

Control de Precisión Posicional de la Cartografía Base de la Intendencia Municipal de Montevideo - Uruguay

M.Sc.Ing.Fabián D.Barbato

Facultad de Ingeniería – Universidad de la República/ UDELAR

Montevideo – Uruguay

fbarbato@fing.edu.uy

Resumen

La utilización de mapas ha sido una actividad básica de la humanidad, desde que el hombre tuvo necesidad de ubicarse, orientarse y comunicar a otros la localización de cualquier tipo de evento sobre la superficie terrestre. La evolución de las técnicas en la confección de los mapas, la tecnología de producción de cartas, los sistemas de referencia y la cartografía digital, han revolucionado dramáticamente el concepto de “mapas aislados”, para pasar a formar sistemas integrales de información geográfica.

Hoy un mapa o una carta forman parte del concepto de “mapping”, asociado indisolublemente a los G.I.S. y las más modernas técnicas de geo-referenciamiento y percepción remota. El paradigma de los años 90 respecto a los GIS ha cambiado desde la preocupación por el software a los conceptos de calidad y gerenciamiento.

Un mapa, como producto destinado a brindar información multipropósito, debe ser confiable, no sólo desde el punto de vista de la información temática asociada que contiene y se expresa, sino también de la precisión geométrica con la cual cada objeto geográfico es identificado y vinculado con el resto de los demás objetos.

Este trabajo desarrolla conceptos teóricos y un software específico para el control de calidad de un mapa, orientado a la determinación de las precisiones geométricas y topológicas, basado en conceptos de tests estadísticos, y determinación de algoritmos que produzcan parámetros de aceptación o rechazo de la cartografía testeada.

Esta investigación abarca un trabajo de aplicación de estos algoritmos al estudio de la cartografía 1:1000, base del Sistema de Información Territorial de la IMM, que incluye la toma de puntos con GPS en campo y cartografía digital de comparación para la extracción de coordenadas de entidades puntuales.

Las observaciones involucradas en el estudio, incluyen un tratamiento de depuración a través de tests estadísticos y estimadores robustos.

Abstract

The use of maps has been one of the human basic activity, since the man had the necessity to be located, to be guided and to communicate the localization of any event on the terrestrial surface. The evolution of the techniques for developing the maps, the production of charts, the satellite geodesy and reference systems, and the digital cartography, have revolutionized the concept dramatically from “isolated maps”, to Geographic Information Systems (GIS).

Actually, the map is becoming to the concept of “mapping”, associate indissolubly to the G.I.S. and the most modern geo-referencing techniques and remote sensing.

A map should be reliable, as a product dedicated to offer multipurpose georeferenced information, not only from the associate thematic information point of view, but also of the geometric accuracy, and how the geographical features are identified and linked with the rest of the objects.

This work develops theoretical concepts and a specific software oriented to the quality control of a map, including the determination of the geometric and topology accuracies, based on concepts of statistical algorithms and parameters of acceptance or rejection for the cartography tested.

This investigation embraces an application work from these algorithms to the study of the cartography base of the GIS of Montevideo, that includes both surveying control points with GPS, and many sources of geographic data for the comparison and testing.

This paper determines the algorithm and software to test the base cartography of a GIS.

The observations routines involved in the study, includes a theory of errors treatment through statistical tests and robust estimators.

Introducción

La cartografía base que se utiliza para la implementación de un Sistema de Información Geográfico (GIS), define el marco geométrico y espacial donde las entidades se relacionan y localizan para su interacción topológica.

Los resultados que se derivan del análisis y extracción de datos de un GIS, tienen directa vinculación con la estructura cartográfica sobre la cual se ha implementado el sistema.

Un elemento esencial en este concepto, radica en la precisión cartográfica que puede asegurar un GIS, sea como valor agregado en la publicación de datos, como así también en el uso consciente de sus cualidades geométricas.

Los temas vinculados a los controles de calidad de los GIS, sea desde el punto de vista de sus datos textuales o atributos asociados, como de sus precisiones geométricas, ocupan hoy un lugar de primer nivel en importancia en la temática GIS. Tal es así, que USA y Europa, están dedicando enormes esfuerzos y dedicación a la determinación de estándares de calidad para los GIS.

Objetivos

El objetivo de este proyecto es analizar metodológicamente la precisión geométrica de la cartografía 1:1000 base del Sistema de Información Territorial de la Intendencia Municipal de Montevideo

(<http://www.montevideo.gub.uy/sit/>). Este proyecto se lleva adelante en acuerdo entre la IMM y la Universidad de la República (UDELAR) (www.fing.edu.uy) , a través de la Facultad de Ingeniería-Instituto de Agrimensura.

Este acuerdo implica que la IMM dispone de los datos cartográficos básicos para el testeo de la cartografía, y la UDELAR ejecuta el proyecto sobre los mismos.

Marco Conceptual

El estudio del comportamiento de los errores (aleatorios) en geomática, define las magnitudes observacionales a ser tratadas como variables matemáticas, es decir, variables que pueden asumir valores numéricos en todo el campo real. Si a estas variables le incluimos comportamientos basados en matemática probabilística, es decir, elementos representativos muestrales de un universo mucho más grande, dichas variables pasan a ser “variables aleatorias”.

Precisamente, este trabajo estudia el comportamiento de variables tales como las coordenadas (y sus diferencias) que definen objetos en una carta, por medio de conjuntos muestrales, ya que en la práctica resulta imposible abarcar los infinitos puntos que contiene un mapa.

Para este objetivo, introduciremos algunos conceptos básicos que ayudarán a comprender el algoritmo de control de calidad de un mapa propuesto en este trabajo.

Para determinar parámetros de precisión en cartografía base de GIS, es necesario plantear adecuadamente qué tipo de estimadores y funciones asociadas a ellos utilizaremos. Recordemos que en todo caso, la determinación de estos parámetros se realiza sobre una rígida base matemática-probabilística, por lo que es condición insoslayable estar muy seguros de la utilización de cierto tipo de estimadores, estableciendo y controlando su consistencia y confiabilidad .

Establecemos como hipótesis estadística , sustentada por estudios y experiencias de trabajo, que la distribución que mejor se adapta a la verificación de discrepancias geométricas entre el “real world” y diversos soportes cartográficos, es la Distribución Normal (N).

Componentes de Precisión Geométrica

Desde el punto de vista geométrico, es necesario estudiar los aspectos que hacen a la propia naturaleza de los errores; como primer paso, determinar , si la carta a estudio presenta o no sistematismos o sesgos, depurando los posibles errores groseros o equivocaciones.

Habiendo sido determinada la no existencia de sistematismos, o eventualmente su determinación y posterior corrección, estaremos en condiciones de analizar si la carta cumple o no con las condiciones de precisión requeridas (σ_0).

Por último será necesario calcular qué condiciones mínimas de precisión cumple el mapa.

Entonces, dada una cartografía analizaremos :

- Depuración de observaciones y determinación de sistematismos o “bias”.
- Cumple o no la precisión requerida.
- Radio “umbral” de precisión .

