

# Determinación de Algoritmos de Precisión Cartográfica en G.I.S. Orientados a Sistemas Catastrales Multifinalitarios

Surv.Eng. M.Sc. Fabián D.Barbato

Universidad de la República UDELAR Facultad de Ingeniería  
J.Herrera y Reissig 565  
Montevideo-Uruguay  
+5982 7110395  
CEP Cidade Estado  
✉ fbarbato@fing.edu.uy

| Conteúdo |  |
|----------|--|
|          | 1. Introducción  |
|          | 2. Estimadores utilizados en geomática                   |
|          | 2.1 Detección de Errores Groseros y Errores Sistemáticos |
|          | 2.2 Estimadores Robustos                                 |
|          | 2.2.1 Regression Diagnostics                             |
|          | 2.2.2 Test iterativo de grandes residuales (G.R.I.T.)    |
|          | 3. Control de Calidad Cartográfica                       |
|          | 3.1 Componentes de Precisión Geométrica (PG)             |
|          | 4. Algoritmo de Control de Calidad de un Mapa            |
|          | 5. Aplicación del Algoritmo en Cartografía del Uruguay   |
|          | 5.1 Datos Base para el Algoritmo                         |
|          | 5.2 Puntos de Control GPS                                |
|          | 5.3 Tratamiento de las Observaciones                     |
|          | 5.4 Procesamiento de Datos                               |
|          | 5.5 Resultados de la aplicación del QCGIS.               |
|          | 5.6 Graficación de los Vectores Deformación              |
|          | 6. Conclusiones  |
|          | 7. Referencias Bibliográficas                            |

**Resumen :** La utilización de mapas ha sido una actividad esencial 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. Actualmente, un mapa o carta forman parte del concepto integral 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 Catastral 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 en VB específico para el control de calidad de un mapa, orientado a la determinación de las precisiones geométricas y topológicas, basado en conceptos de testeos 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 base del diversos GIS operativos en Uruguay, incluyendo toma de puntos con GPS , y varias fuentes de cartografía digital de comparación para la extracción de coordenadas de entidades puntuales y lineales. Las observaciones involucradas en el estudio, han sido sometidas a un tratamiento de depuración a través de tests estadísticos y estimadores robustos.

**Palabras clave :** cartografía, Catastro Multiproposito, G.I.S., geomática, errores, parámetros de calidad, precisión, testeo, topología, estimadores robustos.

## 1. Introducción

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 la 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.

## 2. Estimadores utilizados en geomática

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 y parámetros, 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**).

Sea  $X$  una variable aleatoria discreta o continua cuya función de probabilidad o de densidad es  $(f)$ , y cuyo dominio sea un espacio muestral dado. Una muestra de tamaño  $(n)$  significa un conjunto  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  valores de  $X$ . Para que dicha muestra sea "útil" o representativa del universo, debemos tomarla al azar con la función probabilidad o densidad  $(f)$ .

Esto significa :

- a. cada uno de los valores  $x_i$  puede considerarse como un valor de una nueva variable aleatoria  $X_i$  que tiene la misma función  $(f)$  que  $X$ .

$$\Rightarrow E(X_i) = E(X_2) = \dots = E(X_n) \quad \sigma^2(X_i) = \sigma^2(X_2) \dots \forall i = 1 \dots n.$$

- b. las variables aleatorias  $X_i$  son independientes o no están correlacionadas.

El problema de elegir adecuadamente las muestras, cumpliendo con las condiciones a y b, no resulta un trabajo fácil. De esa muestra de tamaño  $n$ , obtendremos una "media muestral" ( $\bar{X}$ ) y una "varianza muestral" ( $S^2$ ), que deberán representar al resto del universo total de los infinitos valores que podría tomar  $X$ . Las muestras dan origen a las variables aleatorias  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  cuyos valores son precisamente los valores de la muestra.

Toda función de estas variables que no dependa de parámetros desconocidos, se denomina **Estadístico**. Cuando uno de estos estadísticos se utiliza para "estimar" el valor de algún rasgo de la población, pasa a denominarse **Estimador** de esa característica. Desde que el estimador es un estadístico, también es una variable aleatoria.

Supongamos una función densidad o probabilidad que dependa de un parámetro  $\theta \Rightarrow f(x, \theta)$ . El problema de la estimación de parámetros consiste en deducir con cierta probabilidad, el valor de  $\theta$  a partir de muestras tomadas en la población. El método de la "estimación puntual" consiste en elegir una función de los datos de la muestra cuyo valor, con cierta probabilidad, pueda tomarse como valor de  $\theta$ . La función elegida es un **estadístico**, llamado más precisamente **estimador de  $\theta$** .

El método de "estimación por intervalos", consiste en cambio, en deducir, a partir de la muestra, un intervalo en el cual debe encontrarse con cierta probabilidad, el valor de  $\theta$ .

### 2.1 Detección de Errores Groseros y Errores Sistemáticos

Clasificamos los errores, en errores aleatorios, errores sistemáticos y errores groseros ("outliers" o "blunders"). Estimadores óptimos y diversas técnicas de ajuste de observaciones, están pensados y diseñados bajo el supuesto que las observaciones contienen exclusivamente errores aleatorios o estocásticos.

Matemáticamente, los errores sistemáticos se comportan como diversas clases de desvíos, haciendo que la "esperanza matemática" de la medida del error sea diferente a cero.

En el campo de las mediciones topográficas y geodésicas, los errores sistemáticos se originan normalmente en malas calibraciones del instrumental a ser utilizado, efectos ambientales, ecuaciones personales del observador, etc. La forma más confiable de detección de la existencia de errores sistemáticos, es a través de la realización de tests estadísticos y la aplicación de estimadores robustos.

Por errores groseros, matemáticamente se entienden a aquellos errores aleatorios que resultan 3 a 20 veces más grandes que los errores estándares esperados, en función de tolerancias y precisiones pre-establecidas.

Todas las formas de prevenir la ocurrencia de equivocaciones, resultan insuficientes para descartar la existencia de errores groseros, en especial en muestreos de gran cantidad de observaciones. Uno de los problemas de gran importancia en la teoría probabilística y estadística, es la detección a posteriori de los trabajos de observación, de errores groseros mediante el análisis de los residuales.

El modelamiento de los errores observacionales y el conocimiento de sus comportamientos, permite establecer las pautas de procedimiento para la detección de errores no-aleatorios.

1. Partimos de la base que los errores observacionales son errores aleatorios con una distribución específica asociada; esta es la hipótesis  $H_0$ . La hipótesis alternativa  $H_1$  es simplemente que los errores no sean aleatorios de acuerdo a una distribución asociada.
2. Se pueden construir cantidades o variables derivadas que posean la misma distribución, de acuerdo a la condición anterior.
3. Por último, se testean los valores computados de los estadísticos anteriores (muestrales), contra los valores teóricos críticos para un cierto nivel de significancia o "riesgo"  $\alpha$ .

Si el testeo de la hipótesis es aprobado, podemos asumir definitivamente el punto (a). De lo contrario, debemos sospechar la existencia de errores groseros en el conjunto de datos observacionales.

Este testeo se puede aplicar directamente sobre las observaciones o después de un ajuste preliminar por Mínimos Cuadrados.

### 2.2 Estimadores Robustos

Los estimadores robustos son estimadores que resultan insensibles a las limitadas variaciones de la función distribución, por ejemplo, en el caso de ocurrencia de errores groseros.

Este tipo de estimadores se basan en otras técnicas o modelos diferentes al principio de los Mínimos Cuadrados.

Este tema se ha convertido esencial en toda el área de estudio de controles de calidad de datos geográficos, y así lo demuestra el incremento y variedad de artículos que hoy se publican referidos al tema.

### 2.2.1 Regression Diagnostics

Uno de los estimadores robustos analizados es el "Regression Diagnostics".

El método de "Regression Diagnostic" supone un ajuste preliminar por Mínimos Cuadrados y el proceso es el siguiente:

- se determina inicialmente un ajuste por mínimos cuadrados de la totalidad de los datos.
- se computa el residual para cada observación
- se rechazan todas aquellas observaciones que no cumplen con la mínima condición.
- se determina un nuevo ajuste con las observaciones remanentes.

Claramente, el éxito de este procedimiento depende de la calidad del ajuste inicial, y no garantiza un correcto modelamiento, pero al igual que el GRIT, este procedimiento trabaja muy bien con un moderado porcentaje de errores groseros.

### 2.2.2 Test iterativo de grandes residuales (G.R.I.T.)

Una variación a la técnica anterior (2.2.1) y al estimador robusto "Regression Diagnostics", es el "G.R.I.T." (F.Barbato,1998) ,muy eficiente en conjuntos de datos de ( $n \approx 30$ ) como aproximación de primer orden.

La idea central de este test es, a partir del cálculo de los residuales [ $V_i = L_i - \bar{X}$ ], ordenarlos de mayor a menor por orden de magnitud absoluta.

Este modelo presupone la existencia de pocos errores groseros ( $\leq 3\%$ ).

Antes de determinar los residuales es necesario la identificación y eliminación inmediata de equivocaciones que impliquen por ejemplo, la variación de un orden mayor o menor de la potencia en  $10^i$  de las medidas. Esto permitirá que el cálculo de la media inicial no luzca seriamente deformada.

Se toma el mayor ( $V_f$ ), y se controla que su residual no exceda un cierto valor de tolerancia ( $\psi_f$ ) de acuerdo a condiciones pre-establecidas, instrumental, metodología utilizada, etc. En nuestro caso, donde el testeo se realiza tomando como variable aleatoria las diferencias entre las coordenadas determinadas en campo con las extraídas por distintos procedimientos desde soportes cartográficos,  $\psi_f$  será determinada como una función de la escala (e) de representación gráfica de la carta  $\psi_f = F(e)$  en caso de soportes duros, y función de la resolución (r) o tamaño del pixel, en caso de soporte digital  $\psi_f = F(r)$ .

