

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



**ESTIMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN EN LA FALLA IMPERIAL DURANTE
2014-2016 EN EL VALLE DE MEXICALI MEDIANTE GPS Y
MICROGRAVIMETRÍA**

TESIS QUE PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Ing. Pedro Salas Contreras

Director de Tesis

Dr. Jorge Ramírez Hernández

Codirector de Tesis

M. en C. Juan Manuel Espinosa Cardeña

Mexicali, B. C., diciembre 2017.

Resumen

El Valle de Mexicali está localizado geográficamente en la parte noroeste de México, esta zona es caracterizada por un alto grado de ocurrencia de sismos y por tanto existe peligro y riesgo geológico asociado al mismo. La sismicidad es originada por el desplazamiento diferencial de las placas del Pacífico y Norteamericana a lo largo de las principales fallas del sistema. La acumulación de esfuerzos antes (pre-sísmica) durante (co- sísmica) y posterior (pos-sísmica) al sismo en las fallas es un proceso bastante reconocido. Esta misma acumulación de esfuerzos se presentó en dos grandes sismos en la falla Imperial en los años 1940 y 1979 ocasionando cuantiosos daños a la infraestructura de comunicaciones, eléctrica, hidráulica y habitacional del Valle de Mexicali. En este trabajo se hace un análisis de la acumulación de esfuerzos pre-sísmicos asociados a la falla Imperial, al oriente de la ciudad de Mexicali, mediante la determinación de deformaciones del terreno, con el objeto de determinar zonas con mayor acumulación de esfuerzos y asociarlas a zonas con mayor posibilidad de ocurrencia de un rompimiento inelástico durante un sismo. La deformación del terreno se cuantificó mediante mediciones del desplazamiento de bancos de la red geodésica UAS- CICESE- UABC durante el período 2014-2016 con GPS diferencial, encontrando desplazamientos de hasta 0.021 m. A su vez, en el período de 2015 a 2016 variaciones en la altura del terreno en la misma red que fueron cuantificadas mediante mediciones microgravimétricas, encontrando levantamientos de 0.010 m y subsidencia hasta en 0.024 m. Los patrones de deformación horizontal coinciden con los modelos propuestos por otros autores para una deformación lateral de 46 mm/año y con profundidades ($5.6 \text{ km} \pm 3$) a la zona sismogénica. La deformación elástica vertical esperada de microgravimetría solo cuantifica tendencias del comportamiento alrededor de la falla Imperial.

Dedicatoria

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A la memoria de mi padre José C. Salas y Díaz.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi madre Victoria F. Contreras Cano.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi familia.

A mi esposa Gricel, a mis hijos Nicte Ha y Josué Mateo, a mis hermanos Victoria y Oswaldo, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Agradecimientos

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi director de tesis Dr. Jorge Ramírez Hernández, por su apoyo incondicional, paciencia, dedicación y consejos para la culminación de este trabajo.

A mi codirector de tesis M. en C. Juan Manuel Espinosa Cardeña, por motivarme con sus conocimientos en el campo de la geodesia y geofísica. Gracias a su ayuda y conocimientos fue posible finalizar este proyecto.

A la institución en la cual actualmente trabajo CFE y SUTERM, por su apoyo para realizar mis estudios de posgrado.

A todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

¡Gracias a ustedes!

Índice

Resumen	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iv
1. Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Planteamiento del Problema.....	16
1.3. Justificación	17
1.4. Hipótesis.....	18
1.5. Objetivos	19
2. Capítulo 2. MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1. Teoría de la Deformación Sísmica.....	20
2.2. Fundamentos del Método Gravimétrico	25
2.3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	27
3. CAPÍTULO 3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	34
3.1. Prospección Gravimétrica (Microgravimetría).....	34
3.2. Equipos GPS.....	44
3.3. Método de Ajuste de Observaciones.....	48
3.4. Método de Procesamiento de Observaciones GPS.....	55
4. CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	59
4.1. Adquisición de Datos.....	59
4.2. Estimación de la Deformación Vertical y Horizontal del Terreno.....	101
4.3. Zonificación.....	115
5. CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	119
5.1. Conclusiones.....	119
5.2. Recomendaciones.....	120
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
7. ANEXOS	I
7.1. Bancos de Referencia GPS	I
7.2. Tablas de Vectores de Fiabilidad Externa	II
7.3. Anexo (Figuras de Ajuste GPS de Campañas 2014, 2015 y 2016).....	III
7.4. <i>Script</i> para Matlab	V

Índice de Figuras

Figura 1-1. Localización de la zona de estudio al oriente de la Ciudad de Mexicali, Baja California, México. Por su ubicación limita al norte con el estado de California en los Estados Unidos de America.....	13
Figura 1-2. Localización de perfiles y bancos geodésicos de la RGFI perpendiculares a la traza de la falla Imperial.....	15
Figura 2-1. Modelo de deformación horizontal superficial de la falla Imperial, a partir de los parámetros de Lyons et al. (2002). El grafico (A) corresponde a la proyección en planta del desplazamiento con 36.5 mm/año de deformación horizontal y con una profundidad de bloqueo (locked zone) de 5.6 ± 3 km. Derecha (B) modelo esquemático de deformación, en el que se muestra que el deslizamiento (Creep) ocurre a profundidades mayores que H.	22
Figura 2-2. Sistemas de fallas presentes en el Valle de Mexicali. Recopilación de diferentes autores (González, 1990; King et al., 1998; Meltzner et al., 2006; Chanes, 2012; Rockwell et al., 2013), CGCP- Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Recuadro azul sobre área de estudio de la falla Imperial; Flechas naranjas en el área de estudio mostrando desplazamiento horizontal principal de la FI.	23
Figura 2-3. Actividad sísmica histórica clasificada por magnitud del Valle de Mexicali, Baja California, México. Recuadro azul corresponde a la zona de estudio; Segmento continuo corresponden a fallas conocidas y líneas discontinuas segmentos inferidos de falla geológica. Modificada de Chanes (2012).	24
Figura 2-4. Actividad sísmica clasificada de acuerdo a su magnitud (grados en la escala de Richter) en la zona de estudio y alrededores de 2011 a 2017. Consultada de RESNOM y USGS-Caltech (RESNOM, 2015; USGS, 2017).....	25
Figura 2-5. Correlación de los códigos generador por el satélite y el receptor que permite la medición del tiempo de recorrido de la señal y por lo tanto la pseudo-distancia entre el satélite y el receptor. a) Correlación C/A y b) correlación entre observables de fase. Tomado de Ramón-Morales (2010).....	31
Figura 3-1. Gravímetro relativo CG-3 de Scintrex.	35
Figura 3-2. Gravímetro relativo CG-5 de Scintrex. Izquierda descarga de datos a memoria externa vía cable serial RBS; derecha gravímetro relativo CG-5 conectado a fuente de alimentación externa.	36
Figura 3-3. Diseño de los gravímetros CG-5 (izquierda) y CG-3 (Derecha). El diseño del CG-5 y CG-3 indican una altura de 89 y 98 mm, respectivamente, que será compensada a las observaciones realizadas por el instrumento en post-proceso.....	38
Figura 3-4. Límites gráficos de parámetros de clasificación de las redundancias parciales.	41
Figura 3-5. Equipo GPS NetRS y antena Zephyr.....	44
Figura 3-6. Equipo GPS Topcon GR-5.....	45
Figura 3-7. Equipo GPS Geomax Zenith25.	45
Figura 3-8. Implementación en campo de equipos GPS.	47
Figura 3-9. Esquema de general de trabajo para las observaciones GPS.	55
Figura 3-10. Opciones de configuración del proyecto (parámetros de calidad de aceptación de procesos).....	56
Figura 3-11. Opciones de configuración de ajuste de red.	57
Figura 3-12. Estación geodésica P500 perteneciente a la red CORS.....	58
Figura 4-1. Diagrama general de cada fase para la obtención de resultados.....	59
Figura 4-2. Generalidades de la adquisición en campo para la RGFI.....	60
Figura 4-3. Búsqueda de Bancos en la RGFI, previo al inicio de las mediciones. Izquierda banco P2A3 no localizado, derecha banco P3A5 localizado al costado de carretera estatal BC1.	60

Figura 4-4. Mapa de estatus de los bancos para las mediciones de 2015 y 2016. Circulo verde corresponde a bancos en buen estado; Circulo verde tachado bancos con daño, no funcionales para la medicion y Signos de interrogación bancos que no fue posible localizar.....	61
Figura 4-5. Revisión de parámetros de gravímetros CG-3 y CG-5.	62
Figura 4-6. Esquema de la red microgravimétrica. La rama izquierda se refiere a la revisión de parámetros para el inicio de las campañas gravimétricas, del lado derecho la planificación de las mediciones en base al censo de bancos de la RGFI.	62
Figura 4-7. Esquema y planeación de los recorridos gravimétricos en RGFI. Las flechas indican la dirección en la que se propone la medición de las poligonales y los colores indican un polígono diferente.	63
Figura 4-8. Localización de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Círculos alrededor de cada EMA ejemplifica que los parámetros en el área que cubren se mantienen constantes.	65
Figura 4-9. Presión atmosférica (mBar) y correspondiente corrección gravimétrica en $\mu\text{Gal}/\text{mB}$ con respecto de las estaciones IIUABC, Mexicali y Nuevo León.....	66
Figura 4-10. Interfaz Cg5Tool para procesado y ajuste de observaciones gravimétricas por polígono.	67
Figura 4-11. Hoja 1 de datos de entrada del polígono 3 en el programa CGxTool, obtenidas del programa GMT. De arriba hacia abajo: visualización de curva de deriva; desviaciones estándar de las series de observaciones; inclinación del plano x, y; temperatura (mK); repetitividad de las observaciones e histograma de las observaciones.....	68
Figura 4-12. Hoja 2 de resultados de datos del polígono 3 respecto de la estación G5. De arriba hacia abajo: gráfica y parámetros del modelo de regresión de deriva remanente y diferencias de gravedad con respecto al vértice inicial.	69
Figura 4-13. Localización y secuencia de segmentos (Δg) medidos. Óvalos identifican los enlaces entre polígonos.	71
Figura 4-14. Red gravimétrica final de la campaña 2015 y segmentos (diferencias de gravedad) utilizados.....	71
Figura 4-15. Histograma ajustado de residuales gravimétricos obtenido del ajuste de red 2015. Línea punteada (color negra) representa la distribución normal ajustada con media -0.001 mGal y desviación estándar 0.004 mGal.....	75
Figura 4-16. Comportamiento de residuales de campaña 2015 de gravimetría. Línea con puntos (azules) representa la magnitud de cada residual obtenido del ajuste.	75
Figura 4-17. Pruebas estadísticas de observables ajustados de campaña 2015. (A) Grafico de prueba de Baarda con un nivel de confianza de 95% a partir de valor crítico 2.8. (B) Redundancias obtenidas y clasificación de acuerdo control en la red de 2015. (C) 0.13 es el Mínimo error detectable. (D) Homogeneidad de la red correlacionando con grafico (B) confirma la debilidad en el control de la red en el observable 31.....	77
Figura 4-18. Parámetros de homogeneidad externa de la campaña 2015 de la red 2015.....	78
Figura 4-19. Vectores de fiabilidad externa, obtenidos a partir de cada uno de los observables ajustados en el modelo matemático de la red gravimétrica 2015.....	79
Figura 4-20. Presión atmosférica (mBar) y corrección gravimétrica (CORR. GRV) en mGal/mBar de la estación Mexicali y Nuevo León, para la segunda campaña de junio –julio de 2016.....	81
Figura 4-21. Histograma y ajuste de residuales de la campaña 2016.	84
Figura 4-22. Comportamiento de residuales de la campaña 2016 de gravimetría.....	84

Figura 4-23. Pruebas estadísticas de observables ajustados de campaña 2016. (A) Grafico de prueba de Baarda con un nivel de confianza de 95% a partir de valor crítico $w_0=2.8$. (B) Redundancias obtenidas y clasificación de acuerdo control en la red de 2016. (C) 0.15 es el Mínimo error detectable. (D) Homogeneidad de la red correlacionando con grafico (B) confirma la debilidad en el control de la red en el observable 13.....	85
Figura 4-24. Fiabilidad externa a partir de las residuales del modelo de la campaña 2016.....	87
Figura 4-25. Vectores de fiabilidad externa, obtenidos a partir de cada uno de los observables ajustados en el modelo matemático de la red gravimétrica 2016.....	87
Figura 4-26. Localización de puntos de observación GPS en noviembre 2014.....	89
Figura 4-27. Subproceso de cálculo de líneas base del día 18 de noviembre de 2014.....	90
Figura 4-28. Ajuste exitoso de bancos P2A9 y P2A5 con elipses de error.....	92
Figura 4-29. Localización de puntos de observación GPS de la campaña 2015.	93
Figura 4-30. Cálculo de líneas base (izquierda) y ajuste de red con elipses de error (derecha) del día 01 de diciembre de 2015.....	94
Figura 4-31. Plano de localización de puntos de observación GPS de la campaña 2016.....	97
Figura 4-32. Cálculo de líneas base (izquierda) y ajuste de red con elipses de error (derecha) del día 01 de julio de 2016.	98
Figura 4-33. Localización de perfiles propuestos para el análisis de la deformación vertical. Línea punteada corresponde al trazo superficial de la falla Imperial.	104
Figura 4-34. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (A) y altura elipsoidal (B) en vértices a lo largo del Perfil 1 , relativos al vértice P2A10, período 2015 a 2016.....	105
Figura 4-35. Cambios temporales de gravedad convertida a metros (A) y de altura elipsoidal (b) en vértices del Perfil 2 , relativos al vértice P2A10, período 2015- 2016.	105
Figura 4-36. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (a) y altura elipsoidal (B) del Perfil 3 , relativos al vértice P2A10, período de 2015- 2016.	106
Figura 4-37. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (a) y altura elipsoidal (b) en vértices del Perfil 4 , período 2015- 2016.	107
Figura 4-38. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (A) y altura elipsoidal (B) en vértices del Perfil 5 , relativos al banco P2A10, período de 2015- 2016.	107
Figura 4-39. Vectores de desplazamiento para el período 2014- 2015, estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95%. Todas las mediciones son relativos al vértice P500.	109
Figura 4-40. Vectores de desplazamiento para el período 2015-2016 (6 meses), estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95 %. Todas las mediciones son relativas al vértice P500.	110
Figura 4-41. Vectores de desplazamiento para el período 2014- 2016, estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95%. Todas las mediciones son relativas al vértice P500.....	111
Figura 4-42. Gráficas de velocidad de las componentes este y norte de los vértices P2A9, P2A10, P2A11, P2A5 con 3 observaciones. Datos de la Tabla 4-14, 4-20 y 4-26; Izquierda corresponde a la componente este de cada vértice e izquierda componente norte de cada vértice; extrema derecha la velocidad ajustada.	112
Figura 4-43. Modelo de velocidad de deformación superficial anual esperada entorno a la Falla Imperial, a partir de parámetros de velocidad (46 mm/año) y profundidad a la zona bloqueada (5 ± 3 km) mostradas como líneas punteadas de colores.	113
Figura 4-44. Modelo de deformación superficial de la red con respecto al trazo superficial de la falla Imperial, período 2014- 2016, a diferentes profundidades (líneas punteadas de colores); puntos de color rojo corresponde a la posición	

(proyectada) de bancos de la RGFI con barras de desviación estándar (líneas de color gris).	114
Figura 4-45. Zonificación del área que abarca la RGFI, según el desplazamiento horizontal (GPS) ocurrido en el período 2014 a 2015. Vectores (flechas en color rojo) es el desplazamiento calculado con errores (elipses en color negro) a un nivel de confianza de 95%.....	117
Figura 4-46. Zonificación del área que abarca la RGFI, según el desplazamiento horizontal (GPS) y vertical (microgravimetría) ocurrido en el período 2015 a 2016. Vectores (flechas en color naranja) es el desplazamiento calculado con errores (elipses en color negro) a un nivel de confianza de 95%.	118

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Relación de magnitud del sismo (M), amplitud del foco sísmico (L) y desplazamiento de la falla (D).	14
Tabla 3-1. Parámetros de referencia para la clasificación de redundancias parciales.	40
Tabla 3-2. Coordenadas del punto geodésico de control de proyecto P500.	58
Tabla 4-1. Error de cierre (EC) y tolerancia (T) de los polígonos medidos del 1 al 12 de diciembre de 2015. Donde ea= desviación estándar promedio; u=número de ejes del polígono; b= deriva del gravímetro; t= tiempo de recorrido del itinerario gravimétrico.	64
Tabla 4-2. Ejemplo del proceso para obtener Δg en cada vector. Utilizando el polígono 3 campaña 2015 de la figura 4-13.	70
Tabla 4-3. Diferencias entre segmentos de Δg identificados en la figura 4-14. Remarcados valores anómalos por encima de 0.065 mGal.	71
Tabla 4-4. Estimación de los valores de Δg (diferencias de gravedad) para la matriz de términos independientes. Para la matriz de ponderaciones se obtiene a partir de la normalización de las desviaciones estándar (1/D.E.) para la campaña 2015. D.E. Δg significa desviación estándar de la diferencia de gravedad; #Ec. Obs. corresponde al número de enlace o ecuación de observación (figura 4-15).	72
Tabla 4-5. Valores de gravedad ajustados de la campaña 2015 en mGal. GRV es valor ajustado de gravedad en mGal, So es desviación estándar en mGal.	74
Tabla 4-6. Error de cierre (EC) y tolerancia (T) de los polígonos medidos del 27 de junio al 1 de julio de 2016. Donde ea= desviación estándar promedio (D.E.); u= número de ejes del polígono; b= deriva del gravímetro; t= tiempo de recorrido del itinerario gravimétrico.	80
Tabla 4-7. Cálculo de los Δg (diferencias de gravedad) de los polígonos y normalización de las desviaciones estándar (1/D.E.) de cada uno de los observables (#Ec. de Obs).	82
Tabla 4-8. Valores finales de gravedad ajustados de la campaña 2016. GRV valor ajustado de gravedad en mGal, So es desviación estándar en mGal.	83
Tabla 4-9. Bancos y fechas de observaciones GPS campaña 2014.	89
Tabla 4-10. Tabla resumen del cálculo de líneas base para el día 18 de noviembre de 2014. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.	90
Tabla 4-11. Estadísticas del ajuste de 18 de nov de 2014.	91
Tabla 4-12. Coordenadas de cuadrícula ajustadas para el 18 de noviembre de los bancos P2A5 y P2A9.	91
Tabla 4-13. Coordenadas geodésicas ajustadas para el 18 de noviembre de los bancos P2A5 y P2A9.	91
Tabla 4-14. Coordenadas finales para las observaciones de GPS, noviembre de 2014.	91
Tabla 4-15. Bancos y fechas de observaciones GPS de 2015.	93
Tabla 4-16. Resultados del cálculo de líneas base del día 01 de diciembre de 2015. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.	94
Tabla 4-17. Estadísticos del ajuste de la red del día 01 de diciembre de 2015.	95
Tabla 4-18. Coordenadas de cuadrícula ajustadas y error respectivo del día 01 de diciembre de 2015.	95
Tabla 4-19. Coordenadas geodésicas ajustadas y altura elipsoidal de cada punto del día 01 de diciembre de 2015.	95
Tabla 4-20. Coordenadas finales para las estaciones con observaciones GPS de 2015.	96

Tabla 4-21. Bancos y fechas de observaciones GPS de junio- julio de 2016	97
Tabla 4-22. Resultados del cálculo de líneas base del 01 de julio de 2016. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.....	98
Tabla 4-23. Estadísticos del ajuste de red del 01 de julio 2016.....	99
Tabla 4-24. Coordenadas de cuadrícula ajustadas del 01 de julio de 2016.....	99
Tabla 4-25. Coordenadas geodésicas ajustadas del 01 de julio de 2016.	99
Tabla 4-26. Coordenadas finales para las estaciones GPS de junio- julio 2016.....	100
Tabla 4-27. Resultados de la conversión de diferencias de gravedad, con respecto a la estación P2A10, a diferencias de alturas de las campañas 2015 y 2016. DE corresponde a la desviación estándar	101
Tabla 4-28. Diferencias de alturas elipsoidales, respecto a la estación P2A10 y entre campañas.	102
Tabla 4-29. Diferencias entre campañas de gravedad y GPS componente vertical en metros. Δ cambios de altura en centímetros respecto del banco P2A10; DE desviación estándar.....	103
Tabla 4-30. Cambios temporales de posición horizontales estimados en las campañas GPS. D es desplazamiento en cm.....	108
Tabla 4-31. Velocidades promedio calculadas en bancos con observaciones en los 3 períodos. D. E. desviación estándar en mm por año; FI distancia de los bancos al trazo conocido en superficie de la Falla Imperial.	114
Tabla 4-32. Deformación estadísticamente significativa clasificada por zonas en el área de estudio. Para zonas con levantamientos signo positivo (+) y para zonas con subsidencia signo negativo (-). Los valores mostrados se encuentran en metros.	115
Tabla 7-1. Vectores de fiabilidad externa de la red gravimétrica 2015. Subrayados en gris corresponden a los vectores que presentaron mayor impacto en las observaciones.....	II
Tabla 7-2. Vectores de fiabilidad externa de la red gravimétrica 2016. Subrayados en gris corresponden a los vectores que presentaron mayor impacto en las observaciones.....	II

1. Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En diversas ciudades de México se han experimentado situaciones de daños materiales por diferentes fenómenos naturales que incluso han cobrado vidas humanas. Uno de esos fenómenos naturales son los sismos que son catalogados como uno de los riesgos geológicos en diversas zonas del mundo y de México.

Desde hace varios años y actualmente en diferentes partes del mundo se realizan estudios de monitoreo del subsuelo con el fin de alertar oportunamente de los peligros que esto ocasione a las poblaciones en zonas de fallas geológicamente activas, volcanes y otros fenómenos del subsuelo que pudieran ocasionar daños a la vida humana o infraestructura.

Tal es el caso de la ciudad de Mexicali, localizada al noroeste de México en el estado de Baja California (Figura 1-1), catalogada en el país como una de las ciudades con mayor riesgo sísmico ya que se encuentra en parte del segmento del sistema transforme de fallas de San Andrés que es originado por el desplazamiento de dos placas tectónicas (Pacífico y Norteamericana).