Para este proceso ,utilizaremos como herramienta analítica las técnicas de testeo estadístico.

Estas técnicas consisten en la determinación de “hipótesis estadísticas”, de tal forma que para toda hipótesis H_0 , existirá una alternativa H_1 , siendo la unión de H_0 y H_1 la ocurrencia del “suceso seguro”, $P[H_0 \cup H_1] = 1$

Para proceder con las rutinas que determinan los tests estadísticos, se suponen depuradas las observaciones de equivocaciones. Este tratamiento ha sido largamente explicitado en la sección # 3.

Testeo Estadístico – Sistematismos.

A nivel de hipótesis estadísticas es posible plantear lo siguiente:

- I. H_0 es aceptada cuando H_0 es cierto
- II. H_0 es rechazada cuando H_0 es cierto
- III. H_0 es aceptada cuando H_0 es falso
- IV. H_0 es rechazada cuando H_0 es falso

I y IV son opciones “correctas”

II es denominado “Error Tipo I”

III es denominado “Error Tipo II”

$$\left. \begin{array}{l} \{ \mu_0 = \text{dato} \} \\ \{ H_0 : \mu = \mu_0 \\ H_1 : \mu \neq \mu_0 \end{array} \right\} \quad \alpha = P[\text{rechazar } H_0 \text{ cuando } H_0 \text{ es cierto}] = \text{Error Tipo I}$$

$$(1-\alpha = \text{grado de confiabilidad})$$

Para poder controlar un mapa o carta, definiremos nuestra variable aleatoria (X) como la diferencia entre coordenadas capturadas en campo (GPS) y coordenadas extraídas de un cierto mapa tal que:

$$[X] \equiv \Delta X$$

$$[\bar{X}] \equiv \Delta \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta X_i$$

Estas son nuestras nuevas variables aleatorias $\Rightarrow (\Delta \bar{X} \text{ y } \Delta X)$

Testeo de varianzas (semi-intervalo)

En otras ocasiones nos interesa conocer si una cierta varianza cumple la condición para un valor \leq .

$$\begin{cases} H_0: \sigma^2 \geq \sigma_0^2 \\ H_1: \sigma^2 < \sigma_0^2 \end{cases} :$$

$$\begin{cases} H_0: \sigma^2 \leq \sigma_0^2 \\ H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2 \end{cases} \text{ Dada la tolerancia } \sigma_0^2, \text{ determinaremos si nuestro mapa cumple o no con}$$

la precisión pre-establecida..

si se acepta \rightarrow el mapa cumple con la precisión “pre-establecida”.

Cálculo de la precisión horizontal media y elipse de error

Luego de haber procesado las observaciones en relación con la determinación de sistematismos y controles de aceptación o no de precisiones, será necesario determinar un valor general medio de la precisión horizontal del mapa. Esto significa un valor promedio de precisión, con una certeza del 95% según normas aplicadas en este trabajo.

En este punto identificamos dos casos distintos:

- si el mapa cumple con las precisiones requeridas
- si el mapa no cumple con las precisiones requeridas

- Para el primer caso, alcanzará con calcular la precisión media como:

$$\sigma_{x \leftrightarrow y} = 2.4477 * 0.5 * (\sigma_x + \sigma_y)$$

siempre que la relación entre el σ (máximo) y σ (mínimo) sea entre 0.6 y 1, según los estándares de la FGDC, capítulo No.3.

Esto transforma una elipse de error a un círculo de error del 95% ya que la distribución en X e Y es bivariable normal, suponiendo X e Y no correlacionadas \Rightarrow

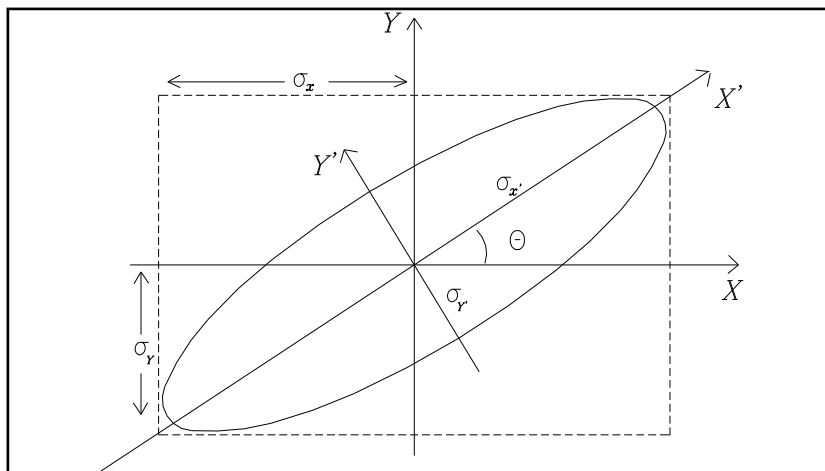
$$C^2 = L[4\pi^2 k^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - \rho^2)]^{-1}$$

Para estudiar las probabilidades asociadas a las elipses de error, consideramos $\rho=0$

$$\frac{X^2}{\sigma_x^2} + \frac{Y^2}{\sigma_y^2} \leq C^2$$

$$\frac{X^2}{\sigma_x^2} + \frac{Y^2}{\sigma_y^2} = U \text{ tiene distribución chi-cuadrado}$$

$$P[U \leq C^2] = 1 - e^{-C^2/2}$$



-Fig1 -Elipse de Error Estándar -

Para $C = 1$ obtenemos la elipse estándar de error, con una probabilidad asociada del 39.4%. Para valores de $C \neq 1$, este parámetro C actúa como un coeficiente de proporcionalidad.

C	P[U ≤ C]
1.000	0.394 39 %
1.177	0.500 50 %
2.447	0.950 95 %

-Probabilidades Normales Bivariantes-

Según las hipótesis estadísticas de trabajo, podremos asegurar con un 95% de certeza, que la precisión general media del mapa será $\sigma_{x \Leftrightarrow y}$.

Este $\sigma_{x \leftrightarrow y}$ representa un cálculo “pesimista”, ya que obviamente las elipses de error están siendo reducidas a un círculo “medio”. En realidad no estamos determinando la elipse error de un punto, sino modelando un punto virtual que se genera por la determinación de varianzas en X e Y.

- En el segundo caso, la situación planteada es que la precisión del mapa no cumple con los requerimientos del usuario; entonces podemos calcular la “precisión umbral media” $[\sigma_u]$ de la carta para que cumpla con los test de calidad.

$$z(2 \cdot \phi(z) - 1) = \frac{\Delta \bar{X} \cdot \sqrt{n}}{\sigma_u}$$

$$[\sigma_u] = \frac{\Delta \bar{X} \cdot \sqrt{n}}{Z}$$

Esta estimación resultará muy útil para la evaluación y clasificación de la cartografía en Clases I, II, y III, según estándares de la FGDC.

