Sur, se determinaron las coordenadas de cuadrícula. Estas coordenadas se dan en la tabla 4.

Tabla 4: Coordenadas de los puntos de prueba

PUNTO	NORTE (m)	ESTE (m)	LAMBERT
1	350323,045	353604,565	Norte
2	313162,584	462792,364	Norte
3	276586,952	353291,220	Norte
4	220995,784	462692,926	Norte
5	384119,920	426036,557	Sur
6	365619,313	499237,140	Sur
7	310339,819	535903,674	Sur
8	273464,347	517585,961	Sur

Fuente: Elaboración propia, 2014

Con el fin de tener valores de comparación, las coordenadas indicadas en la tabla 4 se transformaron a CRTM usando los parámetros y los métodos de cálculo indicados en el Costa Rica, (2007b).

Los métodos usados fueron:

- 1) Ir de Lambert a CRTM90 usando un polinomio de tercer grado, luego de CRTM90 a CRTM98 usando una transformación bidimensional de Helmert y de CRTM98 a CRTM05 usando una transformación bidimensional de Helmert (esta transformación se hace entre planos cartográficos).
- 2) Usando la transformación de Molodensky de tres parámetros, que efectúa la transformación entre los elipsoides Clark 1866 y WGS84.
- 3) Usando los parámetros calculados en la tabla 3, con el fin de transformar a CRTM05 las coordenadas dadas en la tabla 4.

En la tabla 5 se muestran las diferencias al comparar las coordenadas CRTM05, usando los métodos 1) y 3) y en la tabla 6 se dan las diferencias al comparar las coordenadas calculadas usando los métodos 2) y 3), comentados anteriormente. Tanto para las tablas 5 y 6, el valor dN representa la diferencia en la coordenada norte y el valor dE representa la diferencia en la coordenada este.

Tabla 5: Diferencia de coordenadas transformadas entre los métodos 1) y 3)

PUNTO	dN (cm)	dE (cm)
1	-3,68	-0,80
2	1,10	-0,60
3	-0,75	-2,24
4	0,48	1,43
5	-0,85	1,67
6	-0,19	0,51
7	1,68	-1,43
8	3,71	-1,62

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 6: Diferencia de coordenadas transformadas entre los métodos 2) y 3)

Punto	dN (cm)	dE (cm)
1	190,39	-24,56
2	112,11	40,38
3	133,85	-56,64
4	48,30	-1,07
5	-3,17	0,07
6	-45,06	37,66
7	-91,94	35,56
8	-104,80	10,72

Fuente: Elaboración propia, 2014

Con base en los resultados mostrados en las tablas 5 y 6, se determina que el cálculo efectuado cumple con el fin propuesto, el cual es poder automatizar un procedimiento para transformar de Lambert a CRTM05 sin la necesidad de efectuar pasos intermedios.

Es necesario recordar que uno de los métodos de transformación consiste en tomar la información en Lambert, pasar a CRTM90, luego a CRTM98 y finalmente a CRTM05 (triple transformación). Esto es efectuar tres transformaciones, procedimiento que comúnmente no está integrado en los programas SIG. Por tanto, con los parámetros calculados en la presente investigación y probados, se determina que se obtienen los mismos resultados al compararla con “triple transformación” comentada anteriormente, según se desprende de los resultados de la tabla 5, donde las diferencias dN y dE tiene magnitudes centimétricas.

Finalmente, se debe tener presente que la calidad de una transformación de coordenadas depende tanto de los parámetros de transformación, como de la calidad del producto a transformar. Por tanto, es necesario tomar en cuenta la escala del producto cartográfico que se transformará, debido a que este parámetro influye en la calidad del producto que se obtendrá, en relación con su posición en el mundo “real”.

Discusión

En el presente artículo se describe una metodología para la determinación de los parámetros de transformación entre el nuevo sistema de oficial de referencia de Costa Rica y los antiguos productos cartográficos.

La metodología es confiable y de simple aplicación en cualquier plataforma de GIS o CAD e inclusive en los equipos de medición GPS, lo que facilitará su uso práctico por parte de las instituciones públicas y privadas.

Los parámetros calculados pueden ser usados en los dos sentidos, es decir, para transformar información de Lambert a CRTM05 y viceversa (con el debido cuidado a la hora de considerar los signos de los parámetros). Sin embargo, no se recomienda efectuar transformaciones de CRTM05 a Lambert, ya que en general, la información en CRTM05 tiene una mejor calidad, debido a la escala de los productos asociados a la misma, la cual es mayor que la escala de los productos cartográficos asociados a la proyección Lambert.

No se debe olvidar el fin del presente artículo, el cual es proponer un método para los usuarios de programas SIG, que desean efectuar la transformación del sistema Lambert al sistema CRTM05. Se parte del hecho de que los productos derivados de cartografía Lambert son provenientes de mapas a escala 1:50000, donde 1 mm en la carta representa 50 metros en el terreno. Por tanto, 1 m en el terreno representa 0,02 mm en la carta. En ese sentido los autores concluyen que para la transformación de cartografía, el error obtenido al usar los parámetros propuestos es totalmente despreciable.

Los resultados de esta investigación no pretenden sustituir los parámetros oficiales definidos por el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica, sino más bien apoyar y facilitar a los usuarios la transformación de sus datos geográficos. Los autores esperan, que este artículo sirva como una guía práctica y de discusión sobre los tópicos que abarca la problemática de la transformación de la cartografía al sistema oficial de Costa Rica CRTM05.

Referencias

- Badekas, J. (1969). *Investigations Related to the Establishment of a World Geodetic System*. Report No. 124, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, USA.
- Bursa, M. (1965). *Fundamentals of the Theory of Geometric Satellite Geodesy*. *Travaux de l'institut Geophysique de l'academie Tehecoslovaque des Sciences*, 241.
- Costa Rica. (2007a). *El sistema de referencia CR05 y la proyección Transversal Mercator para Costa Rica*. Programa de Regularización de Catastro y Registro de Costa Rica.

- Costa Rica. (2007b). *Decreto ejecutivo 33797-MJ-MOPT*. Ministerio de Justicia y Gracia. Costa Rica.
- DMA. (1991). *Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and Relationship with Local Geodetic Systems*. Technical Report, (8350.2), Defense Mapping Agency, USA.
- Grafarend, E. (2010). *Algebraic Geodesy and Geoinformatics*. Springer-Verlang, Wien, New York.
- Hofmann, B., Lichtenegger, H. & Collins J. (1992). *Global Positioning System Theory and Practice*. Second edition. Springer-Verlang, Wien, New York.
- IAGS. (1950). *Proyección Lambert Para Costa Rica*. InterAmerican Geodetic Suvey, USA.
- Jekeli, C. (2002). *Geometric Reference Systems*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Keller, W. (2001). *Geodetic Coordinate System*. Geodetic Institute, University Stuttgart.
- NIMA. (1997). *Department of Defense World Geodetic System 1984, its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Third edition. National Imagery and Mapping Agency.
- Rapp, R. (1985). *Geodesia Geométrica, Volumen II (Técnicas avanzadas)*. Agencia Cartográfica de Defensa, Servicio Geodésico Interamericano. Escuela Cartográfica. Panamá, DMA-IAGS CT-6.
- Wolf, H. (1963). Geometric connection and re-orientation of three-dimensional triangulation nets. *Bulletin Geodesique*, 68, 165-169.