Históricamente, se han registrado varios eventos sísmicos en el Valle de Mexicali, debido a la energía acumulada en el sistema de fallas por el desplazamiento de las placas, que a su vez transfieren esta energía en toda su extensión por fallas y estructuras geológicas de menor dimensión. Algunas de las fallas conocidas en el Valle de Mexicali son: la falla Cucapah, Cerro Prieto, Michoacán, Morelia y falla Imperial. Esta última es uno de los sistemas con mayor deformación y que por su ubicación y extensión representa un riesgo sísmico para para más de 900 mil habitantes de acuerdo al último censo (INEGI, 2015).

El evento más actual del 4 de abril de 2010, un sismo de magnitud 7.2° en la escala de Richter que causo la destrucción del sistema de riego agrícola del Valle y daños a edificios públicos, carreteras y viviendas en la ciudad de Mexicali y sus alrededores, poniendo en riesgo a la población en general y la operación de la industria en general (Chavez *et al.*, 1999; Espinosa-Cardena *et al.*, 2008).

Con el propósito de monitorear y conocer dichos desplazamientos de la falla Imperial las Universidades de Baja California (UABC) y Sinaloa (UAS) y el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE) implementaron una red de control horizontal, vertical y gravimétrico (microgravimetría) en la falla Imperial denominada Red Geodésica de la Falla Imperial (RGFI), que a continuación se explica.

1.1.1. Red Geodésica de la Falla Imperial (RGFI).

La RGFI surge de la preocupación de la comunidad científica de la UABC, UAS y CICESE ante la imposibilidad de pronosticar con precisión el lugar donde se está preparando el epicentro de un sismo.

Ante el escenario sísmico ocurrido el 4 de abril de 2010 que se vivió en la ciudad de Mexicali se propuso en 2011 la implementación de una red de bancos geodésicos con características especiales con el objetivo de vigilar los procesos de acumulación de energía que estuviera originando deformaciones en la superficie y que pudiera tener un desenlace sísmico sobre zonas circunvecinas a la falla Imperial (Trejo-Soto *et al.*, 2011; Romero-Andrade, 2014).

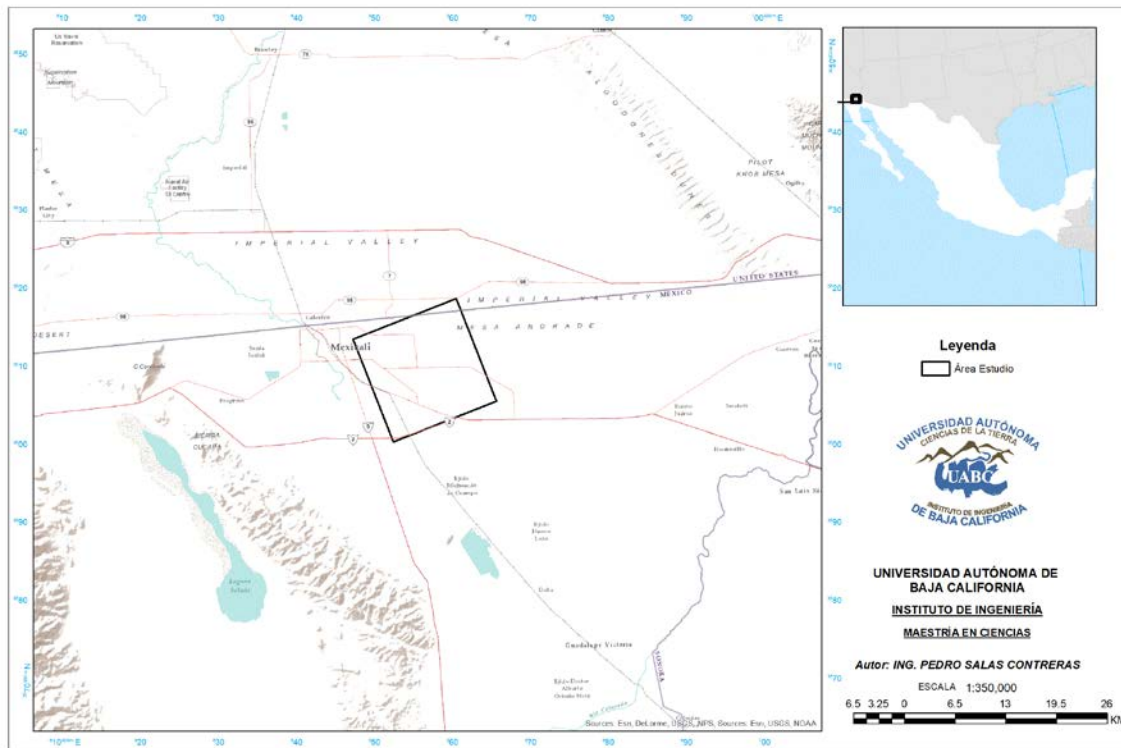


Figura 1-1. Localización de la zona de estudio al oriente de la Ciudad de Mexicali, Baja California, México. Por su ubicación limita al norte con el estado de California en los Estados Unidos de America.

Partiendo de ese escenario podemos definir que la energía liberada por un sismo está relacionada con la deformación observada entorno a los epicentros sísmicos, por lo tanto, su detección depende directamente de la distribución de las deformaciones en el subsuelo medido. Dichas deformaciones pueden alcanzar incluso las decenas de kilómetros y por esta razón el área afectada por el fenómeno tiene cierto comportamiento regular que es posible detectar con métodos geodésicos de precisión directamente en superficie (Trejo-Soto *et al.*, 2011).

Entorno a las deformaciones en superficie, Trejo-Soto *et al.* (2011) define que existe dependencia entre la fuerza del sismo con respecto a la amplitud del foco sísmico y los desplazamientos detectados con métodos geodésicos, aproximadamente similar a la mostrada en la tabla siguiente:

Tabla 1-1. Relación de magnitud del sismo (M), amplitud del foco sísmico (L) y desplazamiento de la falla (D).

M	L , (км)	D, (см)
3	1.1	0.11
4	3.0	0.62
5	8.3	3.5
6	23	20
7	62	120
8	170	660
9	470	3800

De esta tabla se infiere que el peor de los escenarios es un desplazamiento de 3800 cm, lo que provocaría un sismo de magnitud 9 grados en la escala de Richter, lo que lógicamente está relacionado con la amplitud del foco sísmico equivalente a 470 km. Considerando la posibilidad de eventos sísmicos mayores de 5 grados en la escala de Richter en la zona de estudio, se diseñó una red geodésica de bancos.

Por lo tanto, la construcción y disposición de las estaciones geodésicas (Bancos o monumentos) entorno al trazo conocido de la falla Imperial se realizó tomando como referencia 5 perfiles perpendiculares al trazo de la falla como se muestra en la figura 1-2.

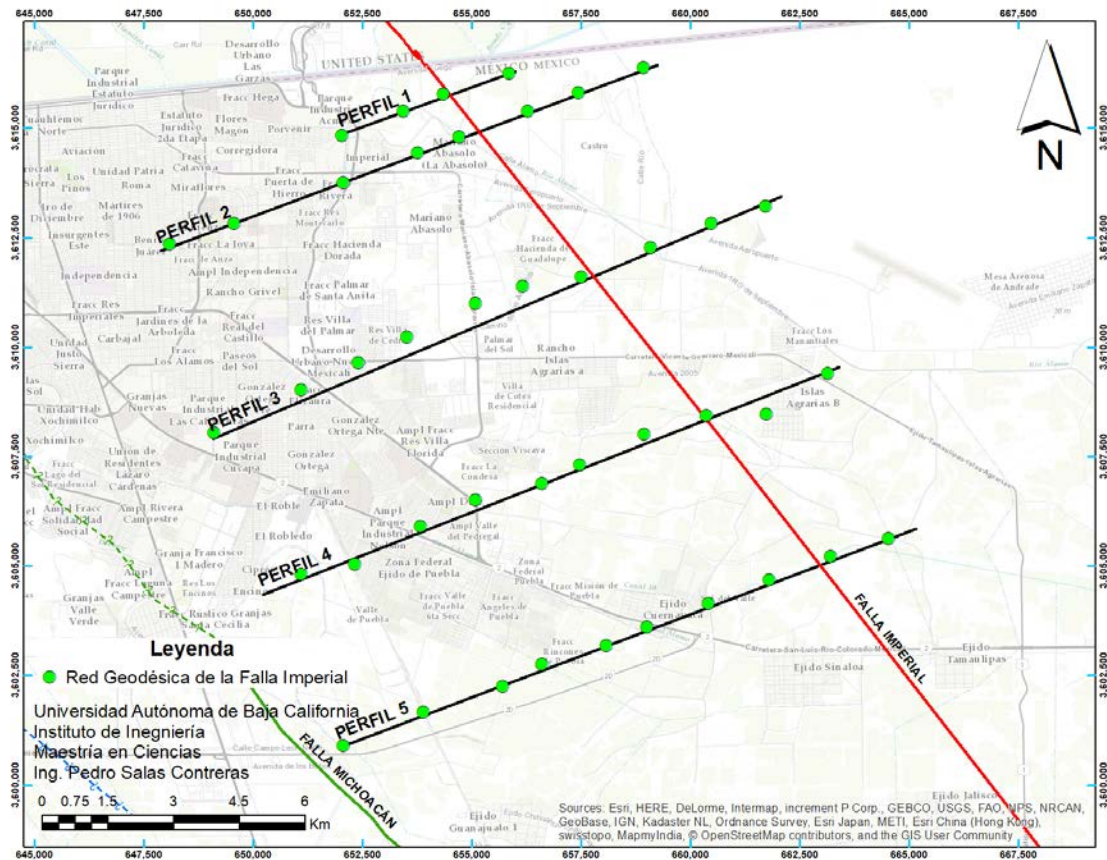


Figura 1-2. Localización de perfiles y bancos geodésicos de la RGFI perpendiculares a la traza de la falla Imperial.

En total se muestran 42 bancos construidos a una distancia de un kilómetro (aproximadamente), su nomenclatura se determinó a partir del perfil en que se encuentran, es decir, si el banco se localiza en el perfil 2 recibirá el prefijo P2 más un consecutivo que inicia siempre en el extremo oeste y termina al lado este de la falla Imperial. Los perfiles 2, 3, 4 y 5 siguen esta regla de nomenclatura excepto el perfil uno que es nombrado como consecutivo del ultimo banco construido en el perfil 2, de tal forma que el primer banco es denominado P2A9 y el ultimo del perfil 1 es P2A12 (Espinosa-Cardena *et al.*, 2014; Romero-Andrade, 2014). Hasta la fecha se han realizado mediciones temporales de GPS y nivelación, cuyos resultados principales se mencionan a continuación.

En 2014 Romero-Andrade (2014), realiza el estudio de los bancos P2A1, P2A4, P2A6, P3A1, P3A4 y P3A5 (figura 1-2) de la RGFI mediante mediciones de GPS en el período de 2012 a 2013. Los resultados en este trabajo muestran desplazamientos de 0.065 a 0.011 m (65 a 11 mm) en los bancos P2A1 y P3A1.

También Astrid y Espinosa (2014), a partir del modelado unidimensional de desplazamientos horizontales de una falla de rumbo lateral- derecha, encuentran que tales desplazamientos no siguen el patrón de deformación superficial esperado para la falla Imperial.

Recientemente, en 2016 Astrid-Moreno (2016), a partir de estudios de nivelación de alta precisión, reportan cambios de altura en los bancos P2A9, y P2A4 de 0.19 a -0.24 m, respectivamente, durante los años 2013 a 2015.

En este trabajo se pretende monitorear la deformación cortical producida por el movimiento asísmico de la falla imperial mediante el análisis de datos temporales de GPS y de mediciones gravimétricas en la RGFI.

1.2. Planteamiento del Problema

La ciudad de Mexicali y el Valle se localiza en una zona altamente dinámica de acuerdo al atlas de peligros, lo cual indica que es vulnerable ante la actividad sísmica que tiene como origen las fallas activas del sistema San Andrés, en general este sistema abarca gran parte de California en los Estados Unidos de América y se extiende al sur hasta el Golfo de Baja California en México.

Algunas de las fallas que componen este sistema en la parte mexicana son la falla Cerro Prieto, Laguna Salada, Borregos e Imperial, entre otras, que en contadas ocasiones han mostrado la fuerza destructiva de los sismos en ciudades y sobre todo como causantes de pérdidas humanas.

Es en este tema donde la comunidad científica sigue dedicando esfuerzos en la aplicación de estrategias enfocadas en conocer los procesos que están relacionados con el origen de los sismos. Una posibilidad para determinar estos procesos se centra en la idea de pronosticarlos a partir de mediciones superficiales directas, es decir, investigar de manera directa en superficie los procesos deformantes del subsuelo mediante técnicas geodésicas.

Pero ante este panorama propuesto surgen preguntas como:

- ¿Sera posible relacionar los desplazamientos o deformaciones del subsuelo con la falla Imperial?;
- ¿Se tienen técnicas geodésicas confiables o precisas para determinar los desplazamientos o deformaciones entorno a la falla Imperial?;
- ¿Se podrá estimar las deformaciones causantes de sismos entorno a la falla Imperial?;
- ¿Cuánto tiempo es necesario para obtener resultados confiables?

Esta y otras preguntas son el objeto directo a desarrollar en este trabajo entorno a las deformaciones ocurridas en la falla Imperial y que son de gran interés para el pronóstico de sismos en el municipio de Mexicali. Además, se pretende concientizar a las autoridades a regular, a través de documentos como el Atlas de Riesgos, el crecimiento de los asentamientos humanos que son sensibles a estos fenómenos.

El Atlas de Riesgos de Baja California en su más reciente versión publicada por el gobierno del estado y bajo la dirección de Ley-Garcia (2010) menciona las zonas que tienen probabilidades de estar en riesgo o peligro por movimiento sísmicos. Entorno a esto, se contemplan algunas soluciones que han resuelto parcialmente el problema con la premisa de limitar el crecimiento hacia estas zonas, desconociendo si estos eventos pudieran ocurrir en un futuro cercano o no ocurrir.

Aunque esto no ha dado resultados ya que el crecimiento de la ciudad y comunidades del Valle ha sido en los últimos años en dirección oriente, hacia el trazo de la falla Imperial, cuya actividad sísmica históricamente tiene gran importancia para México y Estados Unidos de América.

Comúnmente, la forma de medir dichos movimientos se realiza con instrumentos que funcionan una vez que el sismo ocurre o posterior (co-sísmico y post-sísmico, respectivamente). Sin embargo, aún se encuentra en discusión si es posible conocer con precisión los efectos directos en superficie antes de un sismo (**movimientos pre-sísmicos**) considerando la existencia de esfuerzos y desplazamientos elásticos previos al rompimiento inelástico con el consecuente disparo del sismo. Por mucho tiempo, extensas investigaciones han mostrado ser inviables, al aplicar la solución de problemas inversos para la resolver el problema del pronóstico sísmico, ya que dichos problemas inversos resultaron incorrectos, lo que condujo a la crisis actual del problema (Pevnev, 2009).

Entonces si hubiera deformación previa al rompimiento sísmico (hipocentro), posiblemente exista expresiones en superficie entorno a la zona del epicentro que se pueden observar con mediciones geodésicas precisas y que ayuden a resolver el problema de pronóstico sísmico, a partir de las deformaciones en superficie (Johnson, H. O. *et al.*, 1994; Gerasimenko *et al.*, 2000; Lyons *et al.*, 2002).

Algunas de las técnicas geodésicas conocidas que se han aplicado entorno a los desplazamientos o deformaciones en superficie son la interferometría de Radar (Por ejemplo: InSar, PsSar o SqueeSar), observaciones permanentes de Sistema de geo- posicionamiento global (GPS: por sus siglas en inglés) microgravimetría (gravimetría de precisión), en donde estas dos últimas son las de importancia para desarrollar y aplicar en este trabajo.

1.3. Justificación

En 2014 se publicó la versión más reciente del Atlas de Riesgos de Mexicali en el que se plasman los agentes naturales que ponen en riesgo o peligro la vida de la ciudad y del Valle de Mexicali (Mendoza-Garcilazo, 2014). El enfoque general de la mayor parte de los estudios se centra en las zonas agrícolas al sur de la ciudad de Mexicali, pero de cierta forma quedan parcialmente cubiertos los peligros por sismos en la ciudad.

Es conocido que al sur del Valle de Mexicali se localiza la planta geotérmica de Cerro Prieto administrada por Comisión Federal de Electricidad, en el que por más de 40 años se ha explotado vapor para generar electricidad. Es a partir de la información generada en el campo y otros estudios de instituciones educativas que se ha conocido la deformación que es causado principalmente por fallas en la zona sur- sureste del área de estudio (Carnec *et al.*, 1999; Glowacka *et al.*, 1999; Glowacka *et al.*, 2005; Suarez-Vidal *et al.*, 2007; Suárez-Vidal *et al.*, 2008; Glowacka *et al.*, 2010; Sarychikhina *et al.*, 2010; Sarychikhina *et al.*, 2011). Otros estudios al norte de la zona de estudio indican desplazamientos anuales de al menos 36 a 46 mm/año en la falla Imperial (Lisowski *et al.*, 1991; Lyons *et al.*, 2002).

Por otra parte, estudios de nivelación precisa realizados desde 1961 y previos al sismo de San Fernando en 1971 en el sector norte de la falla de San Andrés indicaron cambios en la componente

vertical atribuidos a movimientos del terreno producidos previos al sismo (Castle *et al.*, 1974; Castle *et al.*, 1975).

Recientemente, en el área de estudio se determinaron cambios de altura de hasta 0.24 m de subsidencia en el banco P2A4 (Astrid-Moreno, 2016), lo que confirma que las deformaciones en la componente vertical son significativas en la zona de estudio.

Las condiciones geológicas son complejas, por lo que es necesario tener monitoreadas las deformaciones verticales y horizontales de la falla Imperial en el que, por episodios sísmicos históricos, se conoce el poder destructivo a lo largo del trazo del sistema de fallas de San Andrés (Thomas *et al.*, 1996).

Por lo tanto, es posible que el desplazamiento de la falla Imperial o subsistemas asociados al mismo generen cambios verticales que se podrían expresar como deficiencias de volumen o cambios en la altura de sitios específicos en el subsuelo (Johnson *et al.*, 1994). Dichos cambios de altura pueden ser cuantificados con microgravimetría y complementados con el análisis horizontal con técnicas GPS de doble frecuencia que han demostrado precisión para determinar áreas de riesgo o peligro en zonas volcánicas o de subsidencia causada por la explotación de acuíferos o zonas con características similares a la falla Imperial que es el objeto de estudio (Brown *et al.*, 1991; Johnson, H. *et al.*, 1994; Gerasimenko *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2007; Hautmann *et al.*, 2010).

La aplicación de la microgravimetría y de GPS es de gran interés para desarrollar en la zona oriente de la ciudad de Mexicali con el fin de monitorear los cambios superficiales y a su vez detectar zonas vulnerables de sufrir un sismo en el corto o largo plazo y que se encuentren asociados al sistema de fallas Imperial.

Los resultados obtenidos servirán como un parámetro directo de la respuesta de la superficie que investigadores, instituciones educativas o gubernamentales del área de la geofísica, geodesia, geología o de protección civil utilizaran para mejorar las políticas de crecimiento poblacional de las zonas de mayor deformación superficial y que pueden ser susceptibles a ocurrir un sismo de magnitud considerable en el futuro cercano.

1.4. Hipótesis

Recientemente, los estudios de la RGFI al oriente de Mexicali han encontrado desplazamiento horizontales de hasta de 0.065 a 0.011 m en los puntos P2A1 y P3A1 en el período de marzo a junio de 2012 y 2013, respectivamente (Romero-Andrade, 2014). Por otra parte con estudios de nivelación de alta precisión determinaron cambios de altura en el rango de 0.19 a -0.24 metros en los bancos P2A9 y P2A4 de 2013 a 2015, respectivamente (Astrid-Moreno, 2016).

Afirmando que los procesos deformantes entorno a la falla Imperial continúen regularmente en el período de 2014 a 2016, se podría esperar que las observaciones en la RGFI encuentren cambios de altura mayores a 15 a 18 μGal en un período mayor a 6 meses. En tanto que horizontalmente se observen deformaciones mayores o iguales a 0.025 m de 2014 a 2016.

1.5. Objetivos

Estimar la deformación superficial en la falla Imperial en la RGFI, al oriente de la ciudad de Mexicali, con GPS durante 2014 a 2016 y con microgravimetría de 2015 a 2016.

1.5.1. Objetivos Particulares

- Realizar mediciones microgravimétricas en la RGFI de 2015 a 2016.
- Realizar mediciones GPS en la RGFI durante el período 2014 a 2016.
- Estimar los valores de la deformación a partir de las observaciones de gravedad y GPS en red geodésica UAS-CICESE-UABC.
- Interpretar en conjunto los valores estimados de gravedad y GPS para el período 2015 a 2016.
- Clasificar zonas estadísticamente significativas de acuerdo a su movimiento por efecto probable de la falla Imperial.

2. Capítulo 2. MARCO DE REFERENCIA.

2.1. Teoría de la Deformación Sísmica.

2.1.1. Teoría del Rebote Elástico.

Después del terremoto de San Francisco en 1906, se formuló la teoría sobre el mecanismo de ruptura producido por un terremoto o movimiento sismogénico. Esta teoría es conocida como “Rebote Elástico” y propone que un terremoto es resultado de la deformación del suelo a lo largo del cual, la energía acumulada es liberada cuando sobrepasa la resistencia de la roca se libera en forma de ondas sísmicas, mismas que se transmiten a través de toda la Tierra (Reid, 1910; Tavera, 1992).

La teoría del rebote elástico, tomó importancia cuando se estableció la expansión de los fondos oceánicos en 1965. En efecto, la mayoría de los terremotos son generados por la interacción de placas tectónicas, donde su frontera es delimitada por una secuencia de sismos (Nishenko, 1985). La deformación lenta, seguida de una fracturación rápida de la litosfera es debida a los movimientos laterales de estas placas, sobre las capas más profundas y más calientes. El desplazamiento de las placas, generan una acumulación de esfuerzos y deformaciones que conducen a un rebote elástico de la zona sismogénica (primeros 20 km de litósfera).