Se elimina del conjunto de datos la medición correspondiente a ese residual, y se recalculan los residuales con la nueva media, manteniendo el criterio de establecer una tolerancia, pero para los sucesivos casos, se establece un coeficiente de amortiguación entre un 10% al 20%. Esto busca aprovechar al máximo las escasas observaciones con que contamos, dejando para un próximo paso, la determinación de la consistencia del conjunto con la distribución normal.

Clasificaremos como "nuevo sospechoso" de error grosero a aquel residual que se aparte más allá de  $[1.20 \cdot \psi_f]$ . El factor (1.20) tiene como objetivo crear un intervalo de amortiguación a fin de adaptarse a muestreos de  $n < 30$ , donde la eliminación de observaciones puede degradar en forma sensible las propiedades de la función  $[f(x)]$  de densidad de distribución asociada.

Experimentalmente se ha comprobado que eliminado el mayor error grosero, el modelo se vuelve "extremadamente severo" con los "outliers" remanentes.

Esta iteración se realiza hasta tanto la cantidad de errores groseros no supere el límite pre-establecido, lo cual significaría en los hechos que los errores groseros cometidos estarían vinculados a desórdenes o variaciones "anormales" en la medición, siendo necesario entonces revisar y realizar de nuevo el proceso de medición.

En resumen, el estimador GRIT implica:

- [ $V_i = L_i - \bar{X}$ ] ordenados de mayor a menor
- descarte de mediciones que difieran en  $n > 10^i$  ( $i \geq 1$ )
- determinación de  $\psi_f$
- descarte de mediciones  $V_f$  que no cumplan la condición
- re-cálculo de los valores

Para completar el procedimiento, luego de realizadas las depuraciones aceptadas por el proceso GRIT, estamos en condiciones de realizar el test correspondiente a la verificación de sistematismos y control de la distribución, asociados a los errores groseros de "borde", aquellos cuya determinación no resulta tan clara o definitiva.

Partiendo de estos cinco tests, alcanza con que nuestro muestreo sea rechazado tan solo por una de las técnicas, para que nos dispongamos a revisar los valores de medición.

## 3. Control de Calidad Cartográfica

Uno de los aspectos fundamentales en el estudio de implementación de un GIS, es conocer el estado, calidad y exactitud de la información que alimentará el sistema. Una de esas bases de datos primordiales o básicas es la cartográfica. Para conocer si la cartografía disponible y/o a crear es adecuada para los objetivos del sistema, es necesario estudiarla en dos aspectos: el **Geométrico** y el **Topológico de Objetos**

El caso más frecuente que se presenta, es de disponer a priori una cartografía existente ya generada por nuestra institución, o una base cartográfica adquirida externamente.

Dado los altos costos de generación de nuevas bases cartográficas, y el rápido acceso a otras bases pre-existentes, será necesario fundamentar correctamente desde el punto de vista técnico, la conveniencia o no de implementar un GIS a partir de esta cartografía, tomando en cuenta hacia qué aplicaciones u objetivos estará orientado nuestro GIS. Dejando de lado los aspectos temáticos, centraremos nuestro análisis en las precisiones y exactitudes tanto geométricas como topológicas.

Un Sistema Catastral Multifinanciado, exige precisiones cartográficas que hagan posible la utilización de mediciones métricas (longitudes, áreas y coordenadas), localización de objetos administrados en AM/FM y mantenimiento de la geometría parcelaria, con exactitudes de acuerdo a los estándares internacionales que normalizan el desarrollo de estos sistemas.

Definimos **precisión geométrica (PG)** al parámetro asociado a una distribución (N), que exprese en forma consistente las discrepancias, con un cierto grado de confiabilidad asociado, entre las posiciones de los objetos (puntos, arcos, polígonos y regiones) extraídas de la cartografía tanto en soporte rígido como en digital, y las posiciones de las entidades en el "real world", determinadas a partir de operaciones geodésicas de campo, en particular, utilizando la tecnología G.P.S. diferencial.

Este PG, tiene dos componentes:

- la *PG absoluta (PGa)*, asociada a parámetros y estimadores estándar ( $\sigma$ ) de la teoría matemática
- la *PG relativa (PGr)*, resultante de una combinación entre la PGa, las covarianzas y correlaciones, y la escala de diseño de la carta.

Es necesario recordar, que para establecer a priori la estimación de los intervalos razonables de aceptación o rechazo, la escala y los procedimientos de confección y/o de conversión o captura digital serán los patrones claves en todo este proceso.

La **precisión o calidad topológica de objetos (PT)**, a diferencia de la PG, será determinado exclusivamente a partir de cartografía digital, en razón de ser una función y condición esencial de los GIS, además de no tener sentido práctico evaluarla en soporte duro. Este parámetro (PT), deberá describir con claridad el margen aceptable de "conflictos topológicos", tolerancias y sus errores asociados, presentes en una cartografía soporte de cualquier GIS.

Tanto la PG como la PT, se definirán porcentualmente en función de la calidad que se obtenga, previo testeo de la aceptación o rechazo de la cartografía en cuestión.

Supongamos que la desviación estándar óptima estimada para la cartografía sometida a prueba es  $\sigma_{\pi}$ , y la que realmente se deriva de las condiciones de la cartografía existente es  $\sigma_c \Rightarrow$

Calculamos el coeficiente  $PG = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_{\pi}} \right)^{-1}$ ;

Si este coeficiente es igual a uno, entonces la cartografía, desde el punto de vista geométrico se encuentra en el mejor estado posible de acuerdo a la precisión óptima determinada. Para  $PG < 1$ , resultará en factores que expresarán numéricamente el grado ponderado de calidad geométrica (0.75, 0.50, 0.66, 0.10, etc). En el caso de la PT, la forma de cuantificarla está dada por el grado de errores que tiene la cartografía base a nivel de entidades estructurales y objetos (caminería, hidrografía, centros poblados). Obviamente resulta difícil establecer una única manera de calcular PT, en razón del interés particular de uso al cual se le asignará la cartografía.

A modo de ejemplo, en el layer o cover que contiene vías de comunicación como carreteras y caminos, se puede establecer el grado de calidad topológica calculando el cociente entre la cantidad de pseudo-nodos y aquellos que se convierten en dangles u "overshoots", luego de un tratamiento topológico adecuado a tolerancias acordadas mediante un software de GIS apropiado

$$\Rightarrow PT = 1 - \frac{N^{\circ} \text{ Sucesos Negativos}}{N^{\circ} \text{ Sucesos Evaluados}}$$

Existen otras manera de cuantificar la calidad cartográfica desde el punto de vista topológico de objetos, cuando integramos diversos "niveles" de información.

Si tomamos a modo de ejemplo, la cobertura de *caminería* y la correspondiente a *edificaciones*, será necesario establecer controles topológicos de integración vertical y evaluarlos, como que un camino (arc) no intersecte un polígono correspondiente a una edificación (poly), o que un puente no se corresponda exactamente con la ruta a la que pertenece, o que una vía férrea no atraviese una zona de aguas sin que existan puentes o similares, etc, etc.

Esta forma de controlar las relaciones entre los objetos, requiere de un modelo y geocodificación inteligente de objetos, tendencia actual de las nuevas generaciones de software GIS (ESRI Arcinfo 8). En estos casos, es posible aplicar también relaciones de cocientes entre sucesos negativos y el universo de eventos considerados. De poder calcularse diversos PT en función de la cantidad de niveles de información y sus vínculos topológicos combinados, será necesario establecer un promedio de los PT's considerados, pudiendo eventualmente ponderarse con diversos pesos en función a los usos a asignarle al GIS.

Normalmente se toma como correcta la PT si los valores son mayores al 95%. De lo previo resulta que el grado óptimo de calidad ocurre en el caso de  $PG = 1$  y  $PT = 1$ .

La combinación de PG y PT, generará un nuevo parámetro que denominamos **CCBG** (*calidad de cartografía base de GIS*) descriptor de la calidad integral de una cartografía base de un GIS. De acuerdo a lo anterior, el *parámetro de calidad de cartografía base de GIS (CCBG)* de una carta está dado por =

$$CCBG = [PG * PT] \quad (1)$$

Este parámetro, permite reflejar con claridad, la combinación de calidades tanto geométricas como topológicas. No alcanzará con un PG de 0.85, si el PT es del orden de 0.25, ya que obtendremos un  $CCBG = 0.2125$ , notoriamente insuficiente.

Será necesario, a partir del cálculo del CCBG, establecer las tolerancias e intervalos para la clasificación de la cartografía en BUENA-SUFICIENTE-DEFICIENTE como soporte básico en la implementación de un GIS.

### 3.1 Componentes de Precisión Geométrica (PG)

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.

Este punto lo desarrollaremos en amplitud ya que es parte medular de este trabajo. 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 ( $\sigma_0$ ).

Por último será necesario calcular qué condiciones mínimas de precisión cumple el mapa. Entonces, dada una carta 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.

## 4. Algoritmo de Control de Calidad 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.

1. Control de sistematismos.
2. De no existir sistematismos o corregidos los mismos, aceptación o rechazo de los parámetros de precisión calculados contra los teóricos emanados de las distribuciones.
3. 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 Catastral Multifinalitario.

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.

En virtud de 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 ( $\text{prean} = T/3$ ).

- 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.

$X^m \rightarrow$  mapa.

$X^z \rightarrow$  terreno ("real world")

## (2) Cálculo de la nueva variable aleatoria estandarizada e Intervalos de Confianza.

$$\sum \Delta X = X^m - X^z \quad (2)$$

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta X_i \quad (3)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{\Delta \bar{X} \cdot \sqrt{n}}{\sigma_0} \quad (5)$$

$$\text{Tomando } P \text{ (confianza)} = 95 \% \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0.05 \\ C = 0.95 \\ \alpha + C = 1.00 \end{cases}$$

## (3) Testeo de Sistematismos y Distribución.

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} |z_0| \leq z(2 \cdot P(z) - 1) \\ |T_0| \leq T(2 \cdot T(t) - 1) \end{array} \right\} \rightarrow \text{No hay sistematismos}$$

## (4) Testeo de Precisiones Horizontales.

Para la precisión  $\rightarrow$  Testeo de Varianzas  $\rightarrow$ , definido:

$$i_0^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \quad (6)$$

$$\text{Si } i_0^2 \leq i_{n-1,1-\alpha}^2 \rightarrow \text{Test de Precisión aceptado.}$$

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

$$\sigma_{x \leftrightarrow y} = 2.4477 * 0.5 * (\sigma_x + \sigma_y) \quad (7)$$

## 5. Aplicación del Algoritmo en Cartografía del Uruguay

Uno de los objetivos principales de este trabajo, es la aplicación y evaluación de este algoritmo y todas sus consideraciones a ejemplos concretos de Cartografía Base de GIS operativos en el Uruguay.