Algoritmo de Control de Precisión Horizontal de un Mapa

Este algoritmo de control de calidad de un mapa, está pensado para el control geométrico. La metodología propuesta aquí es la siguiente.

- I- Control de sistematismos.
- II- De no existir sistematismos o corregidos los mismos, aceptación o rechazo de los parámetros de precisión calculados contra los teóricos emanados de las distribuciones.
- III- En caso de aprobarse, determinación de una precisión media para el universo de puntos .

El objetivo de este algoritmo es poder determinar si la carta resulta lo suficientemente confiable para utilizarla con diversos objetivos que se establecerán de acuerdo a las necesidades del usuario.

El usuario *necesita y debe conocer la calidad del mapa* que adquiere, condición indispensable si además el destino inmediato es la implementación de un GIS.

Uno de los aspectos fundamentales es disponer de la cartografía fuente ,es decir, aquella sobre la cual se digitalizó, o rasterizó. De esta forma podremos establecer el origen de eventuales errores y sistematismos en la confección de la carta.

La captura de esta cartografía “fuente” mediante técnicas digitales, producirá errores que se adicionarán a los originales, los cuales deberán ser controlados también.

La base del algoritmo es diseñar una red GPS de puntos de control perfectamente identificados e individualizados tanto en el campo como en la carta o mapa (puntos geodésicos, cruce de caminos, vértices de construcciones).

Al diseñar la selección de puntos de control, deberá tomarse muy en cuenta el grado de distribución y densidad de los puntos, lo más uniforme posible, y que la cantidad de puntos no resulte inferior a 20.

De acuerdo a las especificaciones de la FGDC-STD-007.3-1998, los puntos deben estar espaciados a 10% de la longitud de la diagonal de un rectángulo que abarque el área de estudio, y al menos el 20% de los puntos deben contemplar todos los cuadrantes.

De acuerdo a la precisión de la cartografía a controlar, podrán efectuarse ajustes a la red GPS o utilizarla como un universo de puntos aislados. En este caso resulta imprescindible conocer las varianzas y las épocas para cada uno de los puntos tomados en campo.

El diseño de esta red deberá pre-analizarse para una precisión en el entorno de 1/3 de la tolerancia ($prean = T/3$).

- ❖ Desde el soporte del mapa que se dispone a controlar, se extraen las coordenadas de los mismos puntos identificados en la red GPS.
- ❖ Las observaciones tanto de terreno como de mapa son sometidas a estrictos controles de calidad y depuración, a fin de asegurar un conjunto de datos que expresen crudamente las diferencias entre los valores muestrales sin ningún tipo de interferencia ajena al proceso.
- ❖ Calculando las diferencias entre coordenadas “terreno” y coordenadas “mapa”, definiremos una nueva variable aleatoria que será sometida a todos los procesos mencionados en este trabajo.
- ❖ Si existiera la cartografía fuente, podrán determinarse también los errores generados a través de procesos de digitalización y/o vectorización.
- ❖ Se determinará la existencia o no de sistematismos, y la aceptación o rechazo de la precisión general del mapa respecto a una precisión requerida por el usuario.
- ❖ En caso de que los tests sean aprobados, se calculará finalmente el parámetro PG medio general de la carta.

El algoritmo realiza un tratamiento similar a las coordenadas en X como a las de Y, por lo que la aplicación es exactamente la misma.

(1) Captura de coordenadas de puntos en ambos universos.

$$\begin{array}{ll} X^m & X^m \rightarrow \text{mapa.} \\ X^t & X^t \rightarrow \text{terreno (“real world”)} \end{array}$$

(2) Cálculo de la nueva variable aleatoria $\Delta\bar{X}$ estandarizada e Intervalos de Confianza.

(3) Testeo de Sistematismos y Distribución.

(4) Testeo de Precisiones Horizontales.

(5) Determinación de la Precisión Horizontal Media del Mapa.

Desarrollo del Trabajo

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el trabajo se orientó de la siguiente forma.

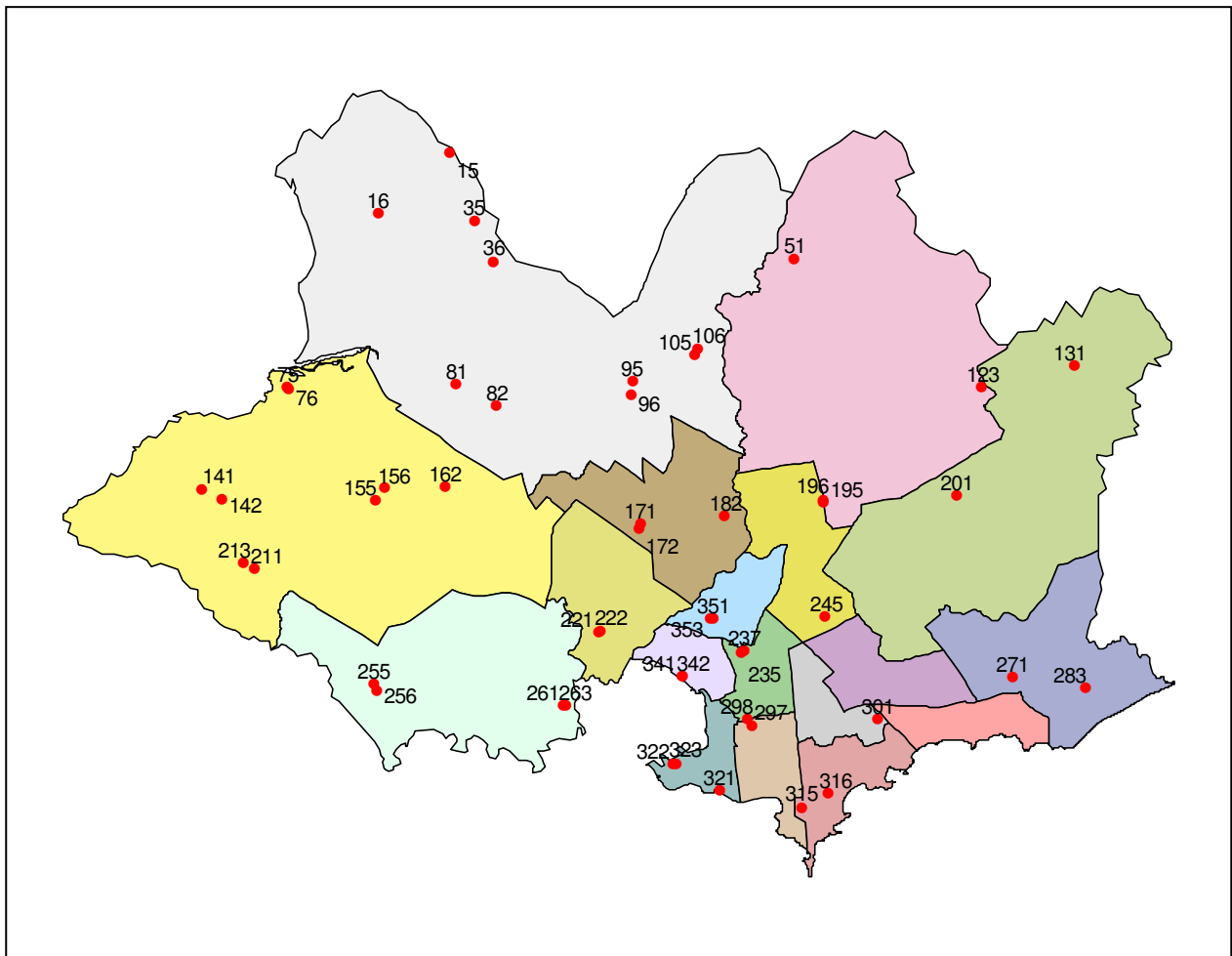
Se identificaron en la cartografía base digital, puntos candidatos a ser considerados para el test, en función de su localización, distribución y definición en el campo.