Por otra parte, el concepto de “ciclo sísmico” está fundado en la comprobación de que los terremotos de cierta importancia (magnitud >6) van a repetirse a periodos de tiempo regular aproximadamente en el mismo lugar (Fedotov, 1968). Para la mayor parte de los terremotos, se puede considerar 4 etapas relacionadas con el ciclo sísmico:

El primero es el relajamiento de los esfuerzos elásticos acumulados en la zona por la ruptura de una falla denominado “etapa co-sísmica”. El periodo siguiente es la ruptura durante el sismo se llama “etapa post-sísmica”. La tercera fase es la re-acumulación gradual de esfuerzos que ocurre durante la “etapa inter-sísmica” que ocupa más del 90% de la duración total del ciclo sísmico, por ejemplo, los sismos relacionados con la falla imperial tiene un intervalo de 32 ± 10 años (Sykes *et al.*, 1984). Cuando etapa acaba, un periodo de comportamiento anormal puede ocurrir, antes de la próxima ruptura, que se llama etapa pre- sísmica, en la cual fenómenos físicos anormales podrían ocurrir, como por ejemplo: un periodo de deformación lenta, o de deformación rápida; ausencia o aumento de la sismicidad; variaciones en la propagación de las ondas sísmicas (razón VP/VS, anisotropía, factor Q); cambio de algunos parámetros hidrológicos (nivel de pozos, emisión de radón, presión, composición química), y en las propiedades geofísicas del subsuelo (resistividad, densidad); deslizamiento asísmico (deslizamiento lento episódico sin emisión de ondas sísmicas) que produce hundimientos o levantamientos graduales de la corteza según la posición del punto con respecto al epicentro y el mecanismo del futuro terremoto. El conjunto de fenómenos mencionados que preceden a un terremoto son llamados precursores (Fedotov, 1968; Ellsworth *et al.*, 1981; Scholz, 1988).

De acuerdo con Tavera (1992), es importante que para comprender el mecanismo de la zona sismogénica, es necesario estudiar la relación que existe entre la deformación pre-sísmica y el proceso de ruptura (co-sísmica). Este conocimiento permitirá evaluar el riesgo sísmico y la

prevención de terremotos paralelamente a los métodos probabilísticos y deterministas en el que los procesos co-sísmicos, son actualmente conocidos con buena aproximación debido a los estudios de la fuente sísmica (hipocentro) a partir de modelos detallados y geometrías precisas de la fuente sísmica y zonas circundantes del fenómeno complejo del sismo (Tavera, 1992).

Para el estudio de la deformación pre-sísmica se tiene precedente de investigaciones que convergen en la misma formulación aplicada por Savage *et al.* (1973), obtenida a partir del análisis de información geodésica (nivelación y GPS) para determinar el desplazamiento en fallas originado por el movimiento de la placa del Pacífico con respecto de la placa Norteamericana en un porción del sistema de Fallas de San Andrés (Lisowski *et al.*, 1991; Gerasimenko *et al.*, 2000; Lyons *et al.*, 2002; Jiang *et al.*, 2016).

De esa misma manera este trabajo se centra en el modelo simple de deformación horizontal de una falla de rumbo con longitud infinita de Weertman (1964) y utilizado en condiciones similares a la de la falla Imperial en el que el desplazamiento en superficie (D ; mm/año) causado por el movimiento horizontal lateral- derecho de la falla es representado por la siguiente ecuación:

$$D(x) = -\frac{V}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{x}{H}\right)$$

Ecuación 2-1

Donde V es la velocidad promedio (mm/año) del deslizamiento de la falla, x (km) es la distancia perpendicular a la falla y H (km) es la profundidad a la zona bloqueada (*locked zone*), medida desde la superficie hasta la zona de deslizamiento libre, la cual en algunos casos coincide con la profundidad de la zona sismogénica. Este último parámetro puede variar entre 6 a 22 km en zonas sísmicas al sur del sistema de fallas de San Andrés cercanas al área de interés de este trabajo (Smith-Konter *et al.*, 2011). Por otra parte Lyons *et al.* (2002), a partir de observaciones GPS, estimo que el H (*locked zone*) optimo es de 5.6 ± 3.0 km para el sector norte de la falla Imperial, incluyendo un deslizamiento lento (*creep*) a una profundidad menor a 3 km.

Tomando en cuenta dichos parámetros en la figura 2-1 se muestra el modelo de deformación unidimensional intersísmico producido por el desplazamiento horizontal derecho de la FI (falla Imperial), en donde se observa que el desplazamiento decrece conforme disminuye la distancia a la falla, en ambos lados de la misma.

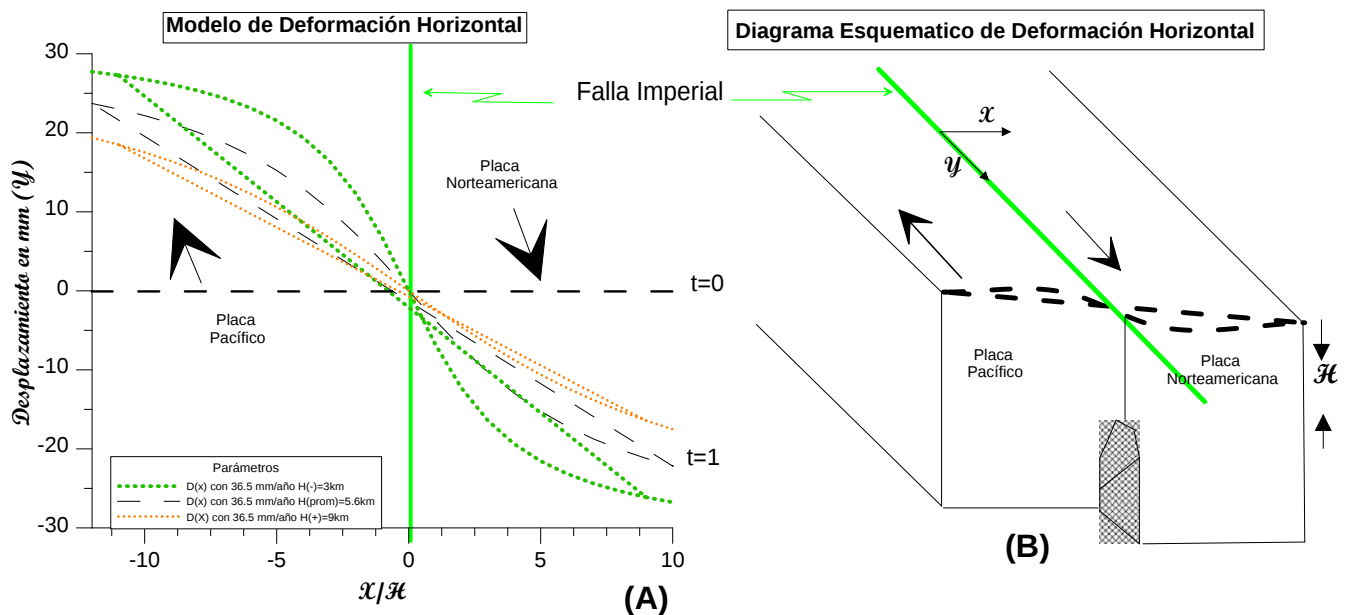


Figura 2-1. Modelo de deformación horizontal superficial de la falla Imperial, a partir de los parámetros de Lyons *et al.* (2002). El gráfico (A) corresponde a la proyección en planta del desplazamiento con 36.5 mm/año de deformación horizontal y con una profundidad de bloqueo (locked zone) de 5.6 ± 3 km. Derecha (B) modelo esquemático de deformación, en el que se muestra que el deslizamiento (Creep) ocurre a profundidades mayores que H .

Así mismo, se infiere por el modelo que a profundidades someras de la *locked zone* ($H < 5.6$ km) la deformación horizontal superficial es mayor que a profundidades de bloqueo mayores ($H > 5.6$ km) considerando la misma tasa de deformación por año (36.5 mm/año). Aunque la deformación en ambos lados de la falla es simétrica, en la realidad esto no se cumple debido principalmente a heterogeneidades geológicas. Por esta razón es importante considerar rangos que mejor ajusten a la zona de estudio, pero conservando el contexto de los antecedentes citados.

2.1.2. Historia Sísmica del Valle de Mexicali.

El municipio de Mexicali se encuentra catalogada en el país como las zonas con mayor riesgo sísmico ya que se encuentra sobre el sistema activo de fallas de San Andrés que es originado por el desplazamiento de las placas tectónicas del Pacífico y Norteamericana.

La energía acumulada en el sistema de fallas de San Andrés por el desplazamiento de las placas es transferida a través de toda su extensión por fallas y estructuras geológicas de menor dimensión. Algunas de las fallas geológicas que se conocen en el Valle de Mexicali son la falla Cerro Prieto, falla Cucapah y falla Imperial donde a partir del análisis de eventos sísmicos y otros estudios geológicos se localizado en superficie la traza de las mismas (Thomas *et al.*, 1996; Suárez-Vidal *et al.*, 2008; Fletcher *et al.*, 2009; Fletcher, 2014; Ramirez-Ramos *et al.*, 2014; Jerrett, 2016) (Figura 2-2). La falla Imperial es uno de estos sistemas en constante movimiento que por su ubicación y extensión representa un riesgo sísmico para la zona este de la ciudad y para más de 900 mil habitantes de acuerdo al último censo (INEGI, 2015).

La falla Imperial (FI), se localiza en las inmediaciones del Ejido de Saltillo con dirección aproximada de $N42^\circ W$ hasta el oriente de la ciudad de Mexicali, en la parte de México, más hacia

el norte en Estados Unidos de América se conoce que la falla Imperial lleva un trazo al sur de la ciudad de Brawley, aproximadamente, se ha determinado que tiene una longitud total de 75 km. Además, es la principal conexión entre el sistema San Andrés y las estructuras del Golfo de California, aunque en algunos segmentos sin tener una buena expresión geomorfológica (González, 1990).

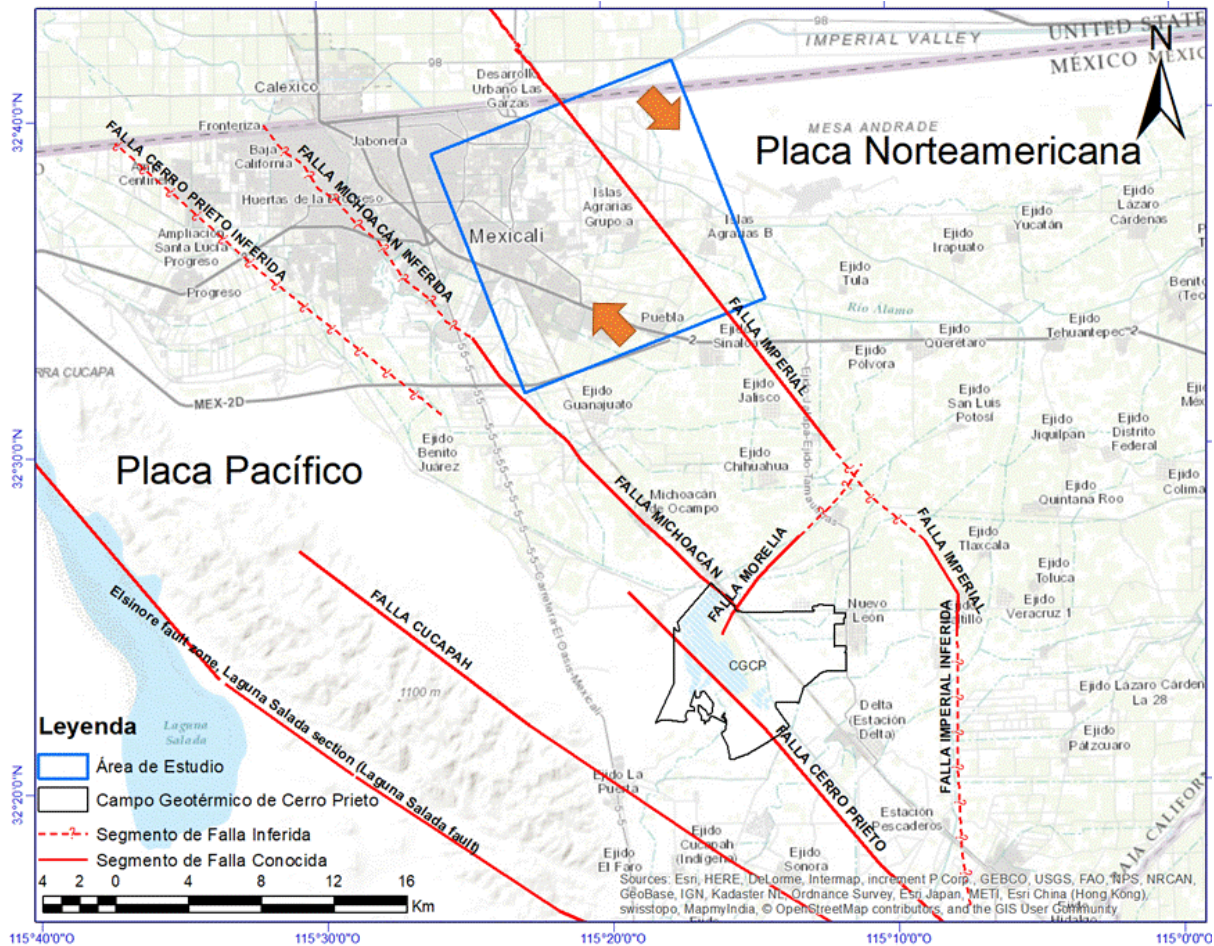


Figura 2-2. Sistemas de fallas presentes en el Valle de Mexicali. Recopilación de diferentes autores (González, 1990; King *et al.*, 1998; Meltzner *et al.*, 2006; Chanes, 2012; Rockwell *et al.*, 2013), CGCP- Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Recuadro azul sobre área de estudio de la falla Imperial; Flechas naranjas en el área de estudio mostrando desplazamiento horizontal principal de la FI.

Se estima que la velocidad de desplazamiento es de 30 a 42 mm/año (Bennett *et al.*, 1996), 36.5 mm/año (Lyons *et al.*, 2002) y hasta 46 mm/año (Lisowski *et al.*, 1991) y se le asocian los temblores de El Centro y Valle Imperial, ocurridos el 18 de Mayo de 1940 y el 15 de Octubre de 1979, respectivamente. El primer evento con una magnitud en la escala de Richter de 7.1 el segundo de 6.6 (King *et al.*, 1998), respectivamente. El mecanismo focal del sismo Valle Imperial o Mexicali indican que es una falla de rumbo con desplazamiento lateral derecho y la profundidad del foco sísmico (hipocentro) se estimó alrededor de los 10 km (Chavez *et al.*, 1982).

Aunque no son los únicos sismos históricos localizados alrededor de la traza de la falla Imperial también se pueden encontrar otros eventos como los mostrados en la figura 2-3 (Chanes, 2012).

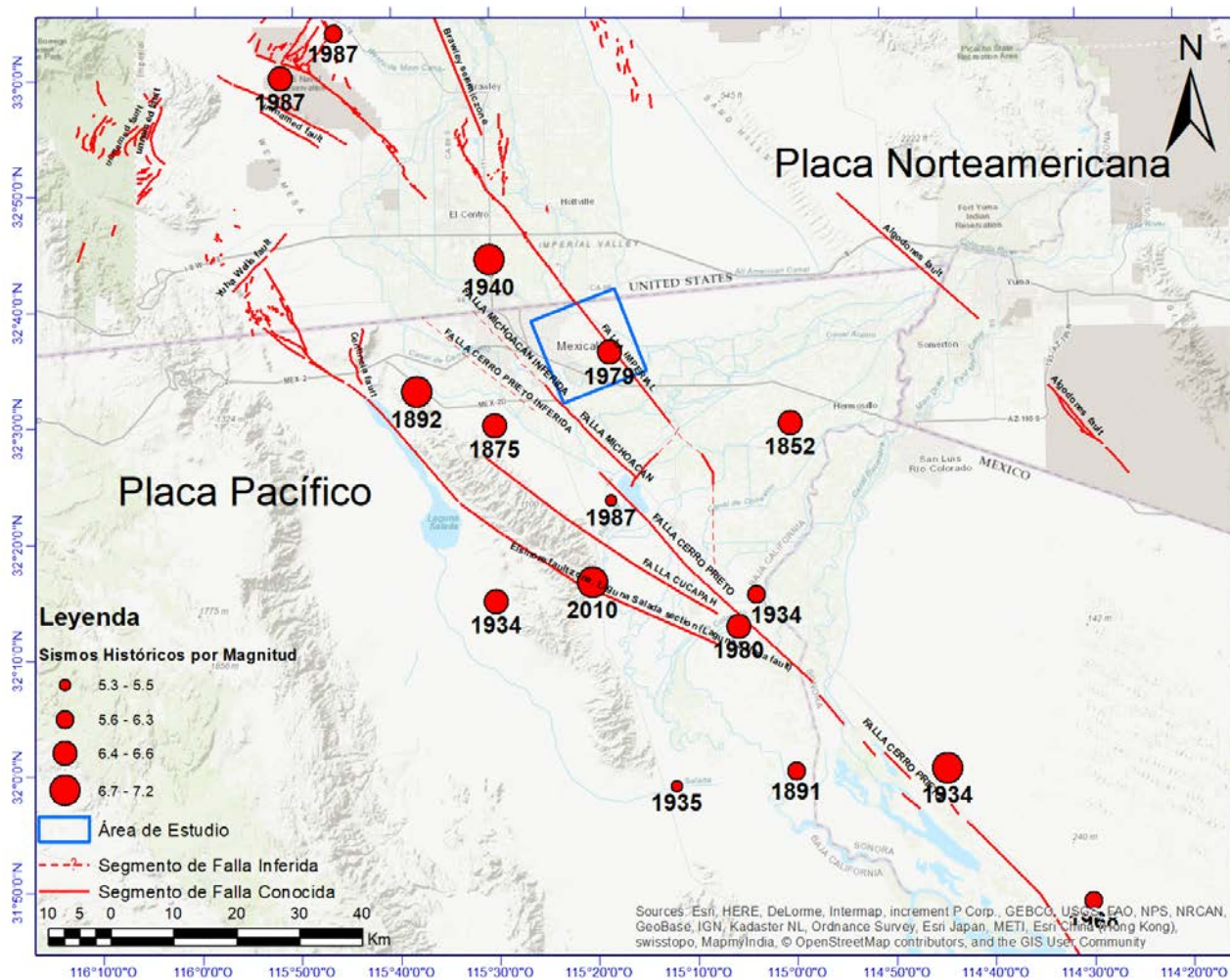


Figura 2-3. Actividad sísmica histórica clasificada por magnitud del Valle de Mexicali, Baja California, México. Recuadro azul corresponde a la zona de estudio; Segmento continuo corresponden a fallas conocidas y líneas discontinuas segmentos inferidos de falla geológica. Modificada de Chanes (2012).

De acuerdo a su ubicación la falla Imperial colinda con los límites de la actual expansión de la mancha urbana de Mexicali. Como se puede observar en la figura 2-2 y 2-3, la ciudad de Mexicali se asienta en una región con alto peligro por la presencia de diversas fallas. Conforme la ciudad sigue creciendo se acerca a zonas de fallas o estructuras geológicas (Ley-García, 2010).

2.1.3. Catálogo de Sismos

En la actualidad la ciudad de Mexicali y alrededores se encuentra monitoreada por redes sísmicas que tienen disponibles bases de datos actualizadas e históricas. Con fines del presente trabajo se realizó la compilación y localización de acuerdo a su magnitud de los eventos sísmicos en el área de estudio y alrededores reportados de 2011 a 2017 de la Red Sísmica del Noroeste (RESNOM) y del Tecnológico de California- Servicio Geológico de Estados Unidos- (USGS-Caltech, por sus siglas en inglés), que se muestran a continuación.

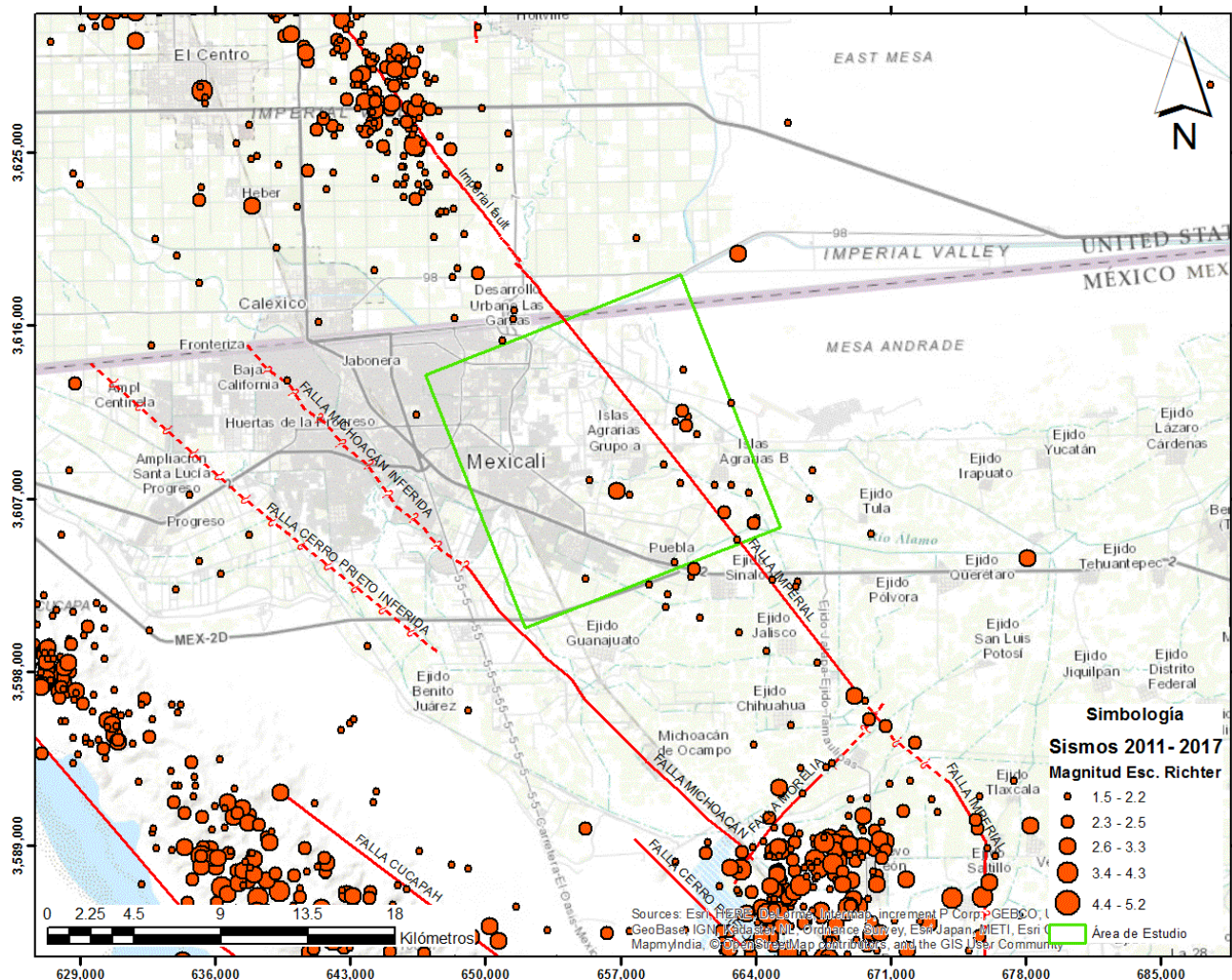


Figura 2-4. Actividad sísmica clasificada de acuerdo a su magnitud (grados en la escala de Richter) en la zona de estudio y alrededores de 2011 a 2017. Consultada de RESNOM y USGS-Caltech (RESNOM, 2015; USGS, 2017).