Este proyecto, toma como base la cartografía escala 1:50000 confeccionada en soporte duro por el Servicio Geográfico Militar del Uruguay, abarcando la totalidad del territorio nacional.

### 5.1 Datos Base para el Algoritmo

De acuerdo a consideraciones muestrales y de volumen de datos disponibles y representativos, se seleccionó la lámina K27 Santa Lucía, escala 1.50000, como modelo de evaluación.

De ahora en adelante consideraremos que nuestro universo de testeo se reduce a la carta de referencia.

Esta aclaración es válida para no extrapolar resultados al resto del conjunto de las cartas, ya que los procedimientos y fechas de realización difieren entre sí.

Disponemos para ello de los siguientes materiales base:

- Soporte duro (papel) original de la carta.
- Soporte digital vectorial producido mediante la digitalización en tableta , con sistemas CAD.
- Soporte digital raster de la imagen escaneada a 300 d.p.i. y georreferenciada con 9 puntos de control con sistemas CAD.
- Soporte digital vectorial producido mediante vectorización de la imagen raster.
- Soporte digital de entidades vectoriales tratadas topológicamente en GIS.
- Archivo de (33) puntos de control tomados con GPS diferencial.

La aplicación del algoritmo supone antes de nada evaluar la cartografía base, en este caso, el soporte papel (PAP). Esta lámina papel es la fuente de generación del resto de los archivos digitales.

Las bases digitales serán utilizados como control de inconsistencias y errores groseros, al tiempo que permitirán evaluar las calidades entre los soportes digitales y los puntos de control levantados en campo con GPS diferencial.

Debido a que la captura de datos originados en la imagen raster, tanto a nivel de Shapefiles como directamente de la imagen están influenciados por los mismo errores base originados en la geo-referenciación, la comparación entre ellos servirá como evaluación de la calidad de la vectorización y los procesos topológicos dentro del GIS.

En la figura N°1 siguiente se puede apreciar la distribución de los puntos de control, y la red básica de la caminería como elemento estructurador de la cartografía base.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la captura de datos mediante la vectorización de una imagen raster geo-referenciada, propaga errores originados en la misma geo-referenciación.

Teniendo en cuenta que los residuales remanentes se encuentran en los entornos de un pixel, para nuestro caso 1 pixel= 5 metros, esta precisión es lo suficientemente adecuada si la comparamos con la escala de producción de la carta.(1mm. Carta = 50 m. Terreno)

En la página siguiente podemos apreciar parte de los datos base de nuestro trabajo, los SHP producidos en la vectorización, archivos de digitalización en tableta desde el soporte duro, y una visualización general del archivo completo SHP con los puntos GPS colectados en campo.

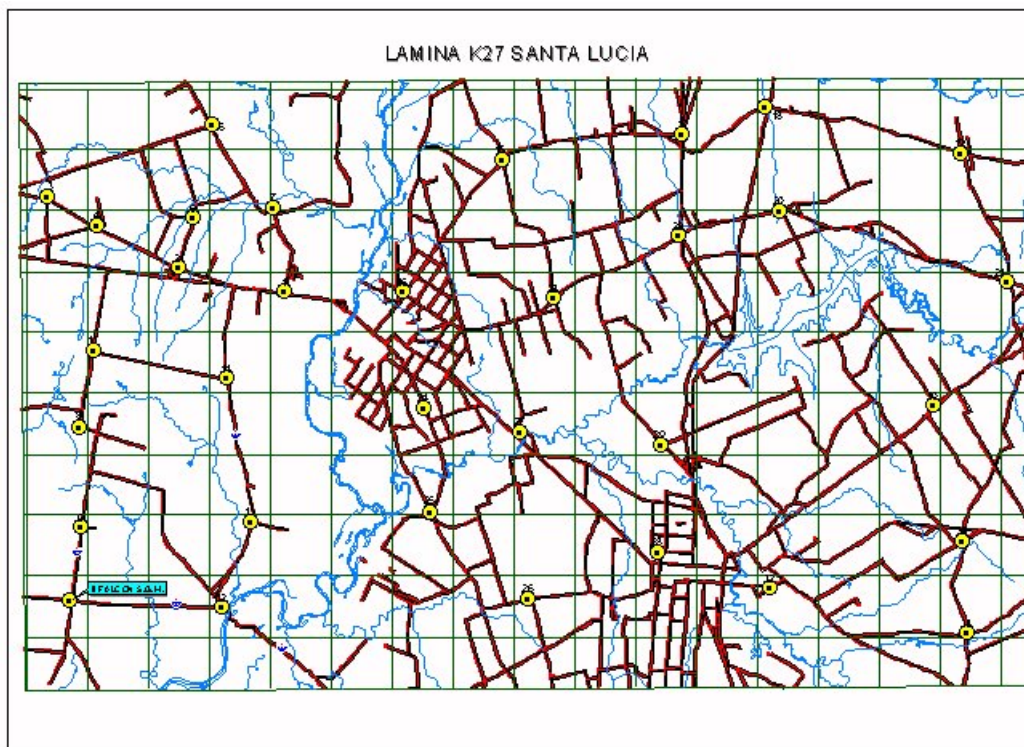


Fig. 1: Distribución de Puntos en SHP

## 5.2 Puntos de Control GPS

Para el levantamiento de los puntos de control, se diseñó una red de puntos que cumpliera con los estándares correspondientes a la FGDC.

Debido a que la caminería constituye un elemento estructurador de la cartografía , los puntos de control se seleccionaron mayormente como intersecciones de caminos bien definidas.

La precisión horizontal resultante fue menor a 1.13m. para el 95% de intervalo de confiabilidad, habiéndose realizado un promedio de 80 posiciones tomadas a razón de 1p./s.

En esta tabla se muestra las coordenadas de los puntos de control GPS calculados en el sistema ROU-USAMS, datum Yacaré ,lo que garantiza la coherencia de los sistemas de control con los cartográficos base del estudio.

**Tabla 1 : Coordenadas de Puntos de Control / GPS**

| <i>Punto</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> |
|--------------|----------|----------|
| 1            | 442470   | 6189294  |
| 2            | 438977   | 6190071  |
| 3            | 434665   | 6192392  |
| 4            | 436294   | 6191479  |
| 5            | 439482   | 6191722  |
| 6            | 440085   | 6194782  |
| 7            | 442069   | 6192025  |
| 8            | 435741   | 6184867  |
| 9            | 435793   | 6181566  |
| 10           | 435414   | 6179126  |
| 11           | 436177   | 6187373  |
| 12           | 440415   | 6178916  |
| 13           | 441374   | 6181735  |
| 14           | 440576   | 6186462  |
| 15           | 446348   | 6189269  |
| 16           | 449602   | 6193646  |
| 17           | 455523   | 6194460  |
| 18           | 458264   | 6195369  |
| 19           | 464671   | 6193841  |
| 20           | 458718   | 6191954  |
| 21           | 466205   | 6189625  |
| 22           | 455417   | 6191153  |
| 23           | 451291   | 6189096  |
| 24           | 447053   | 6185460  |
| 25           | 447253   | 6182070  |
| 26           | 450468   | 6179202  |
| 27           | 450193   | 6184680  |
| 28           | 454715   | 6180730  |
| 29           | 454803   | 6184283  |
| 30           | 463768   | 6185555  |
| 31           | 464712   | 6181115  |
| 32           | 458412   | 6179560  |
| 33           | 464888   | 6178079  |

La tabla contiene lo que consideraremos como coordenadas "verdaderas" y servirán como fuente del testeo contra las tablas de coordenadas generadas desde diversos soportes cartográficos, en especial aquellas extraídas desde el soporte papel.

En las tablas siguientes podemos visualizar las diferentes coordenadas que resultan de la captura desde diversos soportes de la misma cartografía.

### **5.3 Tratamiento de las Observaciones**

**Coordenadas de los Puntos capturados desde:**

(PAP)

(SHP)

| Punto | X      | Y       |
|-------|--------|---------|
| 1     | 442500 | 6189220 |
| 2     | 438975 | 6190075 |
| 3     | 434640 | 6192360 |
| 4     | 436220 | 6191450 |
| 5     | 439460 | 6191650 |
| 6     | 440090 | 6194775 |
| 7     | 442100 | 6192025 |
| 8     | 435730 | 6184900 |
| 9     | 435800 | 6181500 |
| 10    | 435480 | 6179170 |
| 11    | 436160 | 6187355 |
| 12    | 440400 | 6178960 |
| 13    | 441360 | 6181710 |
| 14    | 440550 | 6186440 |
| 15    | 446410 | 6189220 |
| 16    | 449625 | 6193650 |
| 17    | 455590 | 6194500 |
| 18    | 458355 | 6195375 |
| 19    | 464750 | 6193840 |
| 20    | 458825 | 6192005 |
| 21    | 466270 | 6189625 |
| 22    | 455450 | 6191170 |
| 23    | 451340 | 6189100 |
| 24    | 447125 | 6185440 |
| 25    | 447310 | 6182075 |
| 26    | 450590 | 6179215 |
| 27    | 450250 | 6184660 |
| 28    | 454825 | 6180750 |
| 29    | 454910 | 6184310 |
| 30    | 463825 | 6185560 |
| 31    | 464790 | 6181190 |
| 32    | 458540 | 6179625 |
| 33    | 464940 | 6178100 |

| Punto | X      | Y       |
|-------|--------|---------|
| 1     | 442498 | 6189261 |
| 2     | 438981 | 6190068 |
| 3     | 434640 | 6192371 |
| 4     | 436222 | 6191463 |
| 5     | 439479 | 6191659 |
| 6     | 440090 | 6194779 |
| 7     | 442108 | 6192007 |
| 8     | 435742 | 6184914 |
| 9     | 435810 | 6181538 |
| 10    | 435408 | 6179108 |
| 11    | 436156 | 6187369 |
| 12    | 440414 | 6178954 |
| 13    | 441380 | 6181720 |
| 14    | 440573 | 6186437 |
| 15    | 446401 | 6189226 |
| 16    | 449629 | 6193662 |
| 17    | 455596 | 6194502 |
| 18    | 458362 | 6195394 |
| 19    | 464758 | 6193869 |
| 20    | 458810 | 6192010 |
| 21    | 466262 | 6189641 |
| 22    | 455466 | 6191195 |
| 23    | 451349 | 6189099 |
| 24    | 447107 | 6185450 |
| 25    | 447301 | 6182054 |
| 26    | 450581 | 6179224 |
| 27    | 450266 | 6184670 |
| 28    | 454831 | 6180750 |
| 29    | 454907 | 6184317 |
| 30    | 463846 | 6185586 |
| 31    | 464808 | 6181174 |
| 32    | 458547 | 6179621 |
| 33    | 464924 | 6178098 |

**Tabla 2** - Coordenadas Carta Papel

**Tabla 3** - Coordenadas Shapefile

La tabla correspondiente a SHP lleva consigo correcciones topológicas generadas en el procesamiento con software de GIS.