En el mismo sentido, se identificaron y analizaron puntos geodésicos del CDM a ser observados con GPS, para la determinación de las transformaciones necesarias para pasar las coordenadas emergentes del WGS84 al sistema CDM.

Con este panorama, se observaron cerca de 80 puntos, conjunto formado por puntos para el testeo, puntos geodésicos del CDM y puntos de control para validación de los datos.

Estas observaciones GPS se realizaron con equipamiento geodésico diferencial, logrando precisiones en la determinación de los puntos del orden de los centímetros. Esto resulta básico tanto para el cálculo de los parámetros de transformación como el orden de precisión aceptable para el testeo de una cartografía 1:1000.

En esta imagen podemos apreciar la distribución geográfica de los puntos.



-Fig 2 –Distribución de los Puntos –

Es importante resaltar que se tomaron una cierta cantidad de pares de puntos en la misma alineación de las manzanas, para así también poder determinar los cálculos de distancias relativas entre los puntos GPS y aquellos tomados de la cartografía digital.

Procesamiento de Datos.

Con la información depurada de errores groseros y equivocaciones, queda ahora por aplicar el algoritmo a los datos remanentes (51).

Para ello hemos desarrollado un software específico, el QCGIS (F.Barbato 1999), realizado en Visual Basic.

Este software aplica el algoritmo de control de calidad, permitiendo trabajar con parámetros que los define el usuario, como ser la precisión requerida, el valor de Z para la distribución normal, y el intervalo de confianza para estimación de la precisión real de la carta.

Para trabajar con el QCGIS alcanza con ordenar los datos de los puntos de control en tablas diferentes, manteniendo la unicidad del identificador del punto de control.

Es necesario ingresar el dato de comparación de la precisión “requerida”.

Es decir, un potencial usuario de la cartografía determina una precisión para controlar si la cartografía en cuestión la satisface o no.

En este caso, de acuerdo a la escala y estándares de la FGDC, la carta debería cumplir con una precisión de 0.25 metros aproximadamente.

Esta suposición parte de objetivamente hacer énfasis en que la precisión de un mapa está determinada por el factor de escala de publicación de un mapa. Veremos más adelante que resulta necesario hacer otras consideraciones al momento de evaluar con criterio científico las precisiones cartográficas. Para esto deberá considerarse propagación de errores en la construcción del mapa, digitalización, ajustes, geo-referenciamiento, etc.

Es necesario ingresar también la Z y la Chi-square de acuerdo al número de observaciones y otros parámetros de la distribución normal.

Ingresados los datos correspondientes, el programa calcula todos los valores del algoritmo y realiza las comparaciones necesarias a fin de emitir un reporte separado para la X e Y, donde se evalúa la existencia o no de sistematismos, y la aceptación o rechazo de la precisión intrínseca de la carta, respecto a la requerida.

Para el caso que se estime conveniente, el programa tiene la capacidad de calcular la precisión general en una distribución bi-variable normal, tomando como variables la X e Y, para un intervalo de confianza definido por el usuario.

Este valor servirá como referencia de la precisión general de la carta testeada.

De acuerdo a las precisiones estimadas para una cartografía 1:1000, se tuvo muy en cuenta que las varianzas residuales tanto de los puntos observados como del cálculo de los parámetros de transformación, deberían encontrarse en entornos de por lo menos 1:4 de la precisión estimada.

Esto permite aplicar los tests con holgura sin que los errores asociados a las observaciones tengan alta significancia en los resultados finales.

A continuación, se despliegan las tablas donde se encuentran almacenadas las coordenadas capturadas, tanto desde la cartografía objeto de estudio, como desde los Puntos de Control GPS,

tomados en campo, como así también la tabla que calcula las diferencias absolutas entre posiciones homólogas.

Puntos GCP-GPS

Puntos	X	Y
15	455236.67	6158320.75
16	452842.15	6156323.18
35	456024.07	6156084.34
36	456686.38	6154738.35
51	466660.44	6154817.69
75	449804.85	6150544.91
76	449858.13	6150480.73
81	455434.55	6150656.19
82	456791.17	6149927.74
95	461285.26	6150759.23
96	461237.33	6150266.42
105	463368.21	6151616.49
106	463500.77	6151832.62
123	472930.71	6150541.48
131	475986.95	6151259.4
141	446990.29	6147159.85
142	447654.86	6146817.38
155	452746.88	6146753.12
156	453033.64	6147202.05
162	455045.53	6147238.56
171	461544.28	6145989.48
172	461522.92	6145873.34
182	464368.81	6146247.02
195	467643.89	6146710.55
196	467635.59	6146802.67
201	472103.43	6146938.61
211	448729.02	6144497.09
213	448370.74	6144718.88
221	460194.3	6142399.16
222	460250.22	6142455.06
235	464910.28	6141752.32
237	465014.05	6141761.86
245	467728.9	6142914.9
255	452715.94	6140693.78
256	452789.62	6140458
261	458973.19	6139972.36
263	459070.72	6139989.82
271	473938.41	6140904.34
283	476384.77	6140530.94
297	465271.28	6139314.15
298	465126.55	6139523.2
301	469431.6	6139502.72
315	466945.75	6136589.33
316	467795.98	6137046.3
321	464189.89	6137131.59
322	462655.27	6138004.21
323	462730.41	6138035.96
341	462959.12	6140966.85
342	462964.11	6140967.55
351	463995.97	6142858.63
353	463904.58	6142844.75