A partir de esta figura, se observa que en el Valle de Mexicali se localizaron diversos eventos de 1.5 y hasta 5.2 grados en la escala de Richter, pero en la zona de estudio se observa poca actividad sísmica (sismos $< 3.3^\circ$ en la escala de Richter) en el período presentado, pero al sur y norte de la misma se tiene mayor actividad. Esto podría indicar la acumulación de esfuerzos en el subsuelo y exista la posibilidad de deformaciones asísmicas que pudieran ocasionar sismos en el área de interés. Por lo tanto, el inicio de una red de monitoreo geodésico con métodos gravimétricos y GPS entorno a la falla Imperial son de gran importancia, considerando la actividad sísmica.

A continuación, se mencionan los fundamentos de los métodos utilizados en este trabajo, esto por lo tanto nos llevará a entender el principio de los equipos utilizados en el mismo y como se relacionan con los objetivos perseguidos sobre las deformaciones asísmicas.

2.2.Fundamentos del Método Gravimétrico

La gravedad es una de las fuerzas de la naturaleza relacionada con atracción entre todas las masas. La medición de esta fuerza es denominada gravimetría que comprende el estudio de las variaciones del campo gravitatorio terrestre ocasionado por los contrastes laterales de densidad en el subsuelo (Telford *et al.*, 1990; Niebauer, 2007). Los fundamentos del método gravimétrico parten de las leyes de Isaac Newton y son ampliamente desarrolladas en el trabajo de Telford *et al.* (1990), del cual se deriva la primera ecuación (2-2):

$$F = \frac{GM_T M_1}{r^2} \text{ Newton (N)}$$

Ecuación 2-2

Donde:

- G = constante de gravitación universal equivalente a $6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
- M_T masa de la Tierra y M_1 la masa atraída por la Tierra, en kilogramos, y
- r es la distancia entre las masas M_T y M_1 que se están atrayendo.

El incremento de la velocidad, durante cada segundo, con que se desplaza la masa 1 (M_1), debida a la fuerza de atracción de la masa de la Tierra, se llama aceleración de la gravedad o gravedad “g”, cuya magnitud está dada por:

$$\frac{F}{M_1} = g = \frac{GM_T}{r^2} \text{ en m/s}^2$$

Ecuación 2-3

2.2.1. Campo gravitatorio de la Tierra y sus variaciones

La forma de la Tierra es una consecuencia del balance entre la aceleración gravitacional y la aceleración centrípeta “c” (debida a la rotación de la Tierra) causando una ligera deformación para formar un esferoide ligeramente aplanado (0.335%) en los polos. Tanto la aceleración gravitacional y la aceleración centrípeta dependen de la distancia a un punto, ambas tendrán un potencial, el cual es definido como el trabajo realizado al trasladar la masa M_1 de un punto a otro en el campo de fuerza gravitacional. La magnitud del potencial gravitacional, despreciando el potencial debido a la rotación de la Tierra, será inversamente proporcional a la distancia de separación entre las masas:

$$V = \frac{GM_T}{r^2} \text{ en m/s}^2$$

Ecuación 2-4

El potencial, es una representación escalar del campo gravitacional y será constante a lo largo de una superficie definida por la distancia entre la distancia del centro de la Tierra y el punto de atracción. Las superficies equipotenciales del campo de gravedad no son paralelas entre sí, tienden a separarse en el Ecuador y juntarse en los polos. Son interceptadas perpendicularmente por la línea de la plomada (curvatura del vector de gravedad). La superficie equipotencial que mejor ajusta al nivel del mar de una determinada época se llama geoide y es la superficie que mejor

representa la figura física de la Tierra, además es tomada como el nivel de referencia del sistema de alturas (Telford *et al.*, 1990).

La gravedad promedio de la Tierra es de 9.80 m/s^2 . En el ecuador se reduce a 9.78 m/s^2 y en los polos se incrementa a 9.83 m/s^2 , los valores son reflejo de la distribución y forma de la Tierra en los polos y el ecuador (Seigel *et al.*, 1995).

En lugar de utilizar m/s^2 para la aceleración es más frecuente el uso del Gal, del cual su equivalencia es:

- $1 \text{ cm/s}^2 = 1 \text{ Gal}$

En general, dadas las precisiones exigidas en las mediciones gravimétricas y microgravimétricas, suele utilizarse el miliGal (mGal) o microGal (μGal):

- $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ Gal}$
- $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ Gal}$

Los gravímetros están separados en dos categorías: absoluta y relativa. Los gravímetros absolutos se pueden definir como cualquier dispositivo o instrumento que mide la gravedad directamente en términos de unidades estándar de tiempo y longitud (m s^{-2}). Los primeros gravímetros absolutos utilizaban el péndulo físico en los que el período se relaciona con la ubicación del centro de masas y la gravedad. El péndulo fue eventualmente reemplazado por un medidor de gravedad absoluta de caída libre que monitorea el descenso de un cuerpo que cae libremente usando estándares de láser y estándares de tiempo atómico (Niebauer, 2007).

Por otra parte, los instrumentos de gravedad relativa varían mucho en la construcción y el tipo de materiales que se usan, pero básicamente son siempre algún tipo de masa suspendida por un resorte. El material de resorte puede ser algún tipo de metal de baja expansión o cuarzo. El muelle puede ser incluso un campo magnético superconductor que produce una suspensión de muy baja fricción (Niebauer, 2007).

La diferencia entre estos instrumentos radica en que los gravímetros relativos miden indirectamente la aceleración de la gravedad, midiendo el estiramiento de la masa suspendida por el resorte que es directamente proporcional a una constante de fuerza, que debe calibrarse (Niebauer, 2007; Miranda *et al.*, 2013).

2.3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El desarrollo de las tecnologías basadas en el sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) está en constante crecimiento, con diversas señales que en la actualidad se captan por nuevos sistemas y que mejoran la calidad de posicionamiento. El objetivo principal de cualquier sistema GPS es simple, es el definir la posición de un objeto en la superficie terrestre, el medio por el cual se da esta comunicación se obtiene a partir de un emisor y receptor. Los emisores son satélites que conforman constelaciones en orbitas definidas alrededor de la Tierra, este a su vez emite señales electromagnéticas de onda específica hacia la superficie terrestre y finalmente el receptor es el que decodifica la información para obtener la posición en determinado momento.

La idea del GPS inicio en los años 60's para fines militares en los Estados Unidos de América, ya que representaba un gran adelanto como sistema estratégico de alcance global. Pero los alcances rebasan los fines militares y se expandieron a numerosas áreas de la investigación y en recientes casos para la aplicación civil con sus ciertas restricciones. Pero los estadounidenses no fueron los únicos en desarrollar sus sistemas GPS, también la URSS construyo un sistema similar denominado TSICADA.

Cada uno de los sistemas tenía sus limitantes en precisión, pero con los años la evolución de los sistemas ha mejorado el diseño de los GPS y satélites, dando como resultado las constelaciones de NAVSTAR y GLONASS, perteneciente a los estadounidenses y rusos, respectivamente.

En la actualidad existen más constelaciones como BEIDU, QZSS, Galileo, administradas por diferentes agencias espaciales, en este trabajo nos centraremos en el desarrollo de las constelaciones Navstar, que son las que se utilizaron en el proceso con los equipos GPS utilizados.

2.3.1. Descripción del Sistema GPS

2.3.1.1. Segmento Espacial (Constelación).

El objetivo del segmento especial es, a partir de las instrucciones que reciben del segmento de control, proporcionar una referencia de tiempo atómico, generar las señales RF pseudo- aleatorias, almacenar y reenviar el mensaje de navegación (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001).

El sistema de posicionamiento consta de tres segmentos:

- Espacial (satélite),
- Control (estaciones) y
- Usuarios.

El segmento espacial consiste en la operación de 24 satélites en órbita, uniformemente dispersos alrededor de la Tierra, que transmiten señales de varios componentes: frecuencia del portador, códigos digitales y mensaje de navegación. Las dos primeras señales se usan para determinar la distancia del receptor (usuario) a los satélites del GPS, principalmente. El mensaje de navegación contiene las coordenadas de los satélites como una función del tiempo, los signos transmitidos son controlados por relojes atómicos (rubidio y cesio) muy exactos colocados en los satélites.

Los satélites disponen de estructuras y mecanismo para poder mantenerse en órbita, comunicarse con el segmento de control y emitir las señales a los receptores. Además se identifican de diferentes maneras: por sus posición en el plano orbital dentro de las seis orbitas, por el número de catalogación de la NASA, por el numero internacional de identificación, por el código PRN (código pseudo- aleatorio de ruido) y por el número de la secuencia de lanzamiento (SVN) (Jiménez-Vega, 2006).

2.3.1.2. Segmento de Control.

Este segmento en general se compone por estaciones de tierra que se encargan del control, mantenimiento y configuración de satélites. Además, es el encargado de predecir las efemérides y el comportamiento de los relojes satelitales, actualizar el mensaje de navegación de los satélites. La composición de este segmento está definida por:

- Estación de control maestro (MCS, por sus siglas en inglés),
- Monitor de estaciones y
- Estaciones de control en tierra.

2.3.1.3. Segmento Usuario.

Básicamente es la instrumentación y programas con la cual debe contar el usuario para recibir y procesar las señales satelitales, se compone de antena de recepción, sensor (una frecuencia o doble frecuencia), el controlador y software de post- proceso.

Algunos equipos GPS son más sofisticados e incluyen ciertos accesorios integrados en unos solo, pero tienen el mismo funcionamiento en general.

2.3.2. Componentes de la Señal GPS y Posicionamiento Satelital.

El sistema GPS permite obtener posiciones precisas tridimensionales (X, Y y Z) referidas al sistema de referencia geocéntrico global WGS-84. A partir de estas posiciones tridimensionales se pueden obtener posiciones horizontales y altimétricas expresadas en coordenadas geográficas:

- Latitud (β),
- Longitud (λ) y
- Alturas elipsoidales (h).

2.3.2.1. Señal Satelital.

La señal satelital que actualmente es transmitida tiene un amplio espectro de señal que es sujeto a interferencias involuntarias. La clave de la precisión de los sistemas es que todos los componentes de la señal son controlados por relojes atómicos de gran precisión, de los últimos grupos satelitales enviados (Bloque II) tienen 4 estándares de tiempo a bordo, dos de rubidio y dos de cesio. En términos de frecuencia la estabilidad de los relojes puede alcanzar hasta 10^{-13} y 10^{-14} Hz durante un día. Esta precisión es el corazón de los satélites GPS y la base fundamental para la frecuencia de 10.23 MHz.

En consecuencia, cada satélite GPS trasmite en dos frecuencias de ondas de radio en la banda **L** denominadas **L1** (1.5 GHz) y **L2** (1.2 GHz). **L1** es la principal señal utilizada en diversas aplicaciones civiles y **L2** es utilizada para cancelar la mayor fuente de error, la refracción en la ionosfera, esto es porque la ionosfera se comporta como un medio dispersivo para la señal GPS, que será tratado más adelante.

Los pseudo- rangos son derivados de la medición que viajan en la señal en cada satélite hasta el receptor usando dos códigos de pseudo-rango ruido (PRN), estos son modulados en las dos bases portadoras, es decir, la transmisión se realiza utilizando técnicas de espectro ensanchado de ahí que todos los satélites transmitan con las mismas portadoras.

La señal **L1** es dividida en tres componentes:

- Onda portadora,
- Código de posicionamiento civil (C/A) y

- Mensaje de navegación (D).

Al igual la banda **L2** es dividida en:

- Onda portadora,
- Código de posicionamiento militar (P) y
- Mensaje de navegación (D).

El mensaje de navegación contiene información acerca de la deriva del reloj atómico del satélite, efemérides predichas por el segmento control terrestre para la órbita del satélite, coeficientes del modelo de ionosfera e información sobre el status de la constelación. Los códigos de posicionamiento PRN, C/A y el encriptado P (Y) son correlacionados (comparados) por el receptor GPS con una réplica de ellos generada internamente. Esto, junto con la información de las coordenadas del satélite (X_s, Y_s y Z_s) y de la velocidad de propagación de las ondas de radio (C, cercana a la velocidad de la luz en el vacío, $\sim 300,000$ km/s), permite al receptor estimar: el tiempo de propagación o retardo ($\Delta T = T_R$ tiempo de emisión de la señal del receptor $-T_s$ tiempo de emisión de la señal del satélite) de la señal transmitida por el satélite; la distancia ($R = C\Delta T$) del receptor a cada satélite avistado y, en consecuencia su propia posición (X_r, Y_r y Z_r), obtenida a partir de la solución de un sistema de ecuaciones con un mínimo de cuatro incógnitas de la forma:

$$R^j = \sqrt{(X_r^j - X_s^j)^2 + (Y_r^j - Y_s^j)^2 + (Z_r^j - Z_s^j)^2} + C\delta T$$

$$j = 1, 2, \dots, n(n \geq 4)$$

Dónde:

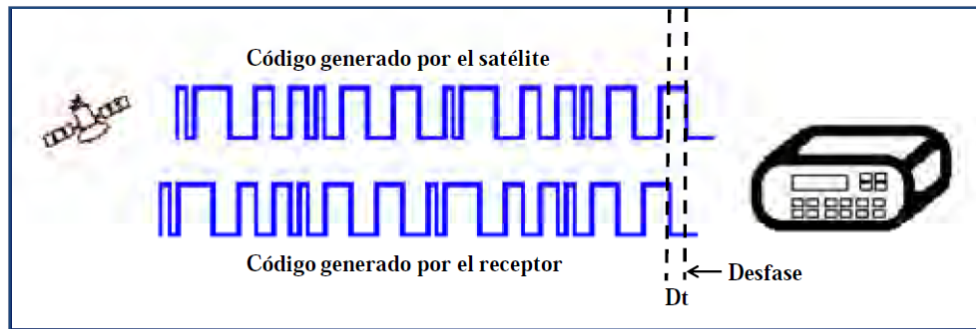
δT : Es el error de sincronía entre los relojes de los satélites avistados y del receptor (Pajares *et al.*, 2001; Ramón-Morales, 2010).

El problema de posicionamiento con observables de tiempo (C/A o P) se reduce a resolver cuatro incógnitas: 3 de posición y una de tiempo. Sin embargo, debido a que las distancias estimadas están afectadas por distorsiones de las señales portadoras a su paso por la atmósfera (ionosfera y troposfera), así como por multi- trayectorias que se producen cuando la señal sufre reflexiones por choques con objetos reflejantes en su camino hacia la antena del receptor, denominadas pseudo-distancias o distancias aparentes. Estos efectos afectan la precisión de la estimación de la posición del receptor.

Ambos, el mensaje de navegación (D) y el código de posicionamiento (C/A) son modulados (sobrepuestos) en amplitud sobre la señal **L1**, y así como con los códigos de posicionamiento (C/A o P), el receptor GPS puede correlacionar (Figura 2-5) la onda portadora **L1** con una réplica de ésta generada por el receptor para obtener información de la distancia a cada satélite, mediante la medición del efecto *Doppler* (cambio de la longitud de onda) entre una frecuencia portadora recibida del satélite y la misma frecuencia generada por el receptor. Para ambos códigos y ondas portadoras, el receptor puede correlacionar con una precisión de aproximadamente 0.3 % de un ciclo de onda o código *Chip* (intervalo de tiempo mínimo de transmisión de un cero o un uno en un pulso de código binario). Debido a que la frecuencia (aproximadamente 1500 MHz) de la onda

portadora **L2** es mucho mayor que la frecuencia (1 Mhz) de modulación del código civil (C/A), sus ciclos son mucho más cortos, por lo tanto, es posible hacer mediciones más exactas de las distancias del receptor a los satélites rastreados. Sin embargo, este método es muy complejo. Los códigos de posicionamiento GPS son diseñados de tal manera que cuando el código emitido por el satélite es exitosamente correlacionado con el código generado por el receptor, una distancia real (sin ambigüedad) al satélite es determinada.

Cada onda se mira igual que cualquier otra y la longitud de onda portadora en la frecuencia GPS L1 es apenas 19 cm (por comparación, la longitud de onda de un código *chip* C/A es de aproximadamente 300 m). El receptor puede determinar el ángulo de fase del ciclo registrado, pero no cuántas longitudes de onda caben entre éste y el satélite. Debido a que el receptor mide directamente el ángulo de fase de la onda portadora, las mediciones derivadas a partir de este procedimiento son llamadas datos observables de fase. Los receptores geodésicos de doble frecuencia (**L1, L2**) producen datos de mediciones de distancias, fases y posicionamiento, por lo tanto, la fase portadora puede utilizar con mayor exactitud para medir el intervalo hacia un satélite.



(a)

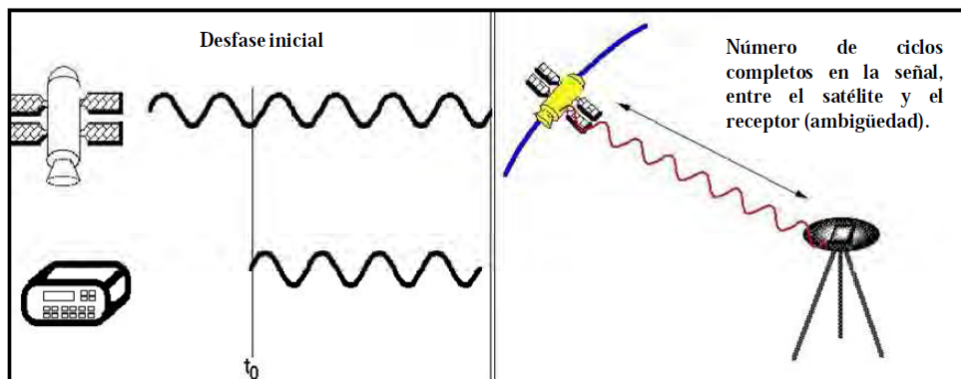


Figura 2-5. Correlación de los códigos generados por el satélite y el receptor que permite la medición del tiempo de recorrido de la señal y por lo tanto la pseudo-distancia entre el satélite y el receptor. a) Correlación C/A y b) correlación entre observables de fase. Tomado de Ramón-Morales (2010).

Mientras que los observables de tiempo (códigos C/A y P) dan una distancia sin ambigüedad entre el receptor GPS y el satélite, los observables de diferencias de fase de la portadora **L1** tienen una ambigüedad (N) causada por una fracción de longitud de onda, ya que solo se mide el número

entero de ciclos entre el receptor y el satélite. Para medir la intercalación con precisión, el motor de procesamiento debe resolver las “ambigüedad de fase”. Todos los paquetes de programas para procesamiento de datos GPS que calculan posiciones con una exactitud mejor de 5 cm ejecutan alguna forma de “resolución de ambigüedad de fase” (Ramón-Morales, 2010).

El primer paso para resolver ambigüedades en los ciclos de fase es hacer una estimación aproximada de la posición, utilizando datos de distancias. El número de ciclos desconocidos por cada fase medida se resuelve utilizando la combinación de mediciones redundantes en el tiempo con los cambios de geometrías de satélites (Nota: únicamente se necesitan rastrear 4 satélites para resolver una posición tridimensional, en la actualidad los receptores GPS modernos rastrean simultáneamente de 12 hasta 24 satélites, produciendo soluciones sobre- determinadas o redundantes). Una vez que la ambigüedad de ciclo es resuelta, los datos de fase pueden producir directamente una posición para cada punto, siempre y cuando, el receptor no pierda la señal emitida por el satélite. Cuando ocurre un bloqueo temporal de la señal, la ambigüedad del ciclo de fase debe recalcularse.

Los sistemas convencionales para posicionamiento basado en datos de fase requieren aproximadamente entre 30 minutos a una hora de registro de datos para resolver con cierto éxito la ambigüedad.

Un parámetro que es comúnmente utilizado en las mediciones GPS es la dilución posicional de la precisión PDOP (por sus siglas en inglés) que es resultado de la consistencia geométrica de los satélites observados que se suma a los errores provocados por interferencias durante la propagación de la señal GPS. Este efecto se conoce como dilución de la precisión, es decir, afecta la precisión de las mediciones desmejorando la precisión real, cuando mayor es el PDOP más desfavorable es la situación en las mediciones (Brinker *et al.*, 2012). Dado que se puede predecir la trayectoria de los satélites con almanaques, es posible elegir los horarios en los que el PDOP es favorable (<4), es decir cuando la ubicación geométrica de los satélites es la más consistente.