Teniendo en cuenta que las tolerancias aceptadas para corrección automática de errores nodales fue de 10.00 metros (< Tolerancia) , y en virtud de las precisiones generales del trabajo, éstas no afectarán el cálculo relativo a la calidad geométrica del mapa.

De acuerdo al desarrollo teórico propuesto más arriba, la nueva variable aleatoria que definimos para el testeo es la diferencia de coordenadas.

De todos los grupos de datos ,los únicos que tienen correlación nula es el GPS y PAP.

El resto tienen una fuerte correlación debido a que se originan de una forma u otra del mismo soporte papel (PAP).

Esto permite la detección de errores groseros o equivocaciones, mediante la comparación de grupos de datos correlacionados;este fue uno de los motivos de trabajar con varios grupos de datos correlacionados.

La alternativa a este procedimiento es la repetición de series de medición.

| Punto | Diferencia GPS-PAP |     | Diferencia GPS-IMAGEN |     | Diferencia GPS-DWG |     | Diferencia GPS-SHP |     |
|-------|--------------------|-----|-----------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|
|       | X                  | Y   | X                     | Y   | X                  | Y   | X                  | Y   |
| 1     | -30                | 74  | -27                   | 35  | -26                | 7   | -28                | 33  |
| 2     | 2                  | -4  | -6                    | 4   | 0                  | -41 | -4                 | 3   |
| 3     | 25                 | 32  | 22                    | 22  | 2                  | -20 | 25                 | 21  |
| 4     | 74                 | 29  | 74                    | 13  | 94                 | -10 | 72                 | 16  |
| 5     | 22                 | 72  | 2                     | 67  | -2                 | 56  | 3                  | 63  |
| 6     | -5                 | 7   | -2                    | 1   | -43                | -36 | -5                 | 3   |
| 7     | -31                | 0   | -58                   | 17  | -60                | -7  | -39                | 18  |
| 8     | 11                 | -33 | -1                    | -48 | 2                  | -67 | -1                 | -47 |
| 9     | -7                 | 66  | -18                   | 25  | -37                | 19  | -17                | 28  |
| 10    | -66                | -44 | -61                   | -58 | -60                | -70 | 6                  | 18  |
| 11    | 17                 | 18  | 20                    | 6   | 3                  | 0   | 21                 | 4   |
| 12    | 15                 | -44 | 1                     | -43 | -1                 | -39 | 1                  | -38 |
| 13    | 14                 | 25  | -11                   | 14  | 2                  | -11 | -6                 | 15  |
| 14    | 26                 | 22  | 4                     | 28  | 18                 | 10  | 3                  | 25  |
| 15    | -62                | 49  | -54                   | 41  | -26                | 11  | -53                | 43  |
| 16    | -23                | -4  | -25                   | -11 | -26                | 4   | -27                | -16 |
| 17    | -67                | -40 | -69                   | -41 | -55                | -67 | -73                | -42 |
| 18    | -91                | -6  | -97                   | -26 | -81                | -30 | -98                | -25 |
| 19    | -79                | 1   | -89                   | -31 | -92                | -69 | -87                | -28 |
| 20    | -107               | -51 | -99                   | -55 | -84                | -74 | -92                | -56 |
| 21    | -65                | 0   | -54                   | -17 | -41                | -41 | -57                | -16 |
| 22    | -33                | -17 | -52                   | -41 | -46                | -44 | -49                | -42 |
| 23    | -49                | -4  | -62                   | -18 | -68                | -44 | -58                | -3  |
| 24    | -72                | 20  | -55                   | 14  | -52                | 32  | -54                | 10  |
| 25    | -57                | -5  | -48                   | 15  | -45                | 16  | -48                | 16  |
| 26    | -122               | -13 | -118                  | -20 | -119               | -5  | -113               | -22 |
| 27    | -57                | 20  | -73                   | 9   | -64                | 8   | -73                | 10  |
| 28    | -110               | -20 | -121                  | -44 | -107               | -50 | -116               | -20 |
| 29    | -107               | -27 | -109                  | -35 | -100               | -38 | -104               | -34 |
| 30    | -57                | -5  | -79                   | -37 | -84                | -16 | -78                | -31 |
| 31    | -78                | -75 | -97                   | -64 | -91                | -28 | -96                | -59 |
| 32    | -128               | -65 | -126                  | -62 | -100               | -42 | -135               | -61 |
| 33    | -52                | -21 | -40                   | -23 | -46                | -28 | -36                | -19 |

**Tabla 4 :** Diferencias de Coordenadas

**Tabela 5 : Covarianzas**

| Calculo de Covarianzas_(coef. de correlación) |           |
|---|-----------|
| PAP-IMG                                       | 0.9715179 |
| PAP-DWG                                       | 0.9296184 |
| PAP-SHP                                       | 0.9384034 |

Esta forma de trabajar con sets de datos correlacionados permite, además del control de calidad de la cartografía base, la comparación de precisiones entre las distintas formas de captura digitales. No es adecuado inferir la ocurrencia de errores groseros a partir exclusivamente de las tablas de diferencias simples, siendo la razón principal, que esas diferencias son crudas y muestran las discrepancias tal cual; precisamente estas diferencias son las variables a testear.

La tabla que utilizamos para detectar errores groseros es la que contiene los cálculos de las "diferencias de las diferencias" →  $[\Delta\Delta X]$ .

Es decir, comparar las diferencias de coordenadas "originales" (GPS-PAP), contra las diferencias generadas entre GPS-IMG, GPS-SHP, GPS-DWG.

| Punto | DIF = GPSPAP- GPSIMG |     | DIF = GPSPAP-GPSPDWG |     | DIF = GPSPAP-GPSSHHP |     |
|-------|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|
|       | X                    | Y   | X                    | Y   | X                    | Y   |
| 1     | -3                   | 39  | -4                   | 67  | -2                   | 41  |
| 2     | 8                    | -8  | 2                    | 37  | 6                    | -7  |
| 3     | 3                    | 10  | 23                   | 52  | 0                    | 11  |
| 4     | 0                    | 16  | -20                  | 39  | 2                    | 13  |
| 5     | 20                   | 5   | 24                   | 16  | 19                   | 9   |
| 6     | -3                   | 6   | 38                   | 43  | 0                    | 4   |
| 7     | 27                   | -17 | 29                   | 7   | 8                    | -18 |
| 8     | 12                   | 15  | 9                    | 34  | 12                   | 14  |
| 9     | 11                   | 41  | 30                   | 47  | 10                   | 38  |
| 10    | -5                   | 14  | -6                   | 26  | -72                  | -62 |
| 11    | -3                   | 12  | 14                   | 18  | -4                   | 14  |
| 12    | 14                   | -1  | 16                   | -5  | 14                   | -6  |
| 13    | 25                   | 11  | 12                   | 36  | 20                   | 10  |
| 14    | 22                   | -6  | 8                    | 12  | 23                   | -3  |
| 15    | -8                   | 8   | -36                  | 38  | -9                   | 6   |
| 16    | 2                    | 7   | 3                    | -8  | 4                    | 12  |
| 17    | 2                    | 1   | -12                  | 27  | 6                    | 2   |
| 18    | 6                    | 20  | -10                  | 24  | 7                    | 19  |
| 19    | 10                   | 32  | 13                   | 70  | 8                    | 29  |
| 20    | -8                   | 4   | -23                  | 23  | -15                  | 5   |
| 21    | -11                  | 17  | -24                  | 41  | -8                   | 16  |
| 22    | 19                   | 24  | 13                   | 27  | 16                   | 25  |
| 23    | 13                   | 14  | 19                   | 40  | 9                    | -1  |
| 24    | -17                  | 6   | -20                  | -12 | -18                  | 10  |
| 25    | -9                   | -20 | -12                  | -21 | -9                   | -21 |
| 26    | -4                   | 7   | -3                   | -8  | -9                   | 9   |
| 27    | 16                   | 11  | 7                    | 12  | 16                   | 10  |
| 28    | 11                   | 24  | -3                   | 30  | 6                    | 0   |
| 29    | 2                    | 8   | -7                   | 11  | -3                   | 7   |
| 30    | 22                   | 32  | 27                   | 11  | 21                   | 26  |
| 31    | 19                   | -11 | 13                   | -47 | 18                   | -16 |
| 32    | -2                   | -3  | -28                  | -23 | 7                    | -4  |
| 33    | -12                  | 2   | -6                   | 7   | -16                  | -2  |