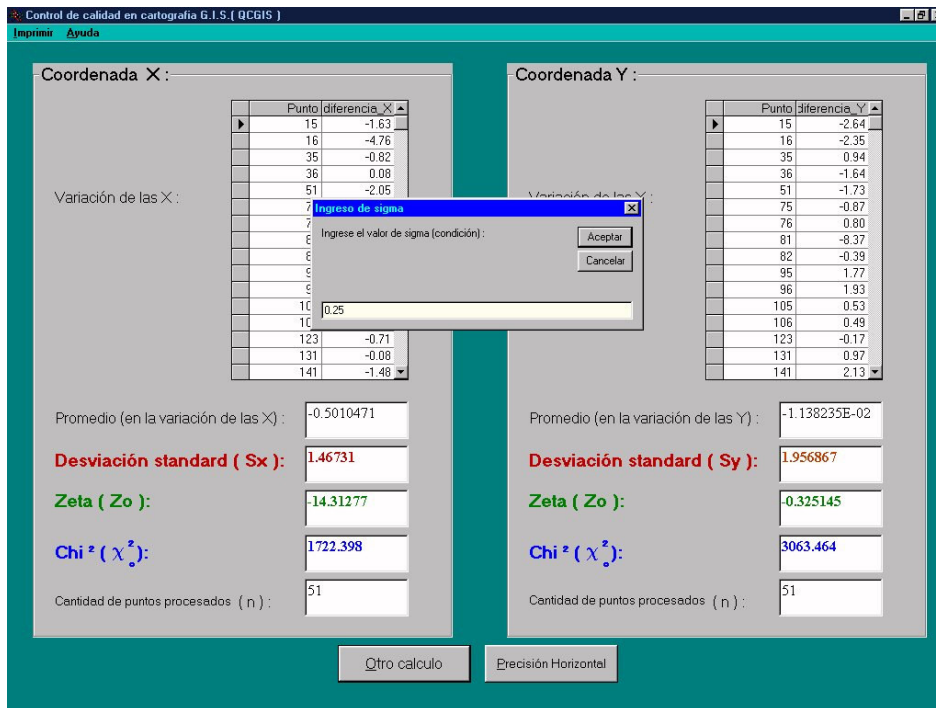
Puntos CARTOGRAFIA DIGITAL

Puntos	X	Y
15	455235.04	6158318.11
16	452837.39	6156320.83
35	456023.25	6156085.28
36	456686.46	6154736.71
51	466658.39	6154815.96
75	449803.90	6150544.04
76	449856.52	6150481.53
81	455431.45	6150647.82
82	456791.81	6149927.35
95	461283.89	6150761.00
96	461239.02	6150268.35
105	463368.30	6151617.02
106	463497.95	6151833.11
123	472930.00	6150541.31
131	475986.87	6151260.37
141	446988.81	6147161.98
142	447653.71	6146815.85
155	452743.27	6146758.47
156	453034.25	6147202.67
162	455043.16	6147239.93
171	461543.32	6145987.86
172	461522.42	6145872.88
182	464370.56	6146246.62
195	467644.56	6146709.08
196	467638.81	6146802.68
201	472102.49	6146938.51
211	448728.14	6144497.58
213	448370.34	6144720.46
221	460194.19	6142399.67
222	460250.16	6142455.32
235	464909.85	6141751.60
237	465014.78	6141760.86
245	467726.74	6142916.79
255	452715.79	6140692.94
256	452789.09	6140458.15
261	458974.11	6139972.32
263	459067.65	6139987.58
271	473937.49	6140903.87
283	476384.44	6140530.46
297	465271.49	6139313.9
298	465126.33	6139523.37
301	469431.56	6139504.12
315	466946.42	6136591.97
316	467796.94	6137048.1
321	464190.30	6137133.87
322	462655.87	6138004.23
323	462732.55	6138032.18
341	462958.86	6140966.80
342	462964.46	6140967.93
351	463995.75	6142859.89
353	463903.98	6142846.04

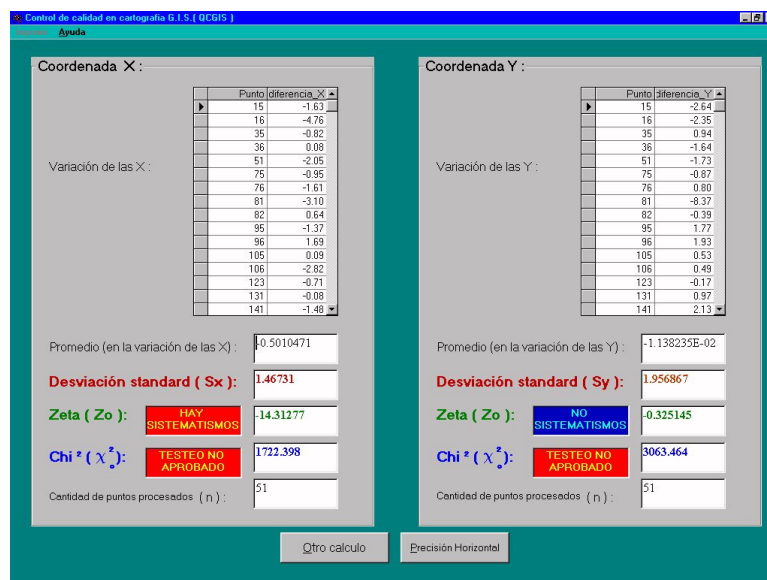
Diferencias de Coordenadas (GPS-C.D.) Aplicación de QCGIS.