Para conseguir señales satelitales favorables de PDOP es importante que la medición esté libre de obstáculos como edificios, árboles, cerros y superficies de lagos, entre otros, que son interferencias en la recepción de la señal del satélite y produciendo reflexiones de la misma, por lo que se debe tener en cuenta desde la ubicación de los sitios de medición, cuando esta sea posible. Adicionalmente a estos factores, la pérdida momentánea de la señal hace que se pierda el control de fase que producen deslizamientos de ciclo pudiendo invalidar una medición. Estas anomalías en la señal se pueden controlar en el campo: aumentando el ángulo de elevación, que es conocido también como ángulo de la máscara de elevación sobre el horizonte a partir del cual se empezará a registrar la señal de los satélites, por abajo de los 10 grados las mediciones estarán fuertemente afectadas por la refracción atmosférica, lo que quiere decir que será necesario incrementar el intervalo de grabación (épocas) de la señal. Brinker *et al.* (2012) menciona que para tener mediciones confiables en redes geodésicas del orden 1ppm o mejor, es necesario considerar mediciones mayores a 45 a 90 minutos que corresponden a 135 a 270 épocas, respectivamente, lo que quiere decir que al permanecer más tiempo se mejorará la calidad de la medición (PDOP). Al concluir la sesión se podrá cambiar de sitio de medición.

Las señales GPS transmitidas por los satélites en las constelaciones, como ya se mencionó, portan información en forma de ondas electromagnéticas a través de tres zonas: Vacío, ionosfera y

troposfera, antes de ser recibida por el usuario en superficie. De acuerdo a la teoría el retardo se define como el incremento de tiempo de propagación de una señal en un medio, comparado con el tiempo de propagación en el vacío (Espinal-Zapata, 2015). La señal puede reflejarse, refractarse, difractarse y atenuarse debido a la interacción con dos capas de la atmosfera en específico: Ionosfera y Troposfera.

La troposfera induce retrasos en cualquier señal electromagnética que la atraviesa debido a los gases inertes causando el 90% del total del retraso, el efecto es estable y tiene que ver con la presión atmosférica y depende la de altura sobre el nivel de mar donde se toman las medidas. El 10 % restante es debido al vapor de agua presente, relativamente es más difícil de modelar, ya que puede cambiar rápidamente debido a las condiciones locales atmosféricas. En general el efecto troposférico puede causar una desviación de 1.9 a 2.5 m en la dirección cenital e incrementarse cuando decrece el ángulo de elevación, llegando hasta 20 a 28 m a unos 5° . En estos casos se recomienda el uso de modelos atmosféricos simplificados, por ejemplo: *Saastamoinen*, *Hopfield*, *Goad* y *Goodman*.

3. CAPÍTULO 3. MÉTODOS Y MATERIALES.

3.1. Prospección Gravimétrica (Microgravimetría).

La microgravimetría es un método geofísico que se utiliza en la modelación de estructuras geológicas del subsuelo y particularmente para observar los cambios que están asociados a dichas estructuras (Rymer, 1989). La técnica ha sido aplicada dependiendo de los avances tecnológicos en los instrumentos gravimétricos, ya que esto se ve reflejado en las últimas décadas por las precisiones mostradas en la determinación de cambios de gravedad en el subsuelo, por ejemplo, los cambios asociados a la actividad volcánica (Jousset *et al.*, 2003; Poland *et al.*, 2006; Carbone, Currenti, *et al.*, 2007; Carbone & Greco, 2007), sistemas geotérmicos (Sugihara *et al.*, 2008; Allis *et al.*, 2009; Hunt, Bromley, *et al.*, 2009; Hunt & Graham, 2009; Gabtni *et al.*, 2010; Nordquist *et al.*, 2010), cavidades en el subsuelo (Aldiss *et al.*, 2014; Pamukçu *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014; Pamukcu *et al.*, 2015), recarga de acuíferos (Galloway *et al.*, 2011), arqueología (Wynn, 1986) y en otros casos para determinar los cambios estructurales ocurridos en fallas geológicas por la actividad de la zona sismogénica (Chakraborty *et al.*, 2008; Trejo-Soto *et al.*, 2011; Pamukcu *et al.*, 2014).

Fundamentalmente la prospección gravimétrica consiste en determinar en cada estación (punto de medición) el incremento (positivo o negativo) de la gravedad con respecto a una determinada estación base o de referencia. Este mismo principio es el que se utiliza en el estudio de redes microgravimétricas, donde la medición (estimación de cambios gravimétricos) se vuelve más detallada, ya que las variaciones que se buscan se vuelven del orden de μGal , es decir, se buscan variaciones de masa muy pequeñas o cambios de altura en determinados períodos sobre extensiones relativamente pequeñas. Cada vez el estudio de redes se vuelve más importante en varios lugares del mundo y sus resultados suelen combinarse con otras técnicas geodésicas entre ellas se han mencionado investigaciones con GPS, nivelación convencional e incluso con interferometría de Radar (InSar o PsInsar) (Tizzani *et al.*, 2015; Shahbazi *et al.*, 2016).

Para lograr dichos avances en el estudio de redes geodésicas ha sido indispensable el avance tecnológico en los instrumentos o equipos geodésicos, particularmente en los equipos gravimétricos y GPS que han evolucionado significativamente en los últimos años. A continuación, se mencionan generalidades de los equipos utilizados en este trabajo.

3.1.1. Equipos Gravimétricos:

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos equipos gravimétricos relativos de la marca *Scintrex*, el primero es un gravímetro relativo *Autograv* CG-3 (Figura 3-1); el segundo equipo corresponde a un gravímetro *Autograv* CG-5 (figura 3-2), ambos instrumentos basados en similares características de medición.

El principio de medición de estos equipos se basa en un sistema elástico de cuarzo fundido en el cual la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte. Dicho mecanismo se encuentra dentro de una cámara aislada y controlada a una temperatura específica óptima para el funcionamiento del mecanismo. La medición se realiza a una frecuencia de 6 Hz durante un período de tiempo definido por el usuario, el cual como mínimo es de 1 segundo. Puede utilizarse en dos modos de levantamiento diferente, dependiendo de los objetivos del estudio. El

primero modo se refiere a mediciones discretas, donde el usuario define el muestreo de la adquisición; el segundo modo de levantamiento es denominado cíclico y es utilizado para el registro continuo de datos durante horas, días o meses (Scintrex, 2009; Miranda *et al.*, 2013). Dado los avances que presentan estos equipos el manejo de datos se puede realizar directamente de manera digital en programas o plataformas computacionales de procesamiento.

Cada modelo presenta características físicas diferentes que se mencionan a continuación.

3.1.1.1. Gravímetro Relativo CG-3M.

- Medición de hasta 7000 mGal.
- Resolución de 1 μ Gal.
- Realiza correcciones por deriva instrumental y marea gravimétrica de forma automática.
- Presenta una deriva instrumental de menos de 20 μ Gal/día.
- Teclado digital
- Niveles por medio de sistema electrónico
- Niveles de aguja
- Almacenamiento de datos
- Descarga de información por medio puerto paralelo.



Figura 3-1. Gravímetro relativo CG-3 de Scintrex.

3.1.1.2. Gravímetro Relativo CG-5.

Además de las características del modelo Cg-3 presenta:

- Protocolo de comunicación con ordenador.
- Pantalla de despliegue de información de niveles de equipo, estadística y graficado de datos.
- Niveles digitales
- Descarga de información por medio de interfaz USB.
- Ser bastante ligero y autonomía de hasta 8 horas.



Figura 3-2. Gravímetro relativo CG-5 de Scintrex. Izquierda descarga de datos a memoria externa vía cable serial RBS; derecha gravímetro relativo CG-5 conectado a fuente de alimentación externa.

3.1.2. Corrección de las Mediciones Gravimétricas:

3.1.2.1. Deriva Instrumental y Marea Gravimétrica.

El gravímetro, como todo instrumento de precisión, da lugar a lo que se llama deriva instrumental; es decir, que si efectuamos medidas sobre una misma estación a diversos intervalos de tiempo obtenemos valores ligeramente distintos (Bonvalot *et al.*, 1998; Reudink *et al.*, 2014).

Su corrección se efectúa suponiendo la variación es lineal entre estas lecturas (horas) y de forma proporcional al tiempo. Esta compensación puede realizarse ya sea por métodos gráficos o analíticos, en tal caso, la variación se calcula a partir de la expresión matemática de la deriva (Scintrex, 1995):

$$y(t) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{t_1 - t_0}(t - t_0)$$

Ecuación 3-1

Dónde:

- y_0 y t_0 : Es la lectura de gravedad y tiempo inicial de la estación inicial, respectivamente.
- y_1 y t_1 : Es la lectura de la misma estación, pasado un determinado número de horas.
- $y(t)$: es la variación de la lectura que sufrió la estación base y será la corrección por deriva correspondiente que será sumada o restada a la estación o estaciones subsiguientes.

Además de la deriva propia del instrumento, existen otras causas externas no controladas que pueden ser significativas pero calculables como las atracciones gravitacionales del sol y de la luna que causan el efecto de las mareas que dependen de la posición astronómica de ambos y de la latitud, siendo variable con el tiempo; estas fuerzas producen una pequeña deformación de la superficie terrestre (Seigel *et al.*, 1995; Niebauer, 2007).

Este efecto influye también sobre los gravímetros y para determinar el efecto de la atracción de estos astros, se puede obtenerse teniendo en cuenta que la gravedad de la Tierra está afectada por

la componente radial de la aceleración de marea y suponiendo a la Tierra como un cuerpo rígido, pudiéndose aproximar por la relación siguiente:

$$\frac{\partial V_{L,S}}{\partial r} = \frac{2}{r_{L,S}} V_{L,S} = \frac{3}{2} G M_{L,S} = \frac{3}{2} G M_{L,S} \left(\cos 2Z_t + \frac{1}{3} \right)$$

Ecuación 3-2

Donde $V_{L,S}$ es el potencial del Sol o Luna, G es la constante de gravitación universal, $M_{L,S}$ es la masa del Sol o la Luna, $r_{L,S}$ es la distancia entre los centros de la Tierra y el Sol o Luna, R es el radio de la Tierra (6368 km) y Z_t es ángulo cenital geocéntrico del Sol o Luna.

A partir de la ecuación 3-2 se define la atracción de los astros sobre la Tierra y para compensarlas se usa la expresión de Longman (1959), donde es indispensable conocer la latitud, longitud de cada estación medida (Scintrex, 1995; Bonvalot *et al.*, 1998; Scintrex, 2009).

Otros efectos naturales no controlados que se encuentran presentes en las observaciones son: efecto de aire libre, presión atmosférica, viento y ruido sísmico (Scintrex, 1995; Seigel *et al.*, 1995; Scintrex, 2009):

Que a continuación se explicaran como se compensaran.

3.1.2.2. Efecto de Aire Libre

El efecto de aire libre se deduce teóricamente de la atracción gravitacional de la Tierra, que es similar a la de una esfera con simetría central, como si su masa estuviera concentrada en su centro. Por lo tanto, a medida que uno se aleja de la superficie del nivel medio del mar (lejos del centro de la esfera), la atracción gravitatoria disminuirá inversamente al cuadrado del radio de la Tierra, dando lugar a lo que se conoce como cambios de elevación (Heiskanen *et al.*, 1967).

Es posible que los cambios de elevación (Δz) en referencia el nivel medio del mar sean de al menos -0.1% del radio de la Tierra, de tal manera que es posible determinar su efecto con gradiente vertical (Δg_{FA}) en términos de cambio de gravedad, como:

$$\Delta g_{FA} = \frac{-2GM_E \Delta z}{R_E^2} = -0.3086 \text{ mGal m}^{-1}$$

Ecuación 3-3

Para los objetivos de este trabajo el uso de la estimación de aire libre se aplicará a las observaciones gravimétricas con el fin de obtener la compensación a la altura entre la base del gravímetro y el nivel de referencia del banco utilizado, adicionando 89 y 98 mm a la altura para llevar la medición directamente al sensor en el CG-5 y CG-3, respectivamente (Figura 3-3).

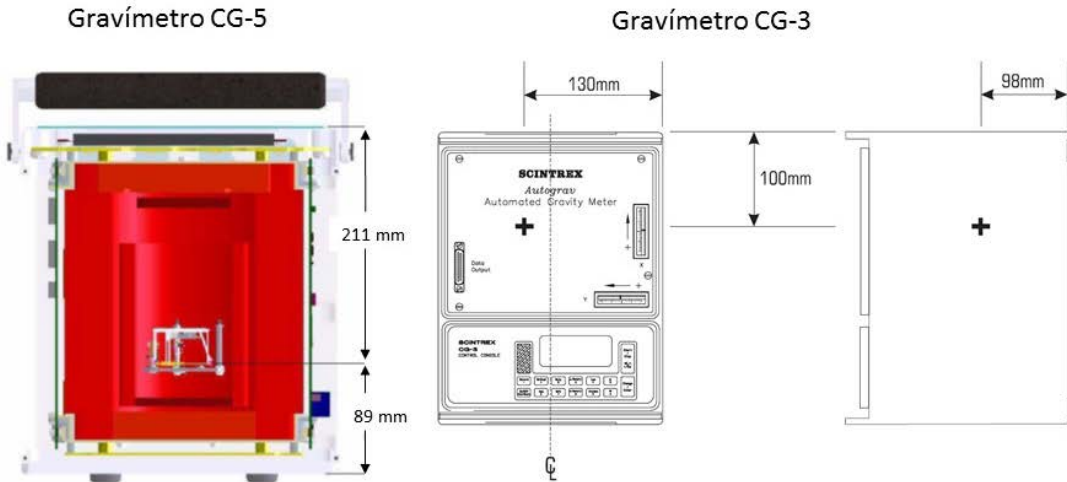


Figura 3-3. Diseño de los gravímetros CG-5 (izquierda) y CG-3 (Derecha). El diseño del CG-5 y CG-3 indican una altura de 89 y 98 mm, respectivamente, que será compensada a las observaciones realizadas por el instrumento en post-proceso.

3.1.2.3. Presión Atmosférica

Otro efecto presente en las mediciones es la denominada presión atmosférica (PA) que en microgravimetría se traduce como cambios de masa de la columna de aire sobre el punto de medición, Merriam (1992) estima que dichos cambios pueden estimarse hasta en $-0.3 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$, es decir, si existe un incremento en la presión atmosférica podría causar una disminución en la lectura gravimétrica, y viceversa (Warburton *et al.*, 1977; Merriam, 1992; Seigel *et al.*, 1995). Para obtener dicha compensación Merriam (1992) establece que la relación de cambios de presión atmosférica por cada milibar está dada por la relación:

$$\Delta g_p = -0.356 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$$

Ecuación 3-4

3.1.3. Mediciones de Gravedad en Red.

Una red gravimétrica consiste en un conjunto de estaciones o puntos con valores de gravedad absoluta o relativa distribuidas geográficamente de manera homogénea formando figuras cerradas de geometría diversa (polígonos, triángulos) enlazados entre sí. Las mediciones de gravedad son realizadas preferentemente en forma relativa trasladando el valor de gravedad de un punto con cota gravimétrica conocida al resto de las estaciones de la red. Las mediciones se suelen hacer en itinerarios de ida y vuelta o dobles itinerarios, procurando ser completados en el menor tiempo posible (<4 horas) para el control eficiente de la deriva del gravímetro, independientemente de que este realice la corrección por deriva y marea automáticamente, como es el caso de los gravímetros digitales (por ejemplo, Scintrex series CG). El tipo de itinerario se selecciona dependiendo de las distancias entre los vértices que conforman los polígonos de la red y la precisión que se quiera alcanzar en las mediciones gravimétricas. La precisión se controla al comparar el error de cierre con una tolerancia definida por la siguiente relación (Sevilla *et al.*, 1990):

$$T \leq e_a \sqrt{2u} + bt$$

Ecuación 3-5

Dónde:

- e_a : es la suma cuadrática de los errores accidentales (errores instrumentales, de calibración, efectos externos, cambios de gravedad temporales),
- u : es el número de ejes que forman el itinerario,
- b : es la pendiente de la función de deriva del gravímetro y
- t : Tiempo total en que se ha realizado el itinerario.

Siguiendo el proceso anterior se establece la red gravimétrica en circuitos cerrados; una vez determinados los valores de la aceleración de la gravedad en cada estación y habiendo corregido por deriva se puede hacer un ajuste libre o constreñido de la red si los errores de cierre caen dentro de la tolerancia. En caso de que el error de cierre sea mayor que la tolerancia se procede a repetir el polígono (Ramón-Morales, 2010).

3.1.4. Comportamiento Estadístico de Redes Gravimétricas.

Para revisar el comportamiento estadístico de una red, es importante definir el mínimo error detectable por pruebas de detección de errores groseros (*outliers*) y si hubiera perturbaciones en la red como afectarían los resultados.

La teoría de mínimos cuadrados se basa en el ajuste de tipo *Gauss- Markov* y que su formulación se puede analizar por medio de la estadística para detectar dichos errores groseros dentro de los puntos en los que se habrá que poner énfasis en determinar si el modelo propuesto es el adecuado para resolver el problema inicial.

Para aclarar estas y otras dudas sobre los modelos matemáticos y estadística, se deberá aplicar una serie de pruebas que permitan localizar y en caso depurar los posibles sesgos (errores) que pudieran ocurrir en el modelo matemático.

Una de las primeras pruebas realizadas se deriva de la revisión del producto de la operación $V^T PV$, en donde, se puede demostrar que dicho producto se distribuye según una distribución Chi-Cuadrada con $n - m$ grados de libertad (GL), que nos permita verificar la compatibilidad estadística de los estimadores *a priori* y *a posteriori* del observable peso de unidad (Berné-Valero *et al.*, 2003). De tal manera que se tiene:

$$\frac{V^T PV}{\sigma_0^2} = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - m) = \chi_{n-m}^2$$

Ecuación 3-6

Para poder establecer la compatibilidad del estadístico de Chi- cuadrada entre los valores *a priori* σ_0^2 y *a posteriori* $\hat{\sigma}_0^2$ de la varianza de peso unidad se determinara a partir de la formulación de hipótesis nula y alternativa:

$$H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$$

Ecuación 3-7

$$H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$$

Ecuación 3-8

Dicho procesos conlleva resolver a partir del valor estimado $V^T PV$ la comparación de la distribución Chi- Cuadrada, para cierto nivel de significancia α con respecto a los GL correspondientes, de modo que la hipótesis nula se aceptará si se cumple (Leick *et al.*, 2015):

$$X_{(n-r, 1-\alpha/2)}^2 < \frac{V^T PV}{\sigma_0^2} (n-r) < X_{(n-r, \alpha/2)}^2$$

Ecuación 3-9

Si la hipótesis cumple la ecuación 3-9, entonces la hipótesis es aceptada y por lo tanto significa que no hay sesgo en el ajuste.

El nivel de significancia de la prueba corresponde a la probabilidad de un error del tipo I (se rechaza la hipótesis cuando debería ser aceptada) o la probabilidad de rechazar la hipótesis nula incluso aunque sea cierta, pero se fija normalmente para este tipo de trabajos en 0.05 (lo que se corresponde con un nivel de confianza del 95%). El rechazar la hipótesis nula es indicativo de que hay algún sesgo en el ajuste, entonces habrá que investigar la causa de este sesgo. Puede ser debido a un incorrecto modelo estadístico, o a un incorrecto modelo matemático, o a ambos. En todo caso, si el ajuste no pasa la prueba, habrá que investigar sobre la causa, antes de continuar con el proceso (Ramón-Morales, 2010).

3.1.4.1. Redundancias Parciales.

Otro punto importante que puede afectar la calidad de la red geodésica, está relacionado con la redundancia del sistema. El número de ecuaciones redundantes r del sistema de ecuaciones normales es la diferencia entre el número de observaciones n y el número de parámetros m , que son las incógnitas a ser estimadas.

A la contribución de cada observación corresponde una redundancia r la cual recibe el nombre de redundancia parcial r_i (Leick *et al.*, 2015). Estas son obtenidas de la diagonal principal de la matriz R expresada por la relación:

$$R = \frac{1}{\hat{\sigma}_0^2} COV_{\hat{v}} P$$

Ecuación 3-10

Donde $\hat{\sigma}_0^2$ es la varianza *a posteriori*, $COV_{\hat{v}}$ es la matriz de covarianza de los residuales y P la matriz de pesos (ponderaciones del modelo matemático).

Las redundancias parciales (r_i), calculadas a partir de la anterior ecuación, cuantifican el control de las observaciones y se pueden clasificar de acuerdo a la siguiente tabla (3-1) y gráfico (3-4).

Tabla 3-1. Parámetros de referencia para la clasificación de redundancias parciales.

Control de las Observaciones	Mínimo	Máximo
Mal controlado	0	0.01
Débilmente controlado	0.01	0.1
Suficientemente controlado	0.1	0.3
Bien controlado	0.3	1

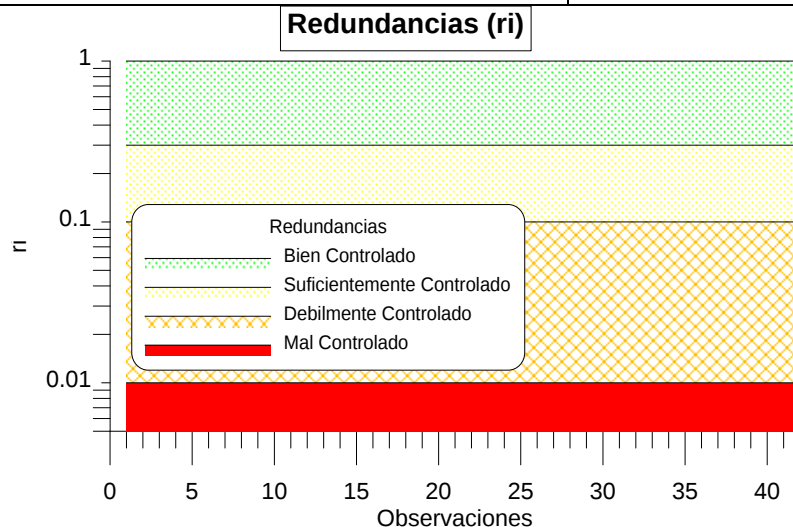


Figura 3-4. Límites gráficos de parámetros de clasificación de las redundancias parciales.