**Tabla 6** : Diferencias de diferencias

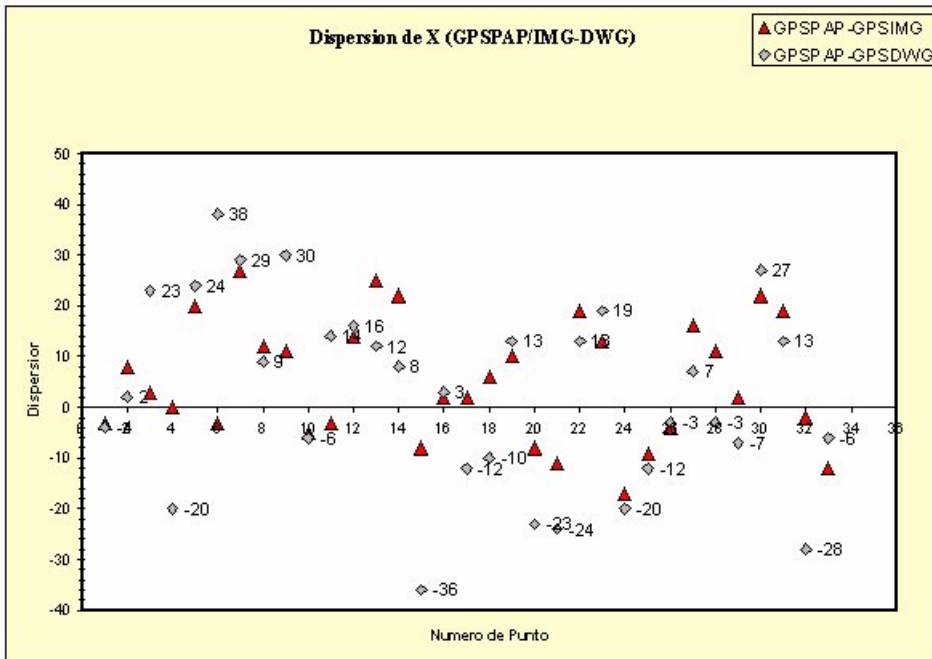
El cálculo de estas diferencias permite establecer rápidamente las discrepancias "sospechosas" entre un set de datos y otro.

La idea de este método es fijar como referencia las diferencias entre las coordenadas GPS y las PAP, que serán las que ingresen al algoritmo para control de la cartografía base, ( que en realidad deberían aceptarse tal cual son), siendo este dato la "materia prima" para el cálculo de la calidad de la carta o mapa.

Al tomar como referencia las diferencias entre GPS-PAP, las comparaciones permitirán determinar si en el cálculo de las diferencias que se utilizarán en el testeo, no se cometieron errores groseros o equivocaciones.

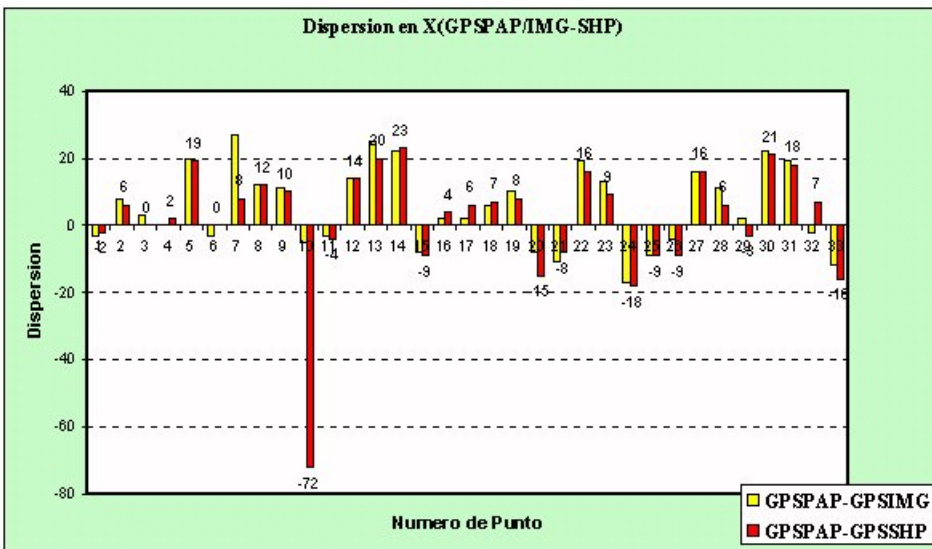
En definitiva esto opera en forma similar a realizar observaciones redundantes ( r ) para un mejor ajuste.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario controlar que la entidad capturada en campo sea la misma desde la cual se extraen las coordenadas desde el papel o soporte duro; de otra forma se podría sesgar el cálculo de la precisión o calidad cartográfica.



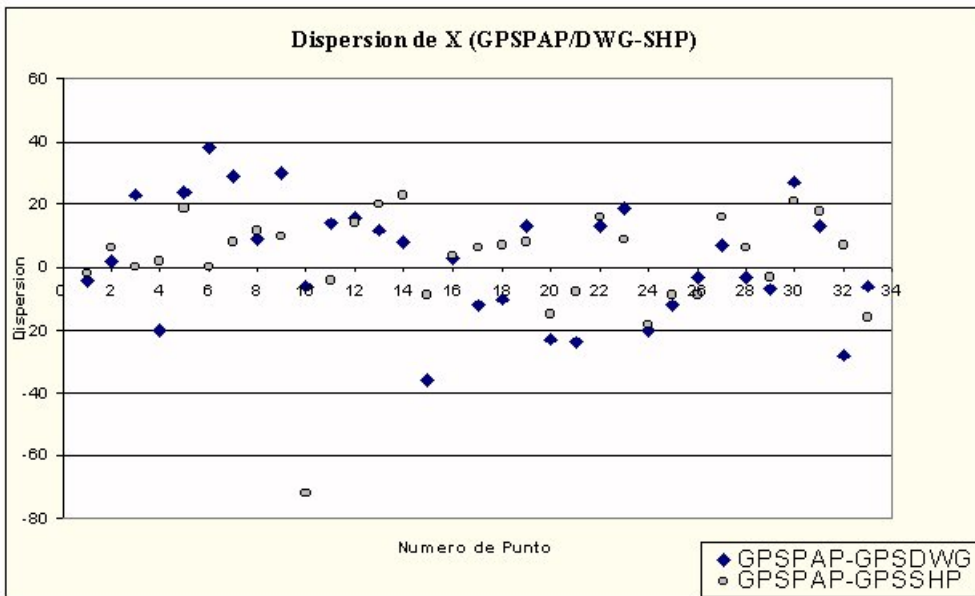
**Grafica 1 :** Dispersión de datos

El gráfico No.1 representa las diferencias encontradas entre las diferencias de coordenadas del formato papel (PAP) y las correspondientes a IMG y DWG. Según esta representación, no encontramos signos de discrepancias que indujeran a considerar un error grosero. Dicho de otra forma, las diferencias son consistentes, y más allá de los errores aleatorios que se producen en la captura de coordenadas, no se visualizan equivocaciones.



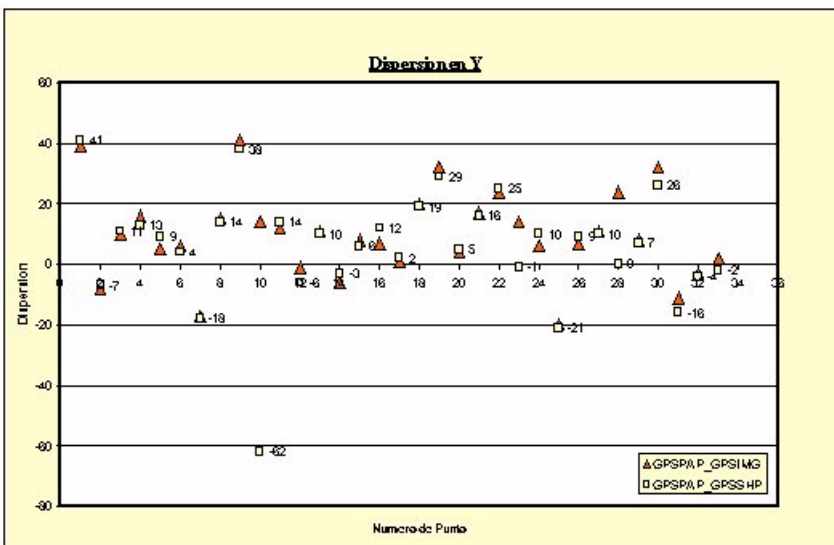
**Grafica 2 :** Dispersión de datos

A diferencia del gráfico No.1, en el Gr. No.2 aparece con mucha fuerza una discrepancia (Pt.No.10) que excede los límites pre-establecidos, se aparta de la tendencia general del resto de los puntos. Esto de por sí nos está alertando sobre la posibilidad de la ocurrencia de una equivocación.



**Grafica 3** : Dispersión de datos

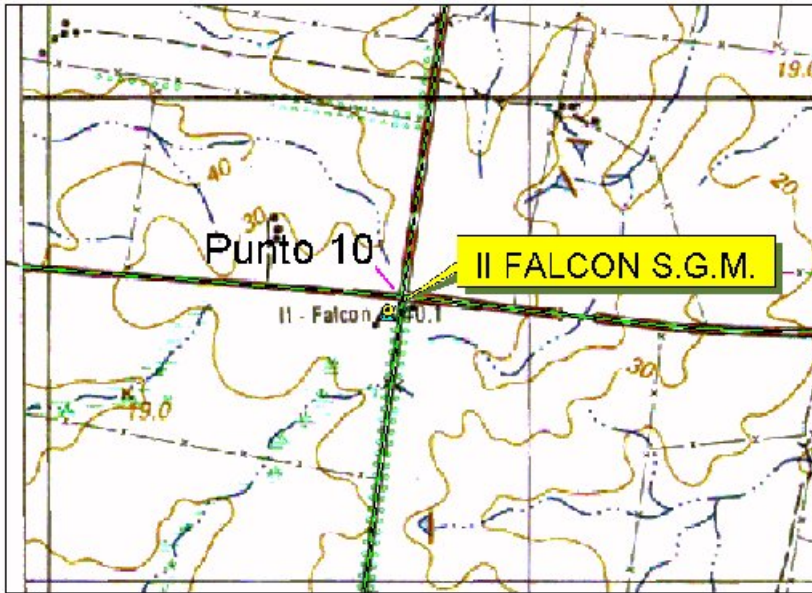
Esa discrepancia notoria que surge del gráfico No.2 se confirma en el gráfico No.3.