Puntos GPS	X	Y	Puntos CARTOG	X	Y	DIF X	DIF Y
15	455236.67	6158320.75	15	455235.04	6158318.11	1.63	2.64
16	452842.15	6156323.18	16	452837.39	6156320.83	4.76	2.35
35	456024.07	6156084.34	35	456023.25	6156085.28	0.82	-0.94
36	456686.38	6154738.35	36	456686.46	6154736.71	-0.08	1.64
51	466660.44	6154817.69	51	466658.39	6154815.96	2.05	1.73
75	449804.85	6150544.91	75	449803.90	6150544.04	0.95	0.87
76	449858.13	6150480.73	76	449856.52	6150481.53	1.61	-0.8
81	455434.55	6150656.19	81	455431.45	6150647.82	3.1	8.37
82	456791.17	6149927.74	82	456791.81	6149927.35	-0.64	0.39
95	461285.26	6150759.23	95	461283.89	6150761.00	1.37	-1.77
96	461237.33	6150266.42	96	461239.02	6150268.35	-1.69	-1.93
105	463368.21	6151616.49	105	463368.30	6151617.02	-0.09	-0.53
106	463500.77	6151832.62	106	463497.95	6151833.11	2.82	-0.49
123	472930.71	6150541.48	123	472930.00	6150541.31	0.71	0.17
131	475986.95	6151259.4	131	475986.87	6151260.37	0.08	-0.97
141	446990.29	6147159.85	141	446988.81	6147161.98	1.48	-2.13
142	447654.86	6146817.38	142	447653.71	6146815.85	1.15	1.53
155	452746.88	6146753.12	155	452743.27	6146758.47	3.61	-5.35
156	453033.64	6147202.05	156	453034.25	6147202.67	-0.61	-0.62
162	455045.53	6147238.56	162	455043.16	6147239.93	2.37	-1.37
171	461544.28	6145989.48	171	461543.32	6145987.86	0.96	1.62
172	461522.92	6145873.34	172	461522.42	6145872.88	0.5	0.46
182	464368.81	6146247.02	182	464370.56	6146246.62	-1.75	0.4
195	467643.89	6146710.55	195	467644.56	6146709.08	-0.67	1.47
196	467635.59	6146802.67	196	467638.81	6146802.68	-3.22	-0.01
201	472103.43	6146938.61	201	472102.49	6146938.51	0.94	0.1
211	448729.02	6144497.09	211	448728.14	6144497.58	0.88	-0.49
213	448370.74	6144718.88	213	448370.34	6144720.46	0.4	-1.58
221	460194.3	6142399.16	221	460194.19	6142399.67	0.11	-0.51
222	460250.22	6142455.06	222	460250.16	6142455.32	0.06	-0.26
235	464910.28	6141752.32	235	464909.85	6141751.60	0.43	0.72
237	465014.05	6141761.86	237	465014.78	6141760.86	-0.73	1
245	467728.9	6142914.9	245	467726.74	6142916.79	2.16	-1.89
255	452715.94	6140693.78	255	452715.79	6140692.94	0.15	0.84
256	452789.62	6140458	256	452789.09	6140458.15	0.53	-0.15
261	458973.19	6139972.36	261	458974.11	6139972.32	-0.92	0.04
263	459070.72	6139989.82	263	459067.65	6139987.58	3.07	2.24
271	473938.41	6140904.34	271	473937.49	6140903.87	0.92	0.47
283	476384.77	6140530.94	283	476384.44	6140530.46	0.33	0.48
297	465271.28	6139314.15	297	465271.49	6139313.9	-0.21	0.25
298	465126.55	6139523.2	298	465126.33	6139523.37	0.22	-0.17
301	469431.6	6139502.72	301	469431.56	6139504.12	0.04	-1.4
315	466945.75	6136589.33	315	466946.42	6136591.97	-0.67	-2.64
316	467795.98	6137046.3	316	467796.94	6137048.1	-0.96	-1.8
321	464189.89	6137131.59	321	464190.30	6137133.87	-0.41	-2.28
322	462655.27	6138004.21	322	462655.87	6138004.23	-0.6	-0.02
323	462730.41	6138035.96	323	462732.55	6138032.18	-2.14	3.78
341	462959.12	6140966.85	341	462958.86	6140966.80	0.26	0.05
342	462964.11	6140967.55	342	462964.46	6140967.93	-0.35	-0.38
351	463995.97	6142858.63	351	463995.75	6142859.89	0.22	-1.26
353	463904.58	6142844.75	353	463903.98	6142846.04	0.6	-1.29

Para la aplicación del QCGIS, procesamos las tablas que aparecen más arriba, ingresando datos estadísticos requeridos, tal como se muestra en las pantallas de ingreso de datos:



Aquí aparece la “precisión “ estimada de acuerdo a los estándares para una escala 1:1000.



En esta página aparece el resumen de datos básicos ingresados y el reporte que produce el programa luego de ejecutado:

Control de calidad en cartografía G.I.S. (QCGIS)

Datos Ingresados:

Sigma = 0.25
Z : = 1.96
Chi² = 67.5
K para distribución bivariante = 2.4477
Probabilidad asociada (%) = 95

Resultados:

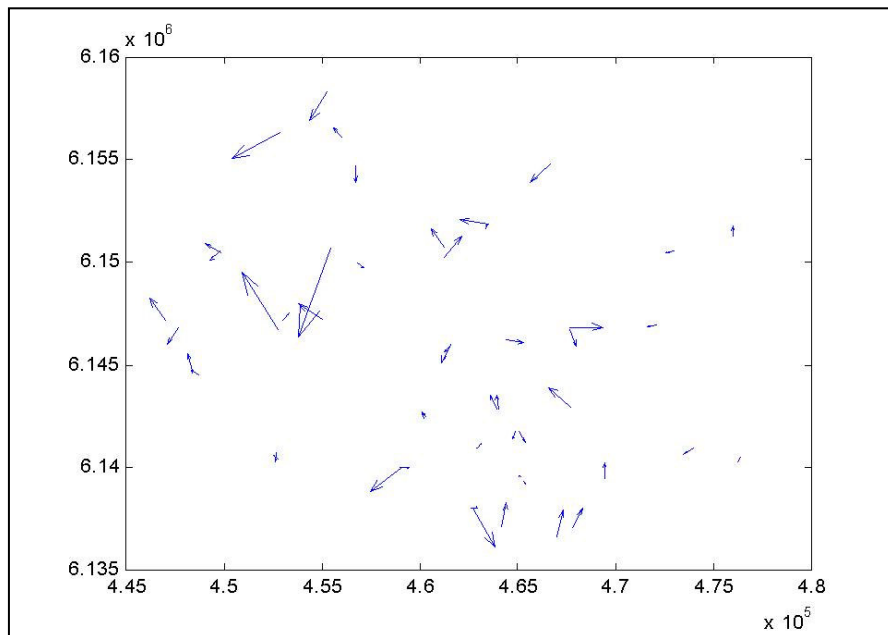
R95 % =4.190679

Coordenada X:

Promedio (en la variación de las X) = -0.5010471
Desviación standard (Sx) = 1.46731
Zeta(Zo) [HAY SISTEMATISMOS] = -14.31277
Chi² [TESTEO NO APROBADO] = 1722.398
Cantidad de puntos ingresados (n) = 51

Coordenada Y:

Promedio (en la variación de las Y) = -1.138235E-02
Desviación standard (Sy) = 1.956867
Zeta(Zo) [NO SISTEMATISMOS] = -0.325145
Chi² [TESTEO NO APROBADO] = 3063.464
Cantidad de puntos ingresados (n) = 51

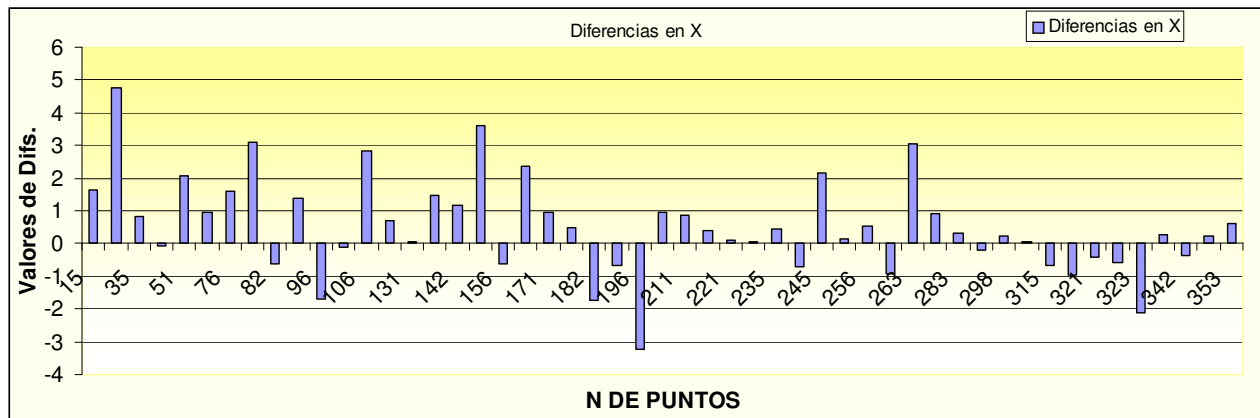


-Fig 3 –Vectores de desplazamiento entre puntos homólogos –

En este gráfico podemos apreciar los vectores de desplazamiento entre las posiciones GPS y los puntos extraídos desde la cartografía digital.