3.1.4.2. Fiabilidad de Redes Geodésicas

3.1.4.2.1. Teoría de Valores Atípicos o Errores Groseros (Outliers)

La teoría de fiabilidad sirve para detectar *outliers* (valores atípicos o errores groseros) en el ajuste de la red. Un error grosero introducido en un observable influye en todos los residuales de la red y desequilibra su calidad. Los *outliers* se detectan de forma fácil cuanto más precisas y homogéneas sean las observaciones mediante la prueba de Baarda, comúnmente identificada por el termino w_0 (Baarda, 1968).

La aplicación de esta prueba es de tipo global y sirve para detectar errores mediante límites definidos, esto permite comprobar la fiabilidad de las observaciones que han intervenido en el cálculo de los parámetros ajustados en el modelo utilizado.

Para realizar conocer la fiabilidad de la red se realiza el análisis de los residuales $\hat{V}$ que produce el ajuste de mínimos cuadrados. Entonces lo que se busca es conocer si el vector $\hat{V}$ está formado por valores no correlacionados lo que significa que la distribución de los residuales es una distribución normal con media cero y varianza unidad $N(0,1)$ (Berné-Valero *et al.*, 2003).

De tal manera, se formula la prueba de Baarda a partir de la hipótesis nula con un nivel de significancia (Baarda, 1968; Leick *et al.*, 2015):

$$H_0: w_i = \frac{\hat{V}}{\sqrt{COV_{V_i}}}$$

Donde:

$\hat{V}$: representa los residuales y $\sqrt{COV_{V_i}}$: es la raíz cuadrada del elemento i – *ésimo* de la diagonal de la matriz de covarianza. En donde el nivel de significancia α del valor crítico w_0 viene dado por:

$$w_0 = N(0,1)_{(1-\alpha)}$$

Ecuación 3-12

Los valores comúnmente utilizados en trabajos similares es $\alpha = 0.05$ (95 %) y suponiendo una distribución normal, se obtienen el valor crítico $w_0 = 2.8$. Si $|w_i| > w_0$ existe una probabilidad $(1-\alpha)$ de que la observación i – *ésima* sea errónea (Sevilla *et al.*, 1990; Jiménez-Martínez *et al.*, 2012).

Junto con la prueba de Baarda se presenta el concepto de fiabilidad que se subdivide en fiabilidad interna y externa. La primera cuantifica la parte del error existente en la observación y el segundo cuantifica la influencia de los errores no detectables en los parámetros ajustados (Berné-Valero *et al.*, 2003).

3.1.4.2.2. Medida de Fiabilidad Interna.

Con el concepto de fiabilidad interna de una red geodésica se reúnen todos los criterios utilizados para detectar errores groseros. La fiabilidad interna cuantifica el error mínimo que se encuentra en una observación. Estadísticamente, es el valor mínimo detectable del error en la observación, dado por la siguiente ecuación (Leick *et al.*, 2015):

$$\nabla x_{0_i} = \left| \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} \sigma_{x_i} \right|, i = 1, \dots, n$$

Ecuación 3-13

Dónde:

δ_0 : Sesgo, que representa la traslación de la distribución normal,

σ_{x_i} : Desviación estándar de la i -ésima observación y r_i : redundancia parcial.

El sesgo (δ_0) representa la distancia mínima detectada entre los valores de la hipótesis nula H_0 y alternativa H_1 a los niveles de significación α y β respectivamente.

Entonces, la ecuación anterior cuantificará el valor mínimo del error grosero en la observación que pueda detectarse con una probabilidad β , que normalmente se toma 80% y un nivel de significación $\alpha = 0.001$ (Ramón-Morales, 2010). El sesgo a partir de tablas publicadas toma el valor de 4.12 para el parámetro δ_0 . (Jiménez-Martínez *et al.*, 2012).

Es importante visualizar el comportamiento de la ecuación 3-13 ya que los resultados dependerán de la precisión de las observaciones (σ_{x_i}), de la geometría de la red (r_i), nivel de significancia y sesgo de los observables (Santos-Jr, 2005).

La homogeneidad de la red se basa en el análisis de la sensibilidad de la red obtenido directamente de la ecuación:

$$\mu IN_i = \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}}$$

Ecuación 3-14

Los coeficientes expresados en la ecuación anterior (μIN_i) representan la sensibilidad de la red, la cual se debe caracterizar por tener valores relativamente pequeños de μIN_i . Un valor pequeño μIN_i implica un valor grande de r_i ; cuanto mayor sea el número de r_i menor será error detectable (∇X_{0_i}), presente en una observación X_i ; esto se verá reflejado en los residuos $\hat{V}_i$. Entonces, la prueba se vuelve menos sensible y el número de errores groseros detectables se reduce a un mínimo (Sevilla *et al.*, 1990).

Asimismo, se puede sintetizar que la fiabilidad interna de la red brinda información acerca de:

- Calidad de los observables.
- Existencia de errores groseros.
- Valor del máximo error admisible de la red.

3.1.4.2.3. Medida de Fiabilidad Externa.

La medida de fiabilidad interna puede no ser suficiente para garantizar la calidad del ajuste, por lo tanto, será importante realizar el estudio de la fiabilidad externa con el fin de que no se deteriore la calidad en la precisión de los errores despreciados o no detectados (Jiménez-Martínez *et al.*, 2012).

Los parámetros serán definidos a través de (Leick *et al.*, 2015):

$$\nabla x = Q_{\hat{x}} A^T P e_i \nabla x_{0_i}$$

Ecuación 3-15

Donde e_i es la i – *esima* columna de la matriz identidad cuya dimensión es igual al número de observaciones utilizadas en el ajuste. El parámetro de homogeneidad de la fiabilidad externa μEX_i está dado por la relación siguiente:

$$\mu EX_i = \mu IN_i \sqrt{1 - r_i}$$

Ecuación 3-16

De esta forma, la fiabilidad externa de la red será definida por los vectores ∇x de cada observable con los respectivos parámetros μEX_i de homogeneidad externa. A partir del estudio de los vectores de fiabilidad externa ∇x , se deduce que un mismo *outlier* en un observable influye de forma diferente en el conjunto de los vértices de la red (Ramón-Morales, 2010; Jiménez-Martínez *et al.*, 2012).

3.2. Equipos GPS.

De acuerdo a la teoría y recomendaciones para este tipo de trabajos de precisión se necesitaron al menos 2 equipos de doble frecuencia, para el caso de la campaña 2015 y 2016 los equipos utilizados son:

- Equipo *Trimble*:

Este equipo está compuesto por un receptor GPS NetRs con una antena Zephyr Geodetic base para nivelación y tripié y accesorios (cables de conexión, alimentación y descarga, entre otros), con capacidad de muestreo de 15 y 30 segundos. Además de tecnología *R-track* para la capacidad de rastreo de la señal L2C1 y capacidad múltiple de alta precisión para medidas de pseudo-distancia de L1 y L2. Este sistema está preparado para el seguimiento de constelaciones de satélites *Navstar* (Figura 3-5).



Figura 3-5. Equipo GPS NetRS y antena Zephyr.

- Equipo Topcon GR-5:

Sistema de GPS de doble frecuencia con capacidad de muestreo múltiple (1, 5, 15 y 30 segundos), el sistema está preparado para el seguimiento de constelaciones *Navstar* y *Glionass* en modo estático. El equipo está compuesto por una antena (GR-5) y libreta electrónica (*Topcon Tesla*) con capacidad de conexión inalámbrica para configuración e inicio del trabajo. Descarga mediante tarjeta SD en programa de fabricante (*Topcon Tools*) (Figura 3-6).



Figura 3-6. Equipo GPS Topcon GR-5.

- Equipo Geomax Zenith 25:

Equipo GPS de doble frecuencia, con capacidad de seguimiento de constelación de satélites Navstar y Glonass, autonomía de 8 horas en modo estático. Configuración mediante libreta electrónica con conexión inalámbrica (figura 3-7).



Figura 3-7. Equipo GPS Geomax Zenith25.

3.2.1. Métodos de Posicionamiento Satelital: Posicionamiento Diferencial con Observables de Fase.

De los métodos de posicionamiento satelital de vértices de redes geodésicas el más recomendado es el posicionamiento de tipo estático en modo diferencial con observables de fase. Básicamente consiste en medir una línea base o vector AB desde un punto fijo A (estación de referencia con coordenadas conocidas) a un punto de coordenadas desconocidas B (estación móvil). Los datos GPS medidos en A y B son procesados en oficina mediante métodos de cálculo de líneas base, es decir, se calcula la distancia lineal entre A (Conocido) y B (Desconocido), a esta metodología de trabajo se le conoce como post-proceso. La longitud de líneas es calculada a partir de dobles diferencias de fase (DDF), formadas con la diferencia aritmética entre los observables de fase medidas simultáneamente por el par de receptores en los sitios (R1 y R2) que rastrean el mismo

par de satélites (S1, S2). Primero las fases obtenidas por cada receptor del primer satélite se diferencian formando las diferencias de fase simples (SDF). Posteriormente, las fases obtenidas por cada receptor del segundo satélite se diferencian. Y finalmente, estas dos diferencias a su vez se diferencian entre sí. Este proceso es representado simbólicamente de la manera siguiente (Ramón-Morales, 2010):

Diferencias de fase simple:

$$SDF(R1, R2, S1) = Fase(R2, S1) - Fase(R1, S1)$$

$$SDF(R1, R2, S2) = Fase(R2, S2) - Fase(R1, S2)$$

Dobles diferencias de fase:

$$DDF(R1, R2, S1, S2) = SDF(R1, R2, S2) - SDF(R1, R2, S1)$$

Este procedimiento ayuda a cancelar los errores de los relojes locales porque son comunes a las mediciones realizadas con distintos satélites. Además, disminuye los errores orbitales y los de propagación atmosférica. Las ambigüedades siguen siendo números enteros y ahora aparecen no mezcladas con otros errores por lo que en principio es posible estimarlas junto con las coordenadas del receptor.

Las precisiones en las coordenadas estimadas, así como los tiempos de observación de los datos de campo dependen en gran medida de la longitud de la línea base.

En resumen, en los trabajos de posicionamiento mediante técnicas de GPS diferencial, los resultados observacionales son las componentes de una serie de vectores tridimensionales que unen diferentes vértices de una red, así como sus correspondientes incertidumbres. Como cualquier otro levantamiento, un levantamiento GPS que ha determinado las posiciones relativas de un conjunto de vértices podrá estar sujeto de un ajuste libre (mínimo) o constreñido para distribuir los errores de cierre (Wolf *et al.*, 1995; Leick *et al.*, 2015).

3.2.2. Mediciones de GPS en Red.

El trabajo de campo con los equipos GPS es similar, independientemente del modelo o fabricante. Para ejemplificar este proceso se presentan una serie de pasos básicos (figura 3-8):

- Centrado y nivelado: el tripié se coloca y se centra sobre el punto de referencia (centro de varilla), con el apoyo de niveles y mirilla.
- Posteriormente se asegura la antena GPS en la parte superior del arreglo.
- Se mide la altura con cinta métrica del punto de referencia (varilla del banco) hasta el nivel de referencia en la antena, por ejemplo: Base del soporte, centro de fase o ápice de la muesca. Este proceso es al inicio y final de la medición, antes de desmontar el dispositivo GPS.
- Finalmente se inicializa la medición con los parámetros de nombre del punto, muestreo (15 segundos), máscara de elevación (ángulo de 10°), altura de la antena en metros y modo de medición (Estático), este proceso solo se aplica para equipos *Geomax* y *Topcon*, en el caso de GPS *Trimble* se lleva bitácora en libreta de campo, para posteriormente en programa de post-proceso ingresarlo.
- Con el fin de asegurar la calidad de los datos es preciso realizar sesiones de mediciones de mínimo 4 horas por receptor.



Figura 3-8. Implementación en campo de equipos GPS.

3.2.3. Programa de Procesamiento de Datos GPS.

Recientemente la compañía *Trimble* desarrollo un programa denominado *Trimble Business Center* (TBC) en el que el motor principal de procesamiento es el denominado HD-GNSS, la resolución de ambigüedades se lleva a cabo con una rápida convergencia a una solución con mayor nivel de exactitud. Para eliminar los retrasos o adelantos en la señal que emite el satélite, TBC realiza un elección del mejor modelo para eliminar esos efectos dependiendo de la distancia, es decir, en distancias cortas ($<2\text{Km}$) la señal en el receptor base y móvil es común y entonces los retrasos o adelantos lo serán, de esta manera es posible eliminar dichos efectos en las mediciones de fase de la portadora (Trimble, 2008, 2012).

Por otra parte, en el caso donde las distancias son grandes y los efectos atmosféricos no son comunes, TBC utiliza un post- procesamiento aplicando un modelo empírico para los retrasos de señal ocasionados por la transmisión a través de la troposfera. Para todas las sesiones estáticas

que duren menos de 1 hora, los retrasos troposféricos se calculan utilizando el modelo de *Hopfield*. Para las sesiones estáticas que duran más de una hora en líneas base de más de 2 kilómetros, los retrasos troposféricos se calculan utilizando el modelo de *Hopfield*, junto con funciones de mapeo de *Niell*, incluyendo además en el proceso un modelo de retraso troposférico al estimar las correcciones de fase portadora (Trimble, 2012). El proceso es mejorado con el uso de efemérides precisas de cada satélite en el procesamiento, que son publicadas de manera gratuita por IGS *International GNSS Service* (Servicio Internacional GNSS).

El tema de pos- procesamiento es muy amplio, por lo cual puede ser de interés continuar su revisión en base a los artículos e información de otros autores: (Hopfield, 1969; Niell, 1996); Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001); (Kaplan *et al.*, 2005; Jiménez-Vega, 2006; Perdiguer *et al.*, 2008; Trimble, 2008, 2012).

3.3. Método de Ajuste de Observaciones.

El ajuste de errores en redes de gravimetría y GPS, se utiliza el método de ecuaciones de observación, aplicando el método de los mínimos cuadrados (Sevilla, 1987; Wolf *et al.*, 1995; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001; Ramón-Morales, 2010; Leick *et al.*, 2015). La aplicación de este método permite el análisis estadístico de la red para obtener buenos ajustes. Para poder aplicar un ajuste de mínimos cuadrados a un observable es preciso partir del hecho de que se dispone de más observaciones de las que estrictamente se necesitan para resolver el problema a estimar. Esto en consecuencia viene acompañado siempre por inevitables errores en la observación y que por concepto del método se consideran desconocidas (Sevilla, 1987).

De modo que las observaciones son valores aproximados al inicio del ajuste, los cuales van mejorando a medida que el procedimiento avanza. Estos parámetros representan funciones de las incógnitas que son tratadas como variables aleatorias de acuerdo al modelo estocástico (Sevilla, 1986; Wolf *et al.*, 1995; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001; Amiri-Simkooei, 2007; Ramón-Morales, 2010; Leick *et al.*, 2015).

Para el caso de las redes GPS las observaciones son las longitudes de las líneas base y las incógnitas las coordenadas no conocidas de los vértices de la red (X, Y, Z). En tanto que para el caso de redes gravimétricas, las observaciones son las diferencias de gravedad relativa entre estaciones y las incógnitas los valores de aceleración de la gravedad no conocidos de los vértices de la red (Wolf *et al.*, 1995; Ramón-Morales, 2010; Romero-Andrade, 2014; Leick *et al.*, 2015).

En cualquiera de las dos técnicas utilizadas el modelo de ajuste será en cierta forma similar y se resolverán en base a los parámetros que intervengan para su mejor solución. En el caso de microgravimetría en red los ajustes se realizaron mediante modelos matemáticos programados en software auxiliares y en el caso de los datos GPS el procesamiento se realizó en software comercial *Trimble Business Center*, el cual comparte la misma metodología que a continuación se explica.

3.3.1. Modelo Matemático de Ajuste.

En el planteamiento del método de ecuaciones de observación aplicando mínimos cuadrados las observaciones (L_b), y los parámetros desconocidos (X), se relacionan de la siguiente manera:

$$AX - L_b = V$$

Ecuación 3-17

Donde “A” es una matriz $n \times r$ denominada matriz de diseño con $m > n = r$, es decir mayor número de observaciones que valores desconocidos y V el vector de residuales (Sevilla, 1986).

En tanto que el modelo estadístico (estocástico) asociado es:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1}$$

Ecuación 3-18

Donde P es la matriz de pesos ($n \times n$), Σ_{L_b} es la matriz cofactor diagonal de las observaciones independientes, cuyos elementos son el inverso de las varianzas de las observaciones o ponderaciones, y σ_0^2 un factor de escala arbitrario llamado varianza *a priori* de peso unidad. El nombre se deriva del hecho de que si la varianza de una observación es igual a $\hat{\sigma}_0^2$, la ponderación de la observación es igual a la unidad (1).

En la solución del sistema de ecuaciones lineales (Ecuación 3-17) el criterio comúnmente usado es que la suma, ponderada por la matriz de ponderaciones P , de los cuadrados de los residuales sea mínima, esto es:

$$V^T P V = \min$$

De donde puede probarse que la estimación de $\hat{X}$ (incógnitas) satisface el criterio (Wolf *et al.*, 1995; Leick *et al.*, 2015) es:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L_b$$

Ecuación 3-19

La minimización del vector de residuales $V = AX + L_b = L_a - L_b$ es fundamental para la determinación de los diferentes parámetros estadísticos como: estimadores, cifras de error, parámetros de fiabilidad; y por lo tanto constituye la base para el análisis estadístico de la solución obtenida (Sevilla, 1986).

Una de las características fundamentales del ajuste por mínimos cuadrados es que tiene la capacidad de estimar el valor de σ_0^2 basándose en las observaciones y en la matriz de pesos P . Esta estimación se representa $\hat{\sigma}_0^2$ y es la varianza *a posteriori* de peso unidad. Si las varianzas de peso unidad *a priori* y *a posteriori* son estadísticamente iguales, se puede decir que el ajuste es correcto.

Teniendo en cuenta que el valor esperado del vector de residuales $\hat{V}$ tiende a cero, se puede comprobar que el valor de la varianza *a posteriori* de peso unidad será (Leick *et al.*, 2015):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{r - u}$$

Ecuación 3-20

El número $r - u$, indica el número de redundancias del sistema o también conocido como el número de grados de libertad (GL) que refleja la consistencia geométrica (rigidez) de la red. Por

lo tanto, la rigidez de una red dependerá de que este número sea lo suficientemente grande y estaría relacionado directamente con el número de redundancias o sobre mediciones efectuadas (Sevilla, 1986, 1987). Para obtener la desviación estándar de cada observación se emplea la ecuación 3-21, en donde “ Q_{xx} ” es la diagonal principal de la matriz cofactores de $\hat{X}$.

$$\hat{\sigma}_{x_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{x_i x_i}}$$

Ecuación 3-21

El proceso de ajuste mínimo cuadrático se obtiene la covarianza a partir de la matriz de pesos de las observaciones. Las matrices de cofactores de los parámetros estimados ($\hat{X}$), de los residuos estimados ($\hat{V}$) y de las observaciones ajustadas ($\hat{L}$) se obtienen de la siguientes ecuaciones (Leick *et al.*, 2015):

$$Q_{\hat{X}} = (A^T P A)^{-1}$$

Ecuación 3-22

$$Q_{\hat{V}} = P^{-1} - A Q_{\hat{X}} A^T$$

Ecuación 3-23

$$Q_L = (I - Q_{\hat{V}} P) P^{-1} (I - Q_{\hat{V}} - P)^T$$

Ecuación 3-24

Y para obtener la covarianza de ($\hat{X}$), ($\hat{V}$) y ($\hat{L}$) se efectuara el producto de la matriz cofactor por varianza *a posteriori* $\hat{\sigma}_0^2$, correspondiente a cada matriz cofactor calculados en ecuaciones 3-22, 3-23 y 3-24.

3.3.2. Gravimetría: Ecuaciones de Observación.

Para iniciar con el procedimiento de ajuste de acuerdo al modelo de la ecuación 3-17 es indispensable definir las ecuaciones de observación de gravimetría del modelo que se utilizara es el denominado inconsistente o también conocido como *Gauss- Markov* regular, que es cuando se tiene más ecuaciones que incógnitas, para ejemplificar este proceso se usara un sistema con 3 incógnitas j, k y l y 4 ecuaciones (Δg), como a continuación se muestra:

Primero se define que:

g_i : Es al valor conocido dentro del polígono medido.

g_j, g_k, g_l : Son valores incógnitas de los vértices j, k y l .

$\Delta g_{j,i}, \Delta g_{k,j}, \Delta g_{l,k}$ y $\Delta g_{i,l}$: 4 Diferencias de gravedad entre g_i, g_j, g_k, g_l , cada uno con sus respectivo error de medición que son estimados a partir de la propagación de errores accidentales de los datos de campo en cada punto o banco de la red.

$Vg_{j,i}$, $Vg_{k,j}$, $Vg_{l,k}$ y $V\Delta g_{i,l}$: residuales de los 4 valores de i, j, k y l .

Conociendo los parámetros de entrada $\Delta g \pm \frac{1}{p}$ y residuales V se puede definir las ecuaciones de observación,

En gravimetría es a partir de las diferencias entre los puntos o vértices conocidos e incógnitas, como sigue:

Diferencias de gravedad	Ecuaciones de observación
$\Delta g_{j,i} = g_j - g_i$:	$g_j = \Delta g_{j,i} + g_i + Vg_{j,i}$
$\Delta g_{k,j} = g_k - g_j$:	$g_k - g_j = \Delta g_{k,j} + Vg_{k,j}$
$\Delta g_{l,k} = g_l - g_k$:	$g_l - g_k = \Delta g_{l,k} + Vg_{l,k}$
$\Delta g_{i,l} = g_i - g_l$:	$-g_i = \Delta g_{i,l} - g_l + Vg_{i,l}$

Debido al tipo de ajuste cada ecuación tendrá una incertidumbre en la solución, por lo tanto, cada ecuación se agrega residual “V”, valor que es importante para el análisis estadístico de la estimación.