**Grafica 4** : Dispersión de datos

A diferencia de los otros gráficos, el Gr.No.4 representa la variación de las coordenadas Y para los mismos puntos, intentando verificar si el error ocurrió en el ámbito de las coordenadas X solamente, (con lo cual sería una equivocación parcial en la captura), o si ocurre también en las Y, ya que significaría un error de identificación de la entidad geográfica.

Efectivamente se verifica esto último, es decir, ocurrió un error de identificación en el punto 10. (Fig.9) Partiendo del ploteo de "diferencias de diferencias" de coordenadas, hemos detectado una inconsistencia (P.10); resta ahora poner a prueba el algoritmo GRIT .



**Fig. 2** : Localización de equivocación

Aplicando el proceso iterativo GRIT, coincidentemente detectamos una fuerte discrepancia observacional en el Punto No.10. Las diferencias más notorias ocurren entre el SHP, el IMG y DWG.

Recurriendo a una nueva verificación de la captura de los datos en el punto 10, detectamos un error de procedimiento al haber capturado en DWG y IMG la intersección de caminos, cuando en realidad originalmente (GPS) se trataba del punto geodésico II Falcon del SGM.

Luego de haber detectado este problema , nos queda por verificar que el punto 10 haya sido extraído correctamente desde el soporte papel; efectivamente se corrobora la ocurrencia del mismo error.

En definitiva, esto significa que la única captura correcta del punto 10 ocurrió en SHP, ya que en el resto de los casos la equivocación se debió a una incorrecta identificación de la entidad puntual.

Por lo tanto el punto 10 debe ser removido del grupo de observaciones, o eventualmente sustituido por una nueva observación del punto 10 (según la teoría probabilística, para una muestra de tamaño  $n$ , alcanzaría la detección de una sola equivocación para repetir la muestra)

#### **5.4 Procesamiento de Datos**

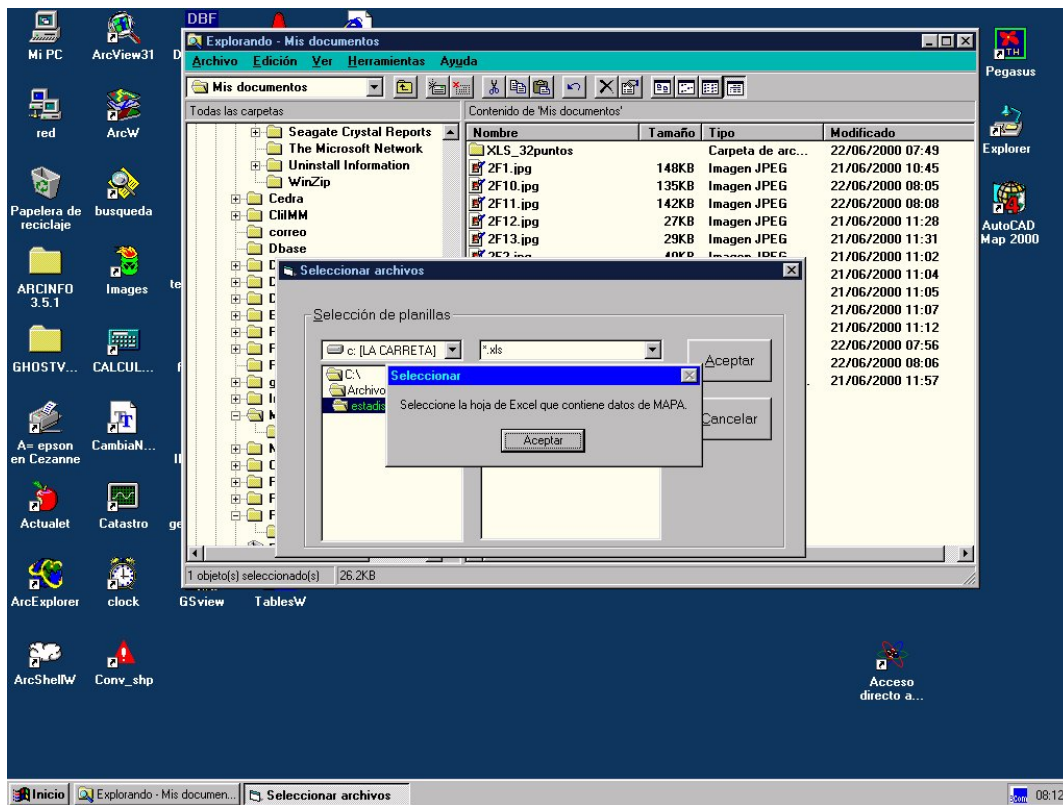
Con la información depurada de errores groseros y equivocaciones, queda ahora por aplicar el algoritmo a los datos remanentes (32).

Para ello hemos diseñado y desarrollado un software específico, el QCGIS, 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.

Las pantallas son las siguientes:



**Fig. 3 :** Pantalla inicial de ingreso de precisión requerida

En esta pantalla se ingresa 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 16 metros aproximadamente.

Considerando que el testeo se realiza sobre el soporte papel, con lo que se dificulta en algo la captura de las coordenadas, estableceremos una precisión de comparación en 20 metros.