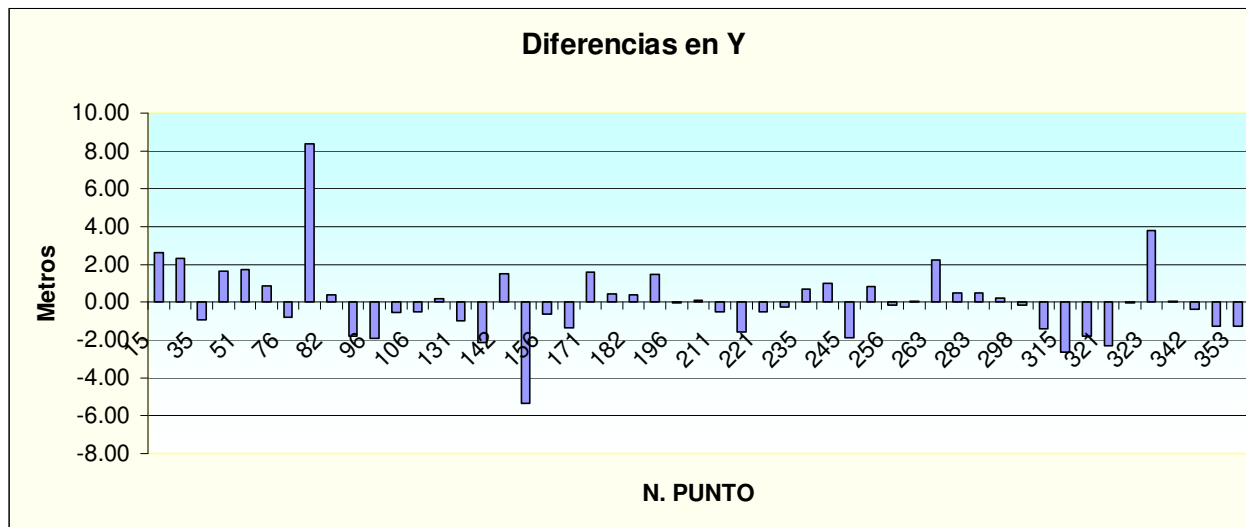
De acuerdo a lo que se puede observar en esta figura, no aparecen patrones definidos de tendencia de los vectores, expresando sistematismos muy poco pronunciados.

Una muestra clara de esto, resulta en desplazamientos en direcciones distintas de las componentes de los puntos en posiciones próximas, como lo son puntos en esquinas de la misma alineación de la



manzana.

En estas gráficas apreciamos la dispersión de las diferencias vectoriales entre puntos tomados en campo con GPS y posiciones tomadas desde la cartografía digital, tanto en componentes (X) como en componentes (Y).



Análisis de los Resultados.

La realización de controles de calidad, si bien merecen una metodología muy cuidadosa y correctamente fundamentada desde el punto de vista técnico, resulta aún más trascendente la forma de evaluar y analizar los resultados.

En el caso de evaluaciones de calidades de mapas, la teoría y algoritmos aplicados son estrictamente validados y verificados por los estándares vinculados a los aspectos metodológicos (FGDC 1998).

Estas aclaraciones son pertinentes para introducirnos en el marco conceptual referido a lo que se entiende por “precisión” de un mapa. Las normas técnicas diferencian claramente dos conceptos no siempre coincidentes:

- Precisión vinculada a la Escala Formal
- Precisión vinculada a la Escala Real

Esta separación en dos conceptos distintos, obedece a que la calidad posicional de un mapa, en especial cuando se ignoran las fuentes, metodología de diseño, tipo de impresión, deformaciones, etc., se vincula directamente con la escala publicada, o sea la escala que aparece impresa en un mapa, sea en soporte duro como digital.

En estos casos, el único testeado posible es aquel que toma el factor de escala como parámetro o variable a ser procesada.

Pero, si conocemos la forma, metodología, geo-referenciamiento, parámetros técnicos y fuentes que dieron origen a la cartografía objeto de nuestro estudio, entonces podemos estudiar otro tipo de escala que en la mayoría de los casos no coincide con la publicada.

La escala mencionada en primer término es la que conocemos como “Escala Formal”, y la segunda como “Escala Real”.

No importa de qué escala estemos tratando, la mayoría de los estándares plantean que la precisión geométrica de un mapa debe ser evaluada en el entorno de 0.25 mm. por el factor de escala en las unidades correspondientes.

Esto plantea un desafío en el sentido de evaluar todas aquellas fuentes de errores que puedan afectar la correcta localización geográfica de una entidad, sea lineal, puntual o poligonal en un mapa.

Este proyecto se encargó de relevar todos aquellos datos que pudieran dar luz sobre “que entorno de precisión” es válido exigirle a la cartografía base de la IMM.

Escala Formal 1:1000

En este marco, el testeo de la “Escala Formal 1:1000” es rechazado.

Es decir, que el mapa digital base de la IMM no cumple con los estándares internacionales para este tipo de cartografía.

Sin embargo, es importante resaltar que los sistematismos detectados (los errores no modelan una Distribución Normal o Gaussiana) son de escasa relevancia, y en general obedecen a algún error de magnitud no aceptada por la Distribución (N).

Esta conclusión es de gran importancia, pues habilita el estudio posterior de formas de corregir estas desviaciones no aceptadas a bajo costo.

Escala Real

Este punto resulta clave, en especial cuando se trabaja con cartografía digital.

De acuerdo al relevamiento de datos efectuados tanto en la IMM como en el Servicio Geográfico Militar (SGM), la cartografía base de la IMM, fue realizada a partir de un vuelo 1:10000.

Este vuelo se apoyó en el Sistema de Referencia CDM, Datum Fortaleza, con importante trabajo de campo.

De acuerdo a la teoría fotogramétrica en referencia al vínculo entre escala de vuelo y del mapa generado, los errores propagados en los apoyos terrestres, la tecnología e instrumental no digital de la época, y otras consideraciones metodológicas, entendemos que la cartografía generada en ese momento correspondería a una “Escala Real” en el entorno de 1:4000.

Si a esto le agregamos los errores propagados en la digitalización realizada en la década del 90 , claramente estaríamos ante la presencia de una cartografía cercana a la escala 1:5000.

Por lo tanto procedimos a realizar un segundo testeo , más real, partiendo de una escala aproximada a 1:5000.