La solución del sistema se realiza por medio de mínimos cuadrados mediante la notación matricial de “ nxm ” siendo “n” las incógnitas y “m” ecuaciones (Wolf *et al.*, 1995), por lo tanto, la matriz (ejemplo) dará una matriz de 3×4 , denominada matriz de diseño “A”, es:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_j \\ g_k \\ g_l \end{bmatrix}$$

Ecuación 3-25

Los términos independientes quedan definidos de la siguiente forma:

$$L_b = \begin{bmatrix} \Delta g_{j,i} + g_i \\ \Delta g_{k,j} \\ \Delta g_{l,k} \\ \Delta g_{i,l} - g_i \end{bmatrix}$$

Ecuación 3-26

Y la matriz de residuales:

$$V = \begin{bmatrix} Vg_{j,i} \\ Vg_{k,j} \\ Vg_{i,l} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3-27

De acuerdo a la solución de la ecuación 3-17, tenemos:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_j \\ g_k \\ g_l \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta g_{j,i} + g_i \\ \Delta g_{k,j} \\ \Delta g_{l,k} \\ \Delta g_{i,l} - g_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V g_{j,i} \\ V g_{k,j} \\ V g_{i,l} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3-28

Entonces la matriz de valores ponderados (P) queda definida como la parte inversamente proporcional de la varianza (σ^2) correspondiente, como sigue:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{i,j}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{j,k}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{k,l}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{l,i}} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3-29

3.3.3. GPS: Ecuaciones de Observación

Aunque el procesado y pos-procesado se llevara a cabo con el programa *Trimble Business Center* es importante ejemplificar el proceso de la construcción de las ecuaciones de observación en mediciones GPS, por lo tanto, para ejemplificar este proceso se establece un polígono de 3 lados donde:

- El punto i tiene coordenadas conocidas (X_i, Y_i, Z_i),
- Las diferencias de los puntos i, j y k , representados por las longitudes de las líneas base ($\Delta X_{j,i}, \Delta Y_{j,i}, \Delta Z_{j,i}; \Delta X_{k,j}, \Delta Y_{k,j}, \Delta Z_{k,j}; \Delta X_{i,k}, \Delta Y_{i,k}, \Delta Z_{i,k}$),
- Además, las incógnitas del sistema serán X_j, Y_j, Z_j y X_k, Y_k, Z_k y
- Donde los residuales $V_{X_{j,i}}, V_{Y_{j,i}}, V_{Z_{j,i}}; V_{X_{k,j}}, V_{Y_{k,j}}, V_{Z_{k,j}}; V_{X_{i,k}}, V_{Y_{i,k}}, V_{Z_{i,k}}$.

De tal manera que para cada línea base observada se tiene 3 ecuaciones:

Longitud de línea base	Ecuaciones de observación
$\Delta X_{j,i} = X_j - X_i$	$X_k - X_j = \Delta X_{k,j} + V_{X_{k,j}}$
$\Delta Y_{j,i} = Y_j - Y_i$	$Y_k - Y_j = \Delta Y_{k,j} + V_{Y_{k,j}}$
$\Delta Z_{j,i} = Z_j - Z_i$	$Z_k - Z_j = \Delta Z_{k,j} + V_{Z_{k,j}}$
$\Delta X_{k,j} = X_k - X_j$	$-X_k = \Delta X_{i,k} - X_i + V_{X_{i,k}}$
$\Delta Y_{k,j} = Y_k - Y_j$	$-Y_k = \Delta Y_{i,k} - Y_i + V_{Y_{i,k}}$
$\Delta Z_{k,j} = Z_k - Z_j$	$-Z_k = \Delta Z_{i,k} - Z_i + V_{Z_{i,k}}$
$\Delta X_{i,k} = X_i - X_k$	
$\Delta Y_{i,k} = Y_i - Y_k$	
$\Delta Z_{i,k} = Z_i - Z_k$	

Es posible representar la matriz de diseño A (9,6), similarmente a las ecuaciones de observación de gravimetría en red:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

En el caso de una red compuesta por n vectores, el sistema matricial estará conformado por n sub-bloques de matrices de dimensiones de 3×3 y será sub-determinado, es decir tendrá más incógnitas que datos. La sub-determinación es eliminada al incluir una o más estaciones con coordenadas conocidas (punto i).

La ponderación se define en base a los errores en las observaciones, por lo tanto, estarán en función del inverso de sus varianzas similarmente a las estimaciones de la red gravimétrica. En tanto la matriz de pesos tiene elementos fuera de la diagonal principal porque los observables (líneas base) son observaciones indirectas.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & & & \\ p_4 & p_5 & p_6 & & & \\ p_7 & p_8 & p_9 & & & \\ & & & p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ & & & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ & & & p_{16} & p_{17} & p_{18} \\ & & & & & & p_{19} & p_{20} & p_{21} \\ & & & & & & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ & & & & & & p_{25} & p_{26} & p_{27} \end{bmatrix}$$

3.3.4. Programas de Procesamiento Gravimétrico.

Los recientes avances tecnológicos en los equipos gravimétricos han permitido que los gravímetros clásicos (analógicos) sean remplazados por modelos digitales. Como consecuencia, la etapa de campo es más rápida y precisa, además que los resultados grabados contienen información complementaria que es posible reprocesar en gabinete para obtener mejores resultados. Con la finalidad de cubrir los aspectos de compensaciones gravimétricas (Correcciones), se utilizó el programa *CG5Tool* (*CGxTool*); para la segunda parte del proceso (ajuste de la red gravimétrica) se realizó el *script* en la plataforma de *Matlab*, ambos de nivel científico. Como complemento a estos programas fue útil el uso de programas como *UltraEdit*, *Excel*, *Grapher*, entre otros.

A continuación, se mencionan las particularidades de los programas Cg5Tool y del *Script* de *Matlab*.

3.3.4.1. CG5Tool

El programa CG5tool, es una herramienta para realizar las correcciones de datos gravimétricos y microgravimétricos donde la precisión es uno de los objetivos, inicialmente la plataforma se desarrolló para gravímetros digitales automatizados como el CG-3 de *Scintrex*. La interfaz se desarrolló en lenguaje C para sistema operativo *Unix Sun*, pero las versiones posteriores se desarrollaron para otros sistemas operativos como *Windows* (Gabalda *et al.*, 2016), que es utilizada en este trabajo.

El programa se subdivide en dos tareas principales: la primera es dedicada a la corrección por marea terrestre, deriva instrumental y presión atmosférica. La segunda parte esta direccionada al ajuste de redes, cálculo de anomalías y calibración del instrumento gravimétrico (Gabalda *et al.*, 2003).

El insumo del programa CG5Tool son los datos de gravedad sin compensación de mareas, o altura del instrumento, este último opcional ya que ingresando un archivo extra de alturas el programa las compensa este valor.

Nota: es importante que para mayor referencia del programa y utilerías usadas es recomendable revisar manuales publicadas de *CGxTool* y *CG5Tool* (CG3TOOL, 2003; Gabalda *et al.*, 2003; Gabalda *et al.*, 2016)

3.3.4.2. Script Matlab.

Con la finalidad de realizar el procesamiento del ajuste de red gravimétrica, se programó (*Script*) los algoritmos para la solución de las ecuaciones de observación gravimétrica a partir del método desarrollado en el trabajo de Wolf *et al.* (1995).

El *Script* está disponible en los anexos de este trabajo, para facilidad de uso está configurado para reconocer datos de entrada a partir de un libro de Excel.

El resultado del proceso es plasmado en un archivo con formato **.txt*, en el que es plasmado los datos de entrada del proceso: matriz de diseño A, matriz de términos independientes L, desviaciones estándar normalizadas (normalizados a partir de 1/p). Finalmente, se muestran los resultados del ajuste $\hat{X}$ con respectiva desviación estándar en mGal.

3.4. Método de Procesamiento de Observaciones GPS

El método para obtener coordenadas ajustadas a partir de datos GPS se divide en general en dos etapas (figura 3-9), la primera incluye la adquisición en campo que se mencionó en el apartado 3.2 de los Equipos GPS. La segunda parte se denomina Post- Proceso (PP) de datos GPS, que es el cálculo de líneas base, cierre de ciclo y ajuste de redes de acuerdo a modelos matemáticos basados en el ajuste por mínimos cuadrados.



Figura 3-9. Esquema de general de trabajo para las observaciones GPS.

Esta segunda etapa en el proceso de datos GPS fue resuelta con el apoyo del programa *Trimble Business Center* (TBC) del fabricante *Trimble*, mismo fabricante de parte de los instrumentos utilizados en este trabajo. Para mayor referencia se explica a continuación de manera general su uso y procedimientos para obtener coordenadas precisas.

3.4.1. Trimble Business Center (TBC)

El programa *Trimble Business Center* es una plataforma especializada en el post- procesamiento de datos geodésicos, el cual está desarrollado a partir de algoritmos para el ajuste de redes GPS. El insumo de este programa lo conforman los archivos digitales que son adquiridos en campo diariamente, en formato RINEX. Como medida de organización es importante que la información se agrupe por trabajo o por día de adquisición juliano.

La primer tarea en el programa es la configuración de las coordenadas del espacio de trabajo, que para el caso de este estudio se realizó en el sistema de referencia WGS84 zona 11 norte y posteriormente se reproyectó al sistema de referencia Nad83, en ambos sistemas de referencia las alturas son del tipo elipsoidales.

Paso siguiente es la importación de los archivos RINEX de cada antena GPS que corresponde a cada sitio medido, al mismo tiempo se verifica los parámetros del archivo que es el modo y tipo de medición de la altura de la antena, algunos equipos mediante el modelo de la antena calculan directamente la altura respecto al centro de fase, en otros este proceso no es automático.

También, se verifican parámetros de adquisición de cada punto observado, como son:

- Fabricante de la antena,
- Nombre del punto,

- Serial de la antena,
- Hora de inicio y fin de la adquisición, entre otros.

En el caso de antenas de otros fabricantes fue importante alimentar el programa con hojas técnicas de los modelos utilizados con el fin de que el programa determine el punto central (Centro de fase de la antena) para el cálculo y ajuste de alturas en el PP.

En general el programa TBC se maneja en 3 etapas:

- Importación
- Edición de sesiones, proceso de líneas base y cierre de ciclo GNSS
- Ajuste de Red (ajuste por mínimos cuadrados)

Previo a la importación de archivos RINEX se configura los parámetros de calidad o como se menciona en el programa criterios de aceptación para la precisión horizontal y vertical, así como para el error medio cuadrático para el cálculo de líneas base (figura 3-10).

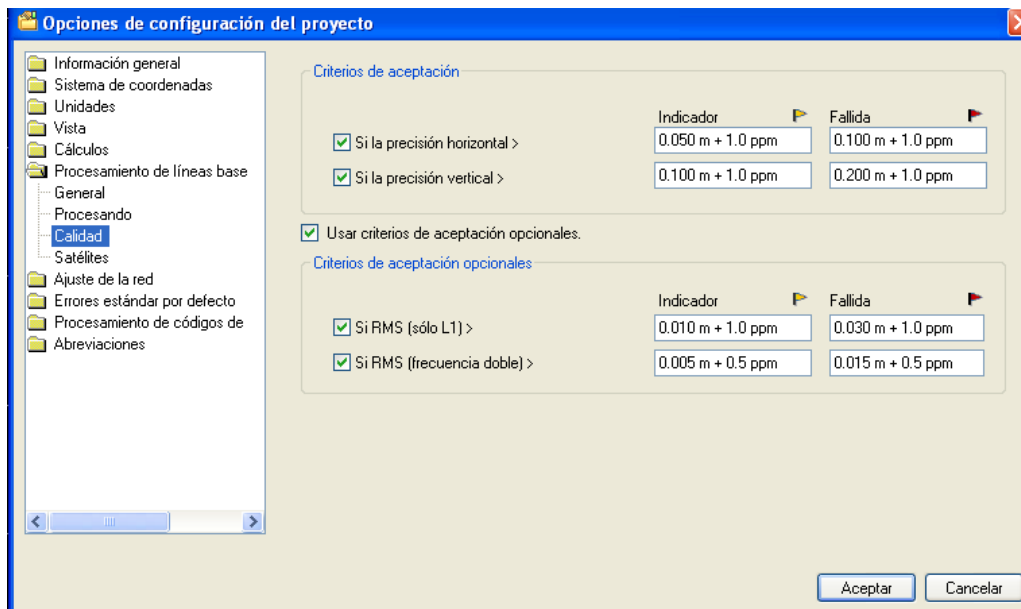


Figura 3-10. Opciones de configuración del proyecto (parámetros de calidad de aceptación de procesos).

En el caso del ajuste de red los parámetros que se utilizaron son los estándares que incluye el programa excepto para la visualización de la covarianza que se modificó para tener resultados en PPM y que se restringiera solo a líneas observadas (Figura 3-11).

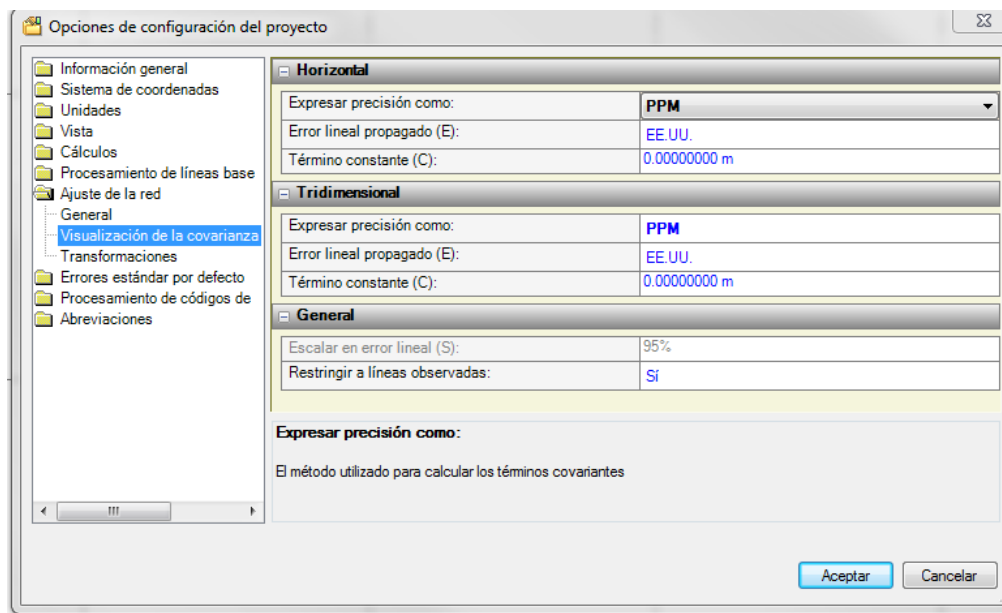


Figura 3-11. Opciones de configuración de ajuste de red.

3.4.2. Estación Base P500.

Para realizar el ajuste de datos es necesario incluir un punto o base conocido, para resolver esta situación se buscó disponibilidad de datos coincidentes con los días de trabajo de las 3 campañas analizadas en las estaciones de la red de CORS (*Continuos Operating Reference Station*, significado de las siglas en inglés). La estación o estaciones más cercanas son P494 y P500 y de la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNA) de INEGI se tuvo acceso a información de la estación MEXI. De acuerdo al análisis realizado por Romero-Andrade (2014), se decidió utilizar únicamente el punto P500 como punto base o fijo en todos los ajustes y en casos específicos se incluyó P494 y MEXI solo para apoyar las estadística en el ajuste de redes.

La estación P500 se localizada en el Centro, California, USA., el equipo consiste en un receptor *Trimble NetRs* con una antena tipo A20 (Figura 3-1), con muestreo cada 15 segundos (NGS, 2016). Las coordenadas utilizadas para el proyecto se consideraron fijas desde 2014 a 2016, es decir, no se considera la velocidad de desplazamiento en la placa Norteamericana ni la del Pacífico, de forma similar al experimento de Romero-Andrade (2014) para el ajuste de la red de 2012.

Las coordenadas fijas utilizadas para el proyecto sustraídas directamente de la hoja técnica de la estación geodésica (Anexos) se muestran en la tabla 3-2.



Figura 3-12. Estación geodésica P500 perteneciente a la red CORS.

Tabla 3-2. Coordenadas del punto geodésico de control de proyecto P500.

Estación	Coordenadas de Control			Ubicación
	Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal	
P500	32°41' 24.15390" N	115° 17' 59.70449" W	-19.779 m	El Centro, Cal., USA

Durante el proceso de descarga de estaciones P500 de la página en internet de *CORS* también se incluyó las efemérides precisas finales por día, archivo en el que se tiene las orbitas y relojes precisos de satélites *Navstar (IGS)* para el post- proceso.

3.4.3. Cierre de Ciclo GNSS

Uno de los procesos de calidad en TBC es la herramienta de comprobación de cierres de ciclo que proporcionan una medida de la cantidad de errores en un conjunto de observaciones al interior de una red.

Un cierre de ciclo se calcula seleccionando un punto desde el cual se han tomado una o más observaciones, agregando una de ellas a las coordenadas del punto y calculando las coordenadas del segundo punto en base a dicha observación. Este proceso se repite una o más veces alrededor de un ciclo, terminando finalmente en el punto de partida original. Si no hubo errores en las observaciones, la coordenada calculada final sería exactamente igual a la coordenada de comienzo original (Trimble, 2008).

Al restar la coordenada calculada a la coordenada original se determina una falta de cierre. Al dividirse este error por la longitud de la línea se puede expresar el error en partes por millón. Esta técnica también se puede utilizar entre dos puntos diferentes cuando ambos se conocen con un alto grado de precisión. También conocido como cierre de poligonal.

4. CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

En este capítulo se explicará la adquisición de datos, procesado y resultados obtenidos de la deformación vertical y horizontal de las mediciones gravimétricas y GPS, respectivamente. La estimación de las deformaciones se realizó mediante el apoyo de programas computacionales, por lo tanto, se abordarán tópicos referentes a las rutinas de apoyo creadas en Matlab y también en programas de tipo científico y comercial para gravimetría y GPS (Figura 4-1).

Una vez acondicionados y procesados los datos se procederá a la determinación de valores de la deformación entorno de la falla Imperial en donde el objetivo principal es visualizar y estimar los cambios de posición respecto de la vertical y horizontal con microgravimetría y GPS.

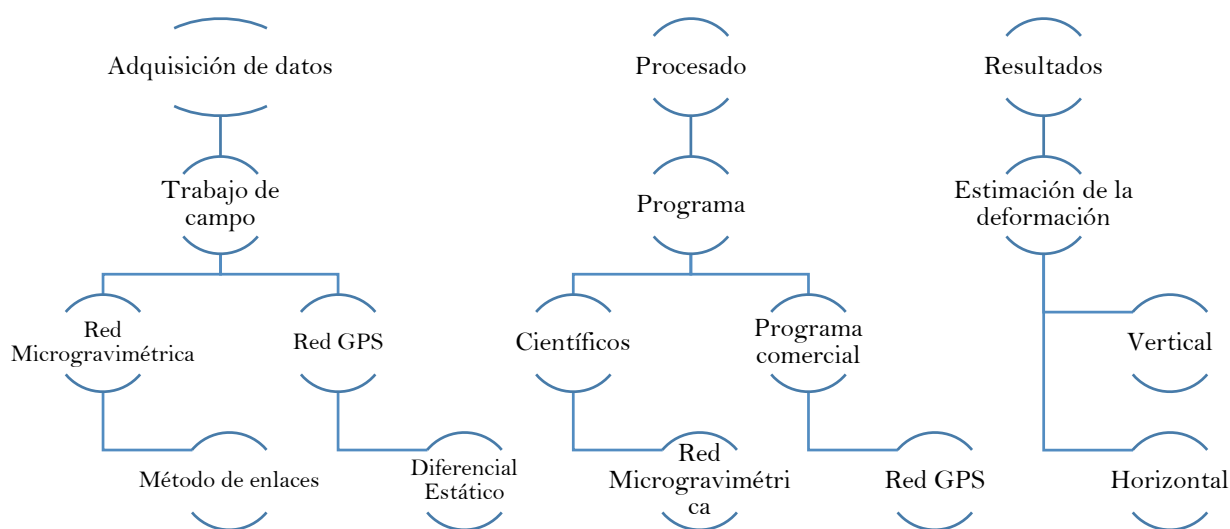


Figura 4-1. Diagrama general de cada fase para la obtención de resultados.

4.1. Adquisición de Datos.

4.1.1. Generalidades

Partiendo de las condiciones de la RGFI implementada en 2011 se realizó un censo para conocer el estatus físico de los bancos, donde una de las preocupaciones principales era verificar el estado físico de los vértices para la medición gravimétrica y GPS. En base a este reconocimiento de estatus de los bancos se planificó el diseño de la red gravimétrica, esto con el fin de tener la suficiente información entorno a la deformación de la falla Imperial. De igual manera se llevó un control sobre las estaciones que sirvieron para la medición GPS (Figura 4-2).

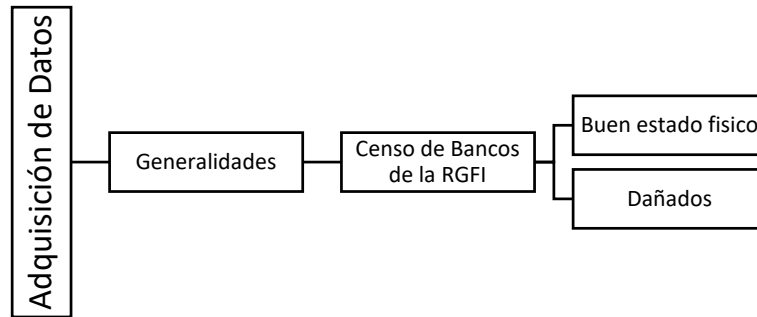


Figura 4-2. Generalidades de la adquisición en campo para la RGFI.