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

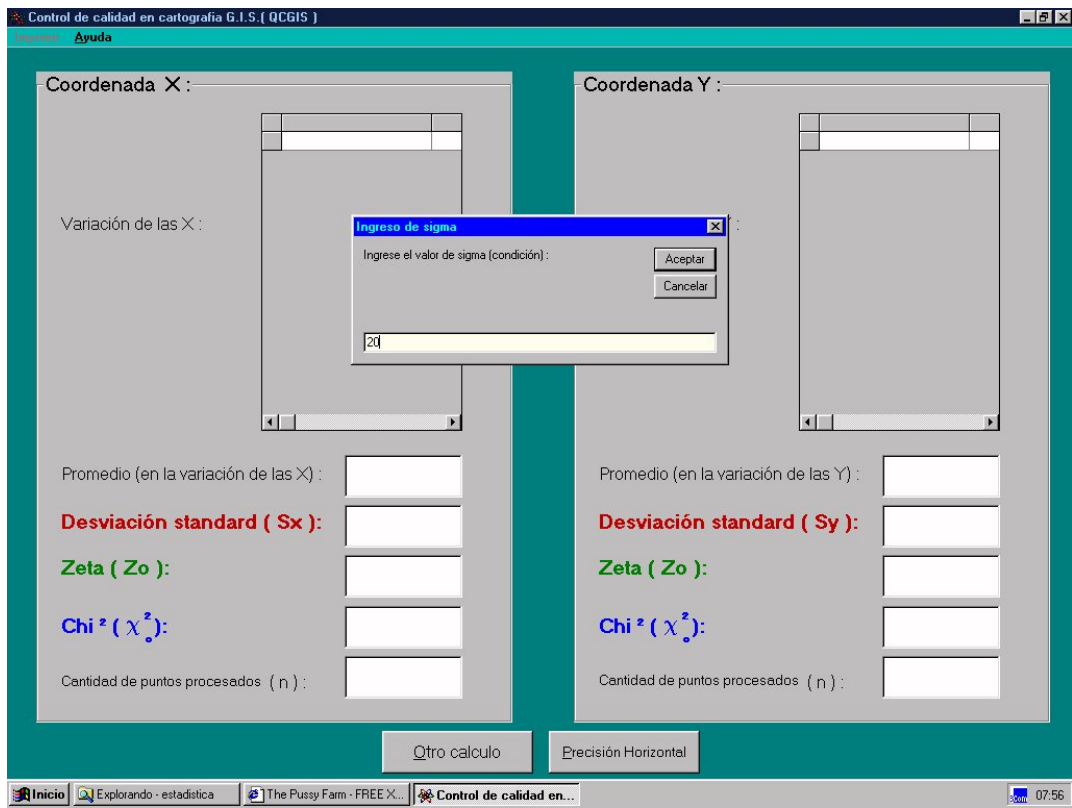


Fig. 4 : Pantallas intermedias

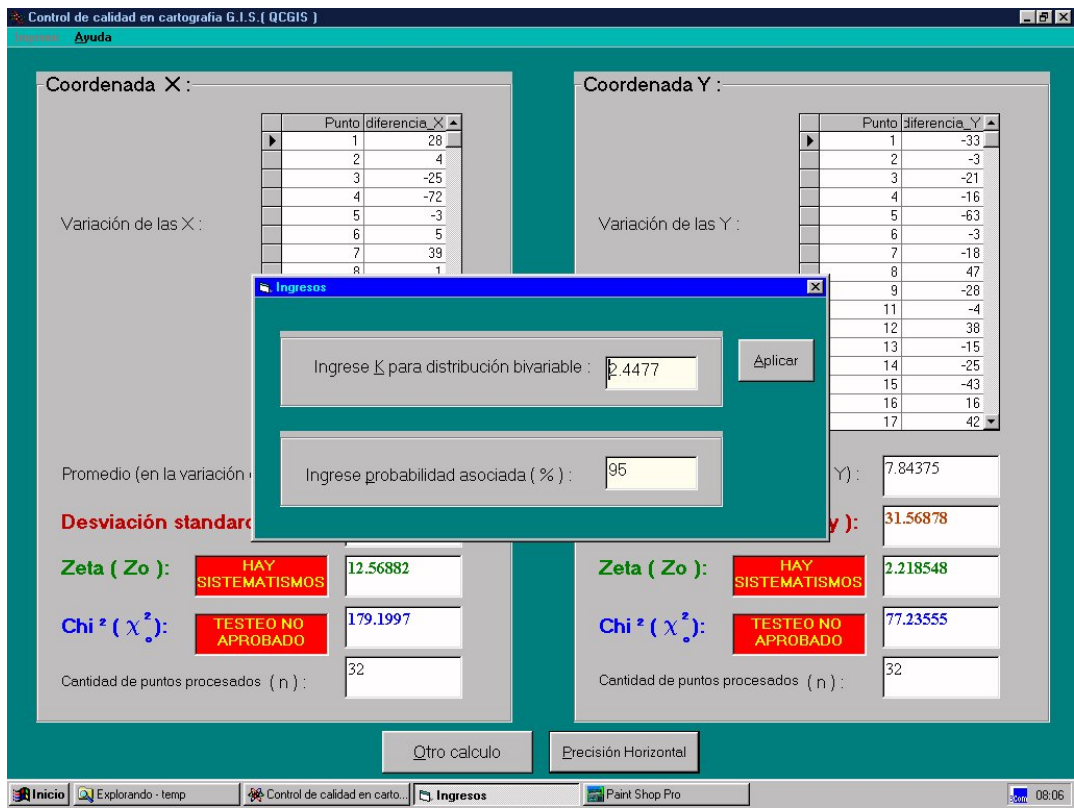
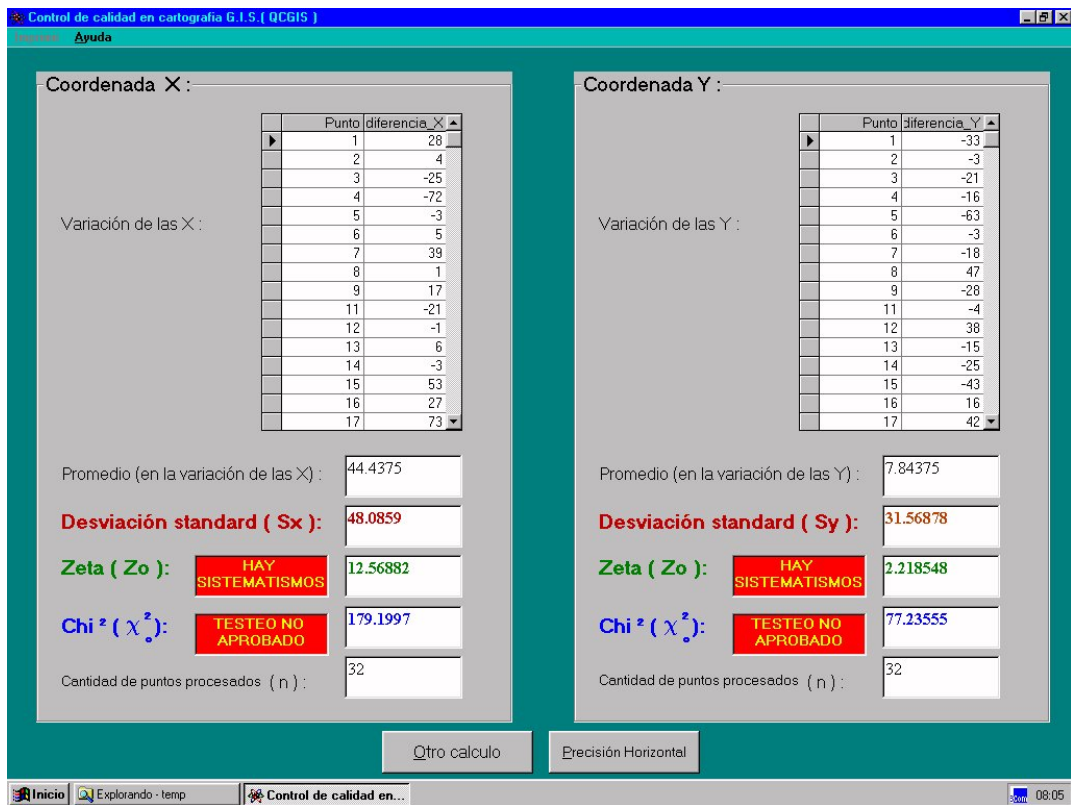


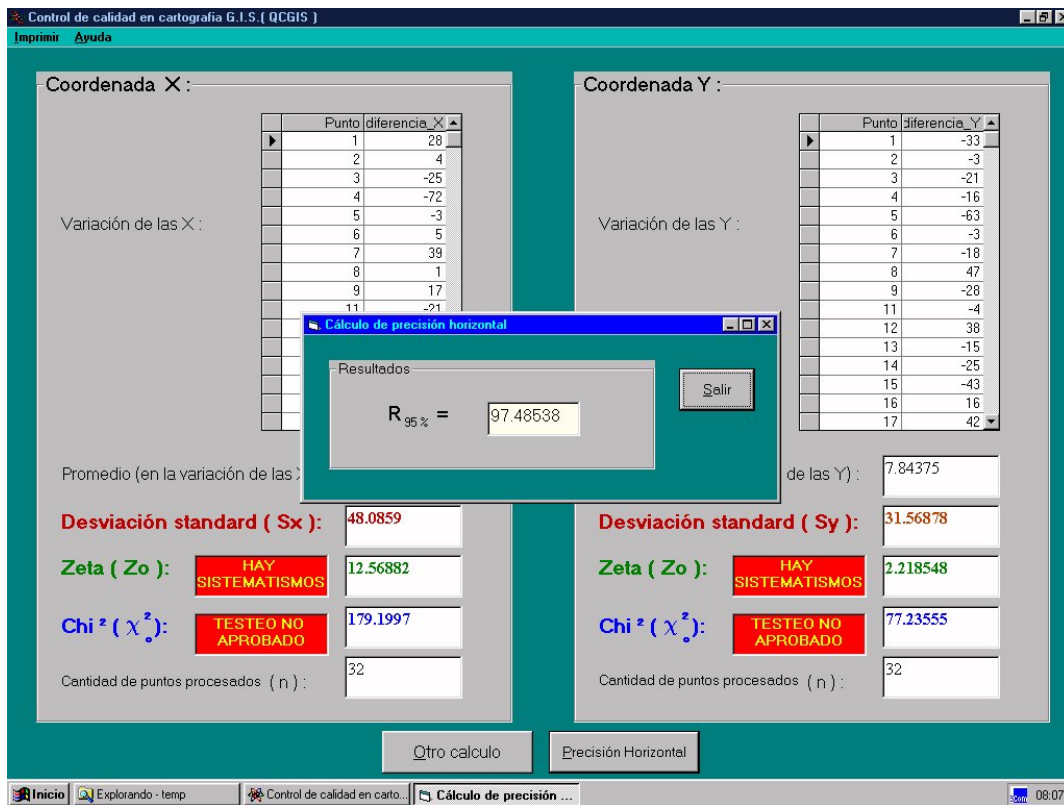
Fig. 5 : Pantallas intermedias



**Fig. 6 :** Pantallas intermedias

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.



**Fig. 7 : Pantalla Final**

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

### 5.5 Resultados de la aplicación del QCGIS.

La aplicación del algoritmo en el caso de la carta K27 del Servicio Geográfico Militar, genera los siguientes resultados (se adjuntan reportes del software QCGIS):

- La carta en soporte papel no cumple con los testeos correspondientes a la detección de sistematismos, ni con las precisiones requeridas.
- Si realizamos las mismas operaciones con el resto de los soportes, IMG, DWG, SHP, obviamente encontramos resultados similares.
- La precisión media de esta carta se encuentra en un entorno aproximado a los 100 metros, lo que supondría una escala "virtual" de :

1:250,000 para el 95% de los sucesos

1:100,000 para el 68% de los sucesos

Para los cálculos de las escalas correspondientes a las precisiones medias, hemos tomado la precisión de referencia 20 m. = 0.4 \*Factor de Escala (E = 50,000), cuando en realidad, según los estándares del FGDC las tolerancias rondan el 0.25 \*E. La importancia de la detección de sistematismos, consiste en que no sería correcto trabajar con los parámetros y estimadores de la (N), por lo que el algoritmo debe truncarse al momento de la detección de un sistematismo en el control.

No obstante esto, y asumiendo que si bien la muestra no resulta totalmente consistente con la distribución gaussiana tampoco se aleja demasiado de la función densidad (f), los cálculos generales de precisión ofrecen ideas claras de los comportamientos generales del grupo de datos.

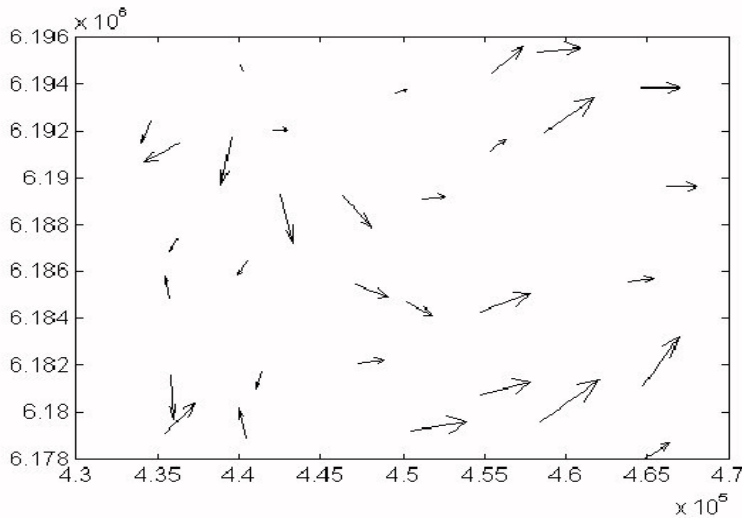
Para profundizar algo más en estos conceptos, brevemente estudiaremos algunas alternativas para corregir y eventualmente mejorar la calidad de la carta a estudio.

Para ello, analizaremos los vectores de desplazamiento de los grupos de datos entre sí, haremos una verificación en campo, y por último, un intento de establecer correcciones a la carta mediante el cálculo de parámetros de transformación afines.

### 5.6 Graficación de los Vectores Deformación

#### GPS-PAP

```
» quiver(a(:,2),a(:,3),(b(:,2)-a(:,2)),(b(:,3)-a(:,3)),'r')»
```



**Fig. 8** : Comportamiento de las diferencias

QUIVER Quiver (or velocity) plot.