Los resultados son absolutamente satisfactorios, como se puede apreciar en el siguiente reporte:

Control de calidad en cartografía G.I.S.(QCGIS)

Datos Ingresados:

Sigma = 1.85
Z : = 1.96
Chi² = 67.5
K para distribución bivariable = 2.4477
Probabilidad asociada (%) = 95

Resultados:

R95 % =4.190679

Coordenada X:

Promedio (en la variación de las X) = -0.5010471
Desviación standard (Sx) = 1.46731
Zeta(Zo) [NO SISTEMATISMOS] = -1.934158
Chi² [TESTEO APROBADO] = 31.45359
Cantidad de puntos ingresados (n) = 51

Coordenada Y:

Promedio (en la variación de las Y) = -1.138235E-02
Desviación standard (Sy) = 1.956867
Zeta(Zo) [NO SISTEMATISMOS] = -4.393852E-02
Chi² [TESTEO APROBADO] = 55.94346
Cantidad de puntos ingresados (n) = 51

Este segundo testeo, demuestra que la estimación del entorno del factor de escala real de la cartografía base de la IMM fue correcto.

Tal es así, que aplicando ahora una distribución bivariable, (donde se tiene en cuenta las covarianzas o correlaciones entre ambas coordenadas hasta ahora evaluadas separadamente), para así poder calcular las precisiones espaciales en 2D, resulta en una precisión esperable de 4.19 metros en un intervalo de confianza del 95%.

Si el intervalo de confianza lo diseñamos para la desviación standard, entonces el 68% de las discrepancias las encontraremos en un radio menor a los 2 metros.

En resumen, lo que este resultado expresa con total claridad, es que el vector diferencia calculado entre las posiciones de las entidades en el mapa, y las posiciones de los puntos homólogos en el mundo real, serán en el 95% de los casos ,cercano a los 4 metros, y en el 68% de los casos, por debajo de los 2 metros.

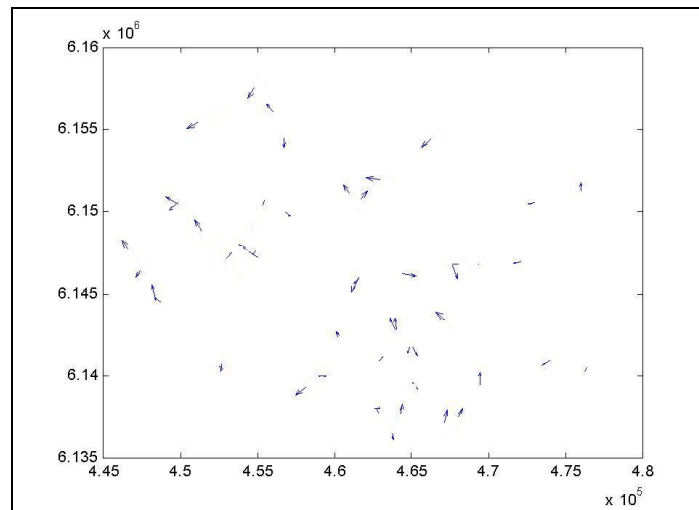
Conclusiones

De acuerdo a los datos estadísticos resultantes de este análisis, la cartografía base de la Intendencia Municipal de Montevideo, si bien no cumple con la escala publicada o formal (1:1000) , está dentro de los estándares para cartografías urbanas destinadas a soportar Sistemas

Catastrales, aplicaciones AM/FM y AVL. resultando además concordante con la escala real de producción cartográfica en el entorno de 1:5000.

Teniendo en cuenta que los vectores de discrepancias se encuentran en entornos de magnitud reducidos, le hemos aplicado a la cartografía una corrección y ajuste automatizado en ARCGIS 8.2 sobre la base de un algoritmo de interpolaciones lineales, ajustes por mínimos cuadrados y Krigging ,desarrollado en conjunto entre el Instituto de Agrimensura y el Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería..

Esta metodología ya había sido testeada en conjuntos de datos reducidos y en escalas del orden de 1:50000, pero no en cartografías urbanas o de gran escala.



-Fig 4 -Vectores de desplazamiento luego del ajuste -

En la figura de arriba se aprecia cómo los vectores en general se han reducido , lo que garantiza una mejor calidad posicional de la cartografía.

Los resultados han sido muy satisfactorios, logrando reducir el entorno de error de 4 metros a casi la mitad, 2.33 metros para el 95 % de los casos.

Esta metodología de ajuste cartográfico, tiene la virtud de no considerar el espacio de trabajo uniforme ,sino que antes de nada mapea las divergencias y correlaciones, para así desarrollar ajustes diferenciales en zonas que no poseen el mismo grado de inexactitud.

Referencias.

F.Barbato “Modelling Errors and Accuracy in Cartography Base of Geographic Information Systems (GIS) (2001) First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS.Swiss Federla Institute of Technology ,ETH-Zurich.

ISBN 3-906467-29-5

Fan, Huaan. (1997). Theory of Errors, K.T.H.-ISBN 91-7170-200-8

Mikhail, E.M., and Gracie,G. (1981).Analysis and Adjustment of Survey Measurements.Van Nostrand Reinhold, New York.

Sjöberg Lars (1983).Unbiased Estimation of Variance-Covariance Components in Condition Adjustment with Unknowns-A MINQUE approach ZFV ,108.

Sevilla M.J. (1996). Criterios de Precisión Cartográfica, Monografía,Topografía y Geodesia,España.

Casparly W. And Joos G.(1998).Statistical Quality Control of Geodata, International Symposium on Spatial Data Quality, Hong Kong.

Burrough,P.A. (1986). Principles of Geographyc Information Systems for Land Resources Assesment, Claredon Press,Oxford.

Lembo,J. And Hopkins P. (1998). The use of Adjustment Computations in Geographic Information Systems for Improving the Positional Accuracy for Vector Data, S& LIS, Vol 58 No.4.

Goodchild M.F. (1998) Measurements Based GIS, University of California. International Symposium on Spatial Data Quality, Hong Kong..

Qingmin G. and Zhang J. (1998) Least Squares Estimation and Biased Estimation for Variance – Covariance Components, Geomatics Research of Australia No.68

Zhang B. (1992). Optimizing GIS Selection From Accuracy Perspective. Australian JWG.No.57

Wang R. (1993). Theoretical Capacity and Limitation of Localizing Gross Error by Robust Adjustment,RISM China.

F.G.D.C. National Spatial Data Infrastructure (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards 007-1-1998.

Chrzanowsky A.,Saastamoinen J., (1979). Urban Cartography.Springer Verlag.

Hsu D. (1998) Spatial Error Analysis .IEEE Press.ISBN 0-7803-3453-1

Wolf R. & Ghilani C. .(1996).Adjustment Computations.John Wiley.ISBN 0-471-16833-5.

Strang G. and Borre K. (1997). Linear Algebra,Geodesy and G.P.S., Wellesley Cambridge Press, Esri Inc. ArcInfo Manuals,and ArcView Topology and Map Projections.