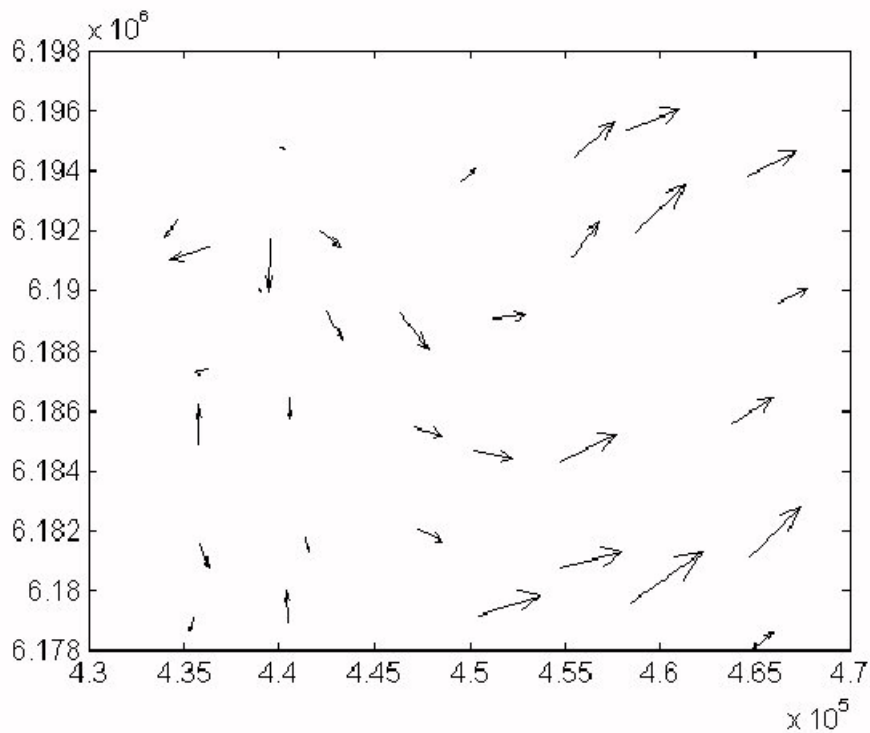
QUIVER(X,Y,U,V) plots the velocity vectors with components (u,v) at the points (x,y). The matrices X,Y,U,V must all be the same size and contain the corresponding position and velocity components (X and Y can also be vectors to specify a uniform grid). QUIVER automatically scales the velocity vectors to fit within the grid.

Si comparamos las fig. 8 y fig. 9 ,podemos inferir que las deformaciones entre Papel y Shp, respecto a los datos de campo GPS, lucen muy similares.Si bien en lo previo era esperable que ocurriera por la fuerte correlación entre ambos soportes, también demuestra con mucha fuerza la necesidad de controlar las cartografías base, mas allá de posibles ajustes y compensaciones posteriores.

Recordemos que los datos SHP estuvieron sometidos a diversos ajustes tales como geo-referenciación y procesamiento topológico, por lo que en principio, podríamos descartar que los errores constatados se deban a deformaciones del papel.

#### GPS-SHP

```
» quiver(a(:,2),a(:,3),(c(:,2)-a(:,2)),(c(:,3)-a(:,3)),'w')»
```



**Fig.9** : Comportamiento de las diferencias

Detectado un sistematismo claro a través del algoritmo, nos propusimos verificar en campo recorriendo la caminería con un móvil equipado con GPS.

De acuerdo a nuestro relevamiento, se confirma el fuerte sistematismo, en particular a nivel de las X.

Para finalizar el trabajo de procesamiento de datos, establecimos los parámetros de transformación entre el sistema de puntos tomados en campo (GPS), el sistema del soporte duro (PAP) y el sistema de coordenadas de los archivos finales (SHP).

Para el cálculo de los parámetros hemos utilizado los algoritmos correspondientes a las Transformaciones Conforme 2D y Afin 2D, realizando los ajustes por el Método Generalizado de Mínimos Cuadrados.

Para el procesamiento de estas transformaciones hemos utilizado los programas ADJCOMPS, ADJUST y GEOLAB, todos propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR.

**Two Dimensional Conformal Coordinate Transformation of File > GPDS.DAT  
using generalized least squares approach.**

-----  
TRANSFORMACION GPS PAP  
-----

$$\begin{aligned} ax - by + Tx &= X + VX \\ bx + ay + Ty &= Y + VY \end{aligned}$$

Transformation parameters, estimated errors, and t-values:

a = 0.99738 0.00056 t-value: 1775.95  
b = -0.00198 0.00056 t-value: 3.53  
Tx = -11.139420 3.483921 t-value: 3.20  
Ty = 17.116181 3.483921 t-value: 4.91

Rotation = 359° 53' 09.7"  
Scale = 0.99737960

Adjustment's Reference Variance = 3.1793

Number of Iterations = 2

**Two Dimensional Affine Coordinate Transformation of File > GPDS.DAT  
using generalized least squares approach.**

-----  
TRANSFORMACION GPS PAP  
-----

$$\begin{aligned}ax + by + c &= X + VX \\dx + ey + f &= Y + VY\end{aligned}$$

Transformation parameters, estimated errors, and t-values:

a = 0.99623 0.00056 t-value: 1771.47  
b = 0.00144 0.00107 t-value: 1.35  
c = -7.242113 6.62825157 t-value: 1.09  
d = -0.00191 0.00057 t-value: 3.38  
e = 1.00143 0.00107 t-value: 933.62  
f = -7.980118 6.66248530 t-value: 1.20

Adjustment's Reference Variance = 2.4836  
Number of Iterations = 2

**Two Dimensional Conformal Coordinate Transformation of File > GPSHDS.DAT  
using generalized least squares approach.**

-----  
TRANSFORMACION GPS SHP  
-----

$$\begin{aligned}ax - by + Tx &= X + VX \\bx + ay + Ty &= Y + VY\end{aligned}$$

Transformation parameters, estimated errors, and t-values:

a = 0.99734 0.00049 t-value: 2034.49  
b = -0.00196 0.00049 t-value: 4.00  
Tx = -10.976596 3.041086 t-value: 3.61  
Ty = 17.309200 3.041086 t-value: 5.69

Rotation = 359° 53' 14.7"  
Scale = 0.99734531

Adjustment's Reference Variance = 2.4228  
Number of Iterations = 2

**Two Dimensional Affine Coordinate Transformation of File > GPSHDS.DAT  
using generalized least squares approach.**

-----  
TRANSFORMACION GPS SHAPE  
-----

$$\begin{aligned}ax + by + c &= X + VX \\dx + ey + f &= Y + VY\end{aligned}$$

Transformation parameters, estimated errors, and t-values:

a = 0.99637 0.00050 t-value: 2009.23  
b = 0.00147 0.00094 t-value: 1.56  
c = -7.509969 5.84004910 t-value: 1.29  
d = -0.00190 0.00050 t-value: 3.82  
e = 1.00077 0.00094 t-value: 1059.77  
f = -3.897525 5.86555586 t-value: 0.66

Adjustment's Reference Variance = 1.9300  
Number of Iterations = 2

## 6. Conclusiones

El objetivo de este estudio fue la determinación de algoritmos robustos y consistentes para el control de la precisión en cartografía base de GIS.

Estos algoritmos ,luego de su diseño, fueron probados en grupos de datos reales.

Las conclusiones finales de esta tesis las separamos en dos grupos:

1. Referente a los algoritmos
  2. Referente a la aplicación y sus resultados.
1. El algoritmo, que incluye el tratamiento de observaciones, detección y depuración de errores groseros, tests estadísticos y software

específico de soporte, fue puesto a prueba y ha logrado resultados excelentes, verificados cada uno de ellos en el "real world".

Este último punto no resulta menor, en especial tratándose de componentes básicos de GIS, donde frecuentemente esta herramienta orientada a la toma de decisiones, provoca resultados erróneos porque los datos base no han sido suficientemente controlados en su calidad.

Esta metodología de trabajo, genera la "seguridad" del conocimiento concreto de la estructura sobre la cual se edifica un GIS, es decir, el soporte cartográfico.

Para el encargado de implementarlo, la certeza de qué exigencias podrá requerirle al sistema, y la posibilidad de informarle al usuario los estándares mediante reportes, incluyéndolos además en la construcción de los metadatos.

Es importante destacar también, que este algoritmo en definitiva puede aplicarse a cualquier soporte cartográfico incluyendo planos de mensura, con lo que se convierte en una herramienta de gran utilidad en especial para las Oficinas Catastrales y Municipales.

Más adelante, veremos que los resultados de la aplicación de este algoritmo habilita la clasificación de la cartografía en 3 diversas clases, 1, 2 y 3 de acuerdo al FGDC.

2. Los datos concretos en cuanto a PG ya fueron expuestos anteriormente.

De acuerdo a los valores numéricos producidos, la precisión resultante excede las 3 veces de la estimada, por lo que claramente correspondería a una clase 3.

Resta ahora evaluar el PT para el sistema GIS correspondiente al área geográfica de la lámina K27.

Aquí hemos encontrado un total de 8 "dangles no-deseables" en un total de 195 "seudonodos", por lo que aplicando el

$$PT = 1 - \frac{N^{\circ} Dangles}{N^{\circ} Seudonodos} = 0.958$$

De acuerdo a los datos extraídos de QCGIS:

$$PG = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \right)^{-1} = 0.200$$

Por tanto de acuerdo al *parámetro de calidad de cartografía base de GIS (CCBG)*:

$$CCBG = [PG*PT] = 0.19$$

Este dato muestra que el parámetro CCBG claramente cae en el rango de "insuficiente", influenciado fuertemente por la poca calidad de la cartografía utilizada como base del sistema.

Para finalizar, el CCBG es una modalidad general de evaluar las precisiones geométricas de los Sistemas de Información Geográfica de acuerdo a escalas iniciales de aplicación del sistema.

Si a la cartografía base testeada le asignamos una precisión menor a la estimada, claramente la calidad CCBG mejorará notoriamente, adecuándose el sistema a otra escala diferente a la inicial.

## 7. Referencias Bibliográficas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Strang G. and Borre K.** *Linear Algebra, Geodesy and G.P.S.*, Wellesley Cambridge Press, (1997).

**Esri Inc.** *ArcInfo Manuals, and ArcView Topology and Map Projections*.