El resultado del reconocimiento de los 42 bancos totales de la RGFI es:

- Se localizaron en total 24 bancos,
- 23 de los bancos están en buen estado,
- Uno presentó daños por maquinaria pesada al ampliar el canal en el que se localizó (P5A10),
- El banco P2A3 no se localizó ya que había material de desecho sobre él. (Figura 4-3)
- Visualmente se encontraron bancos (P2A7) que presentaban posibles hundimientos por humedad en el subsuelo que pudieran estar relacionados a efectos antropogénicos y no al proceso de deformación de la falla Imperial.



Figura 4-3. Búsqueda de Bancos en la RGFI, previo al inicio de las mediciones. Izquierda banco P2A3 no localizado, derecha banco P3A5 localizado al costado de carretera estatal BC1.

La red final para este trabajo está compuesta por 19 bancos distribuidos en los 5 perfiles de la RGFI que servirán para la medición en las campañas 2015 y 2016 de microgravimetría y GPS. (Figura 4-4).

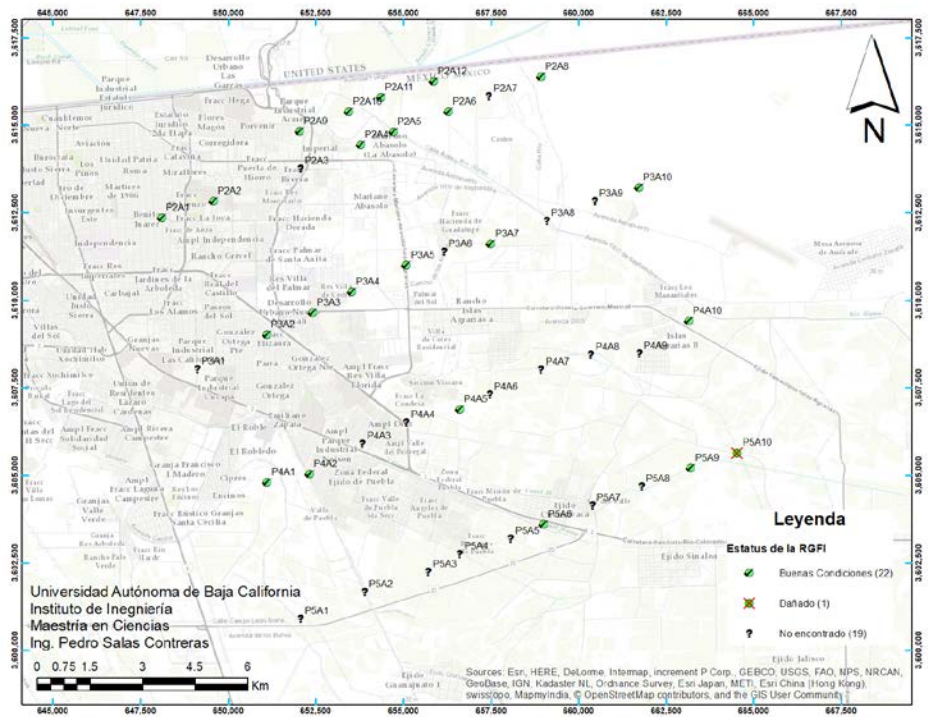


Figura 4-4. Mapa de estatus de los bancos para las mediciones de 2015 y 2016. Circulo verde corresponde a bancos en buen estado; Circulo verde tachado bancos con daño, no funcionales para la medición y Signos de interrogación bancos que no fue posible localizar.

4.1.2. Mediciones en Red (Microgravimetría).

Para iniciar con las mediciones en red de gravimetría en la RGFI, se realizó la revisión física y de configuración de cada gravímetro, estas varían de acuerdo al modelo utilizado (3.1.1 Equipos Gravimétricos). De manera general la revisión incluye:

- Deriva instrumental:
- Temperatura interna:

- Reloj en UTC (Tiempo Universal Coordinado):



Figura 4-5. Revisión de parámetros de gravímetros CG-3 y CG-5.

El diseño de las mediciones de gravedad en red se estableció de la siguiente manera:

- Las mediciones se realizaron en recorridos poligonales (mínimo 3 bancos) relativamente cercanas, siempre y cuando los permita la ubicación de los bancos.
- La apertura y cierre de cada poligonal se realizará en el mismo banco (con el fin de verificar la deriva instrumental remanente).
- Es primordial establecer poligonales contiguas que compartan mismos segmentos de medición, con el fin de mejorar la estadística para el modelo matemático de ajuste (redundancias).

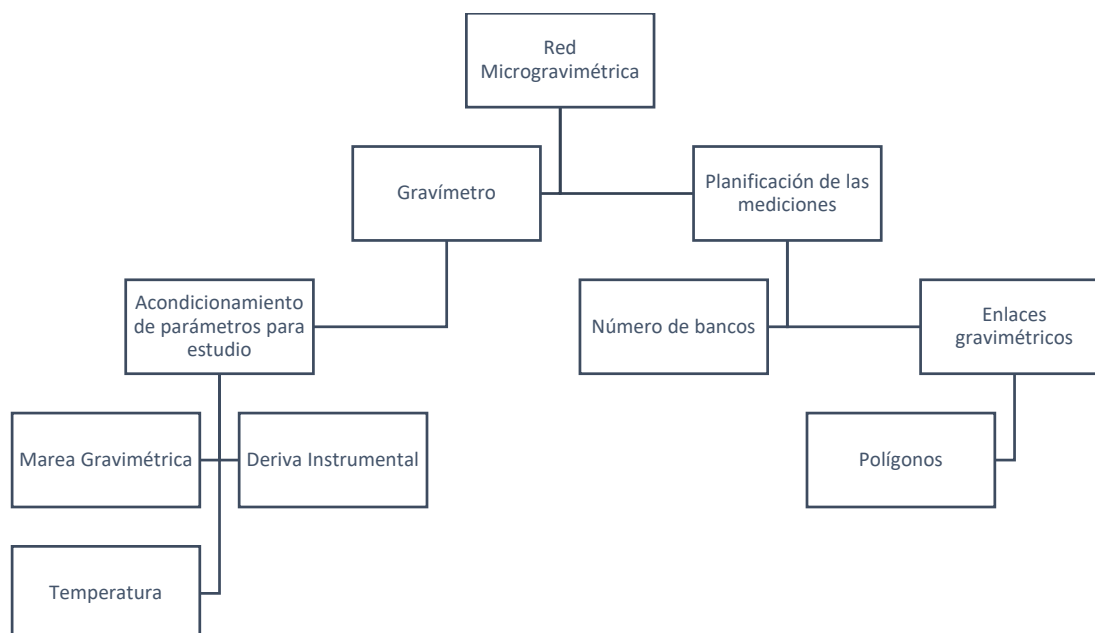


Figura 4-6. Esquema de la red microgravimétrica. La rama izquierda se refiere a la revisión de parámetros para el inicio de las campañas gravimétricas, del lado derecho la planificación de las mediciones en base al censo de bancos de la RGFI.

A continuación, se presenta la red de microgravimetría establecida a partir del censo de bancos los polígonos a medir y la secuencia de adquisición en forma horaria y anti horaria (flechas negras). En total se establecieron 11 polígonos con 19 bancos que constaban de 3 hasta 7 segmentos contiguos entre ellos (Figura 4-7).

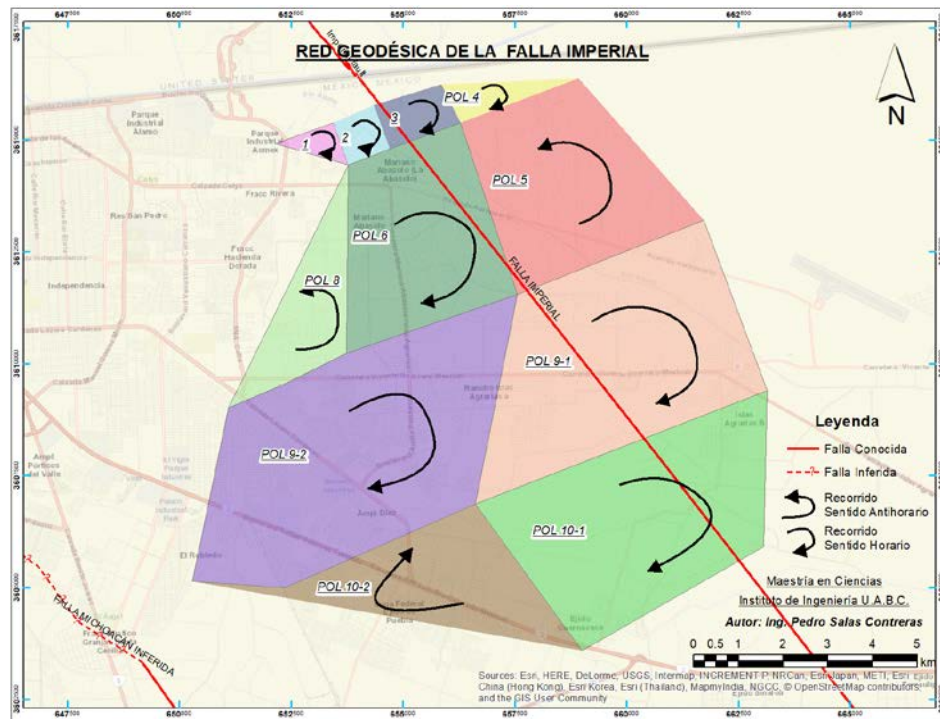


Figura 4-7. Esquema y planeación de los recorridos gravimétricos en RGFI. Las flechas indican la dirección en la que se propone la medición de las poligonales y los colores indican un polígono diferente.

A partir del diseño de la red se procedió a dar inicio con la medición, como se explica a continuación.

4.1.3. Campaña de Gravimetría del 2015.

4.1.3.1. Deriva Instrumental.

Para actualizar la deriva instrumental del gravímetro CG-5 se midió continuamente por más de 12 horas (19 horas) cada 60 segundos en modo cíclico. Este tiempo sirvió perfectamente para calcular la nueva deriva instrumental que inicialmente era de 1.310 mGal/día y posteriormente se ajustó a 1.283 mGal/día, parámetro que se mantuvo constante durante los 12 días de campo.

4.1.3.2. Temperatura del Instrumento.

No requiere ajuste manual de temperatura ya que el equipo CG5 la compensa automáticamente.

4.1.3.3. Calidad de los Datos de Campo (Cierre y Tolerancia).

De acuerdo a la planificación realizada en la figura 4-7, durante los 12 días de la campaña se recorrieron los polígonos, en cada banco que compone la red se realizó un muestreo cada segundo durante 4 minutos teniendo un total de 240 muestras por lectura gravimétrica, en cada sitio se tomaron mínimo 6 y hasta 12 lecturas gravimétricas. De cada sesión de medición en el banco se seleccionaron 3 o 4 lecturas tomando como criterio las menores desviaciones estándar en cada sesión.

Siguiendo lo mencionado en el diagrama de adquisición y procesado, al completar cada polígono se verifico los valores de cierre de cada polígono tomando como referencia la ecuación 3-5. En la tabla 4-1 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-1. Error de cierre (EC) y tolerancia (T) de los polígonos medidos del 1 al 12 de diciembre de 2015. Donde ea= desviación estándar promedio; u=número de ejes del polígono; b= deriva del gravímetro; t= tiempo de recorrido del itinerario gravimétrico.

POLÍGONO	t=(t1-t0)	b (mGal/h)	U	ea (mGal)	EC	T (mGal)
POL1	02:16	1.283	4	0.025	-0.067	0.193
POL2	05:41	1.283	5	0.027	0.122	0.390
POL3	04:39	1.283	5	0.032	-0.058	0.352
POL4	04:53	1.283	4	0.027	0.100	0.338
POL5	05:34	1.283	5	0.028	0.086	0.387
POL6	04:55	1.283	6	0.028	0.105	0.361
POL8	06:27	1.283	5	0.039	0.086	0.469
POL9-1	10:15	1.283	5	0.027	0.069	0.634
POL9-2	08:44	1.283	8	0.038	0.098	0.619
POL10-1	10:46	1.283	5	0.032	0.033	0.678
POL10-2	07:12	1.283	5	0.051	0.117	0.548

Se observa que los resultados obtenidos de error de cierre (EC) y tolerancia (T), muestran satisfactoriamente que nunca se rebaso el umbral de la tolerancia.

4.1.3.4. Correcciones Gravimétricas.

Una vez verificado que los polígonos se encuentran dentro de tolerancia se procede a realizar las correcciones por cambios de presión atmosférica (PA) y altura del instrumento.

La compensación por los cambios atmosféricos se obtendrá a partir de trazar un radio de influencia de 50 km alrededor de cada estación atmosférica (EMA) considerando que los cambios atmosféricos se mantienen constantes (apartado 3.1.2.3) y con el fin de determinar el cubrimiento sobre la zona (Figura 4-8).

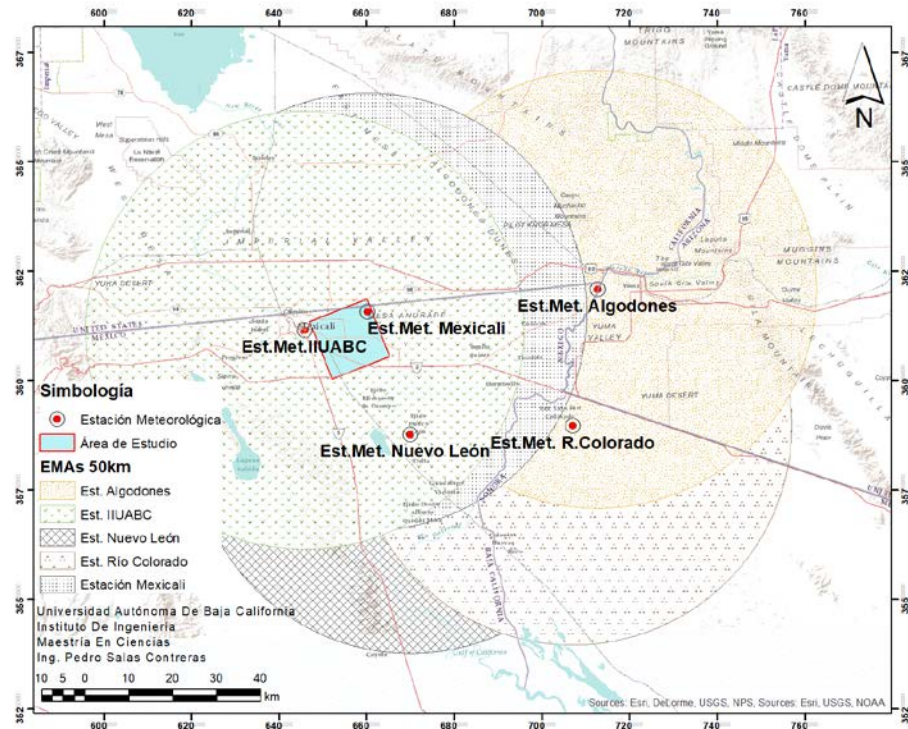


Figura 4-8. Localización de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Círculos alrededor de cada EMA ejemplifica que los parámetros en el área que cubren se mantienen constantes.

Se observa que las estaciones Nuevo León, IIUABC y Mexicali están cubriendo totalmente la zona de estudio, en tanto que Río Colorado y Algodones están parcialmente cubriendo la zona. Por lo tanto, los datos utilizados para los cálculos de variaciones de gravedad por presión atmosférica en la zona de estudios son las estaciones de Nuevo León, IIUABC y Mexicali.

Considerando el factor de conversión para la conversión de presión atmosférica a unidades de gravedad ($-0.3 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$) se obtiene el siguiente grafico que muestra las variaciones de PA y respectiva correspondencia de variación de gravedad en μGales por miliBar para periodo de trabajo en la campaña 2015 (Figura 4-9).

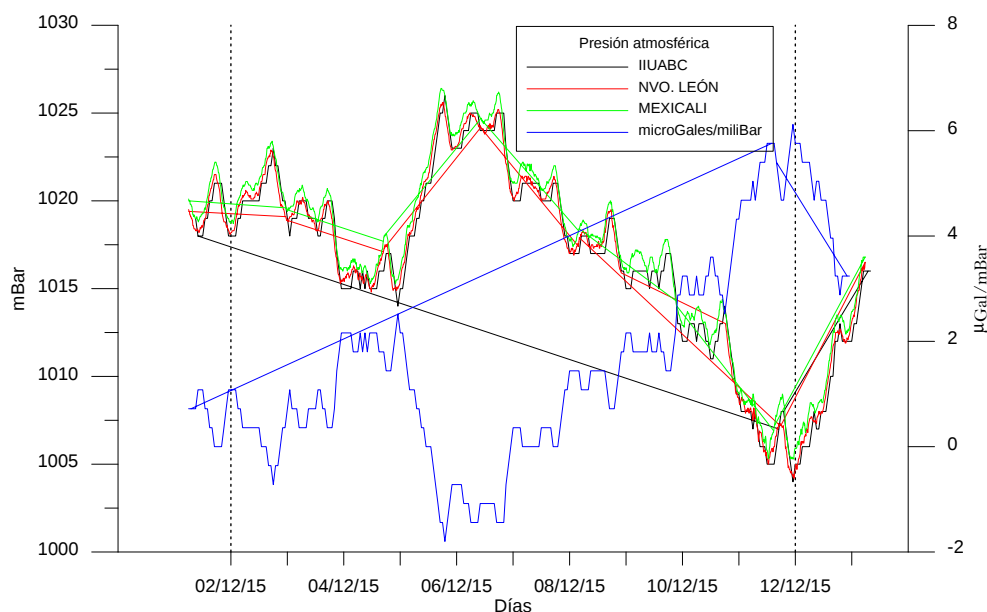


Figura 4-9. Presión atmosférica (mBar) y correspondiente corrección gravimétrica en $\mu\text{Gal}/\text{mB}$ con respecto de las estaciones IIUABC, Mexicali y Nuevo León.

Las variaciones observadas en la primera campaña están en el rango de $\pm 7 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$, por lo tanto, los efectos que pudieran derivar de los cambios atmosféricos son relativamente insignificantes y no son tomados ni aplicados a las correcciones de datos gravimétricos procesados.

Finalmente, es importante realizar la compensación por la altura del instrumento gravimétrico respecto del punto de referencia (varilla) del banco geodésico. Tal compensación se realiza tomando en las constantes de la dimensión del gravímetro en lo referente a la ubicación del sensor, que es sumado a la altura medida en la base del gravímetro CG-5 (89 mm) y posteriormente este valor es traducido de metros a mGal mediante la constante de aire libre, este proceso de ajuste es estimado mediante el programa CG5Tool, que a continuación se explicará.

4.1.3.5. CG5Tool.

De tal manera que los datos de cada polígono adquirido en campo son ingresados al programa mediante la interfaz que permite la edición de los mismos archivos. Una vez editados los archivos, se tiene que aplicar las correcciones de marea gravimétrica y altura del instrumento; el primero realizado a partir de la fórmula de Longman obtenidas directamente del gravímetro y el segundo compensado por medio de alturas medidas en campo y plasmadas en digital en formato de archivo de alturas creado con herramientas del mismo programa (Figura 4-10).

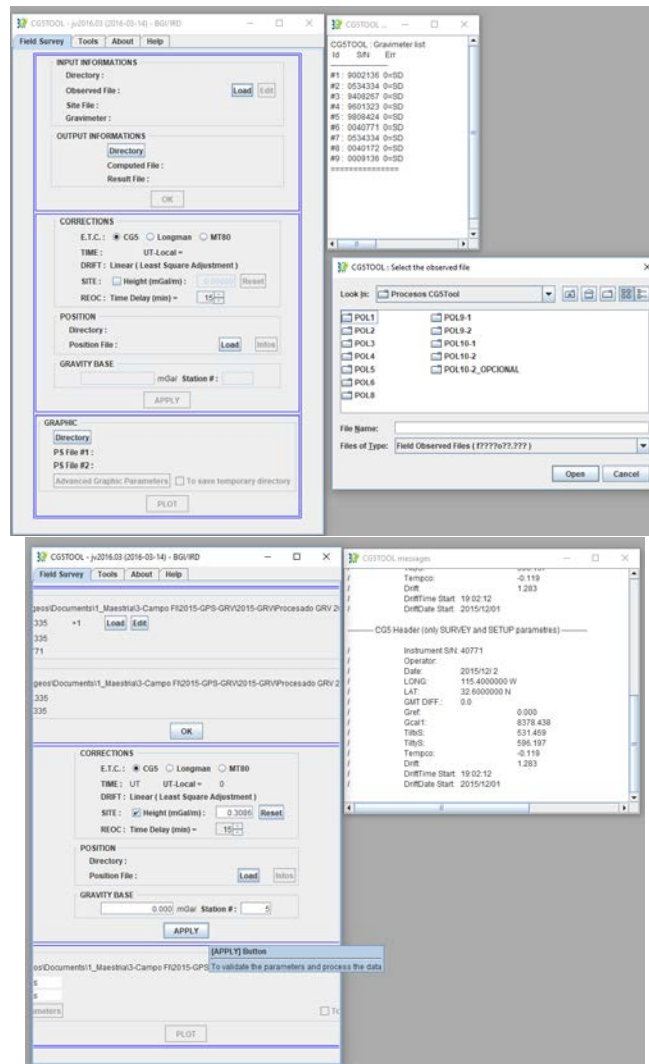


Figura 4-10. Interfaz Cg5Tool para procesado y ajuste de observaciones gravimétricas por polígono.

Paso siguiente es remover derivas remanentes, que es posible a partir de la doble lectura obtenida al inicio y cierre del polígono, este proceso es similar al explicado en apartado 3.1.2.1. Estas derivas remanentes son resultado de la fatiga del sistema de medición del instrumento y que se asocian al traslado del gravímetro entre bancos (Miranda *et al.*, 2013).

Finalmente, mediante el programa GMT (*Generic Mapping Tools*) distribuido con licencia libre es posible visualizar los datos de entrada, ajuste y resultados del proceso en CG5Tool como se muestra en la figura 4-12 y 4-13, que ejemplifica la respuesta obtenida al procesar el polígono 3 de la campaña 2015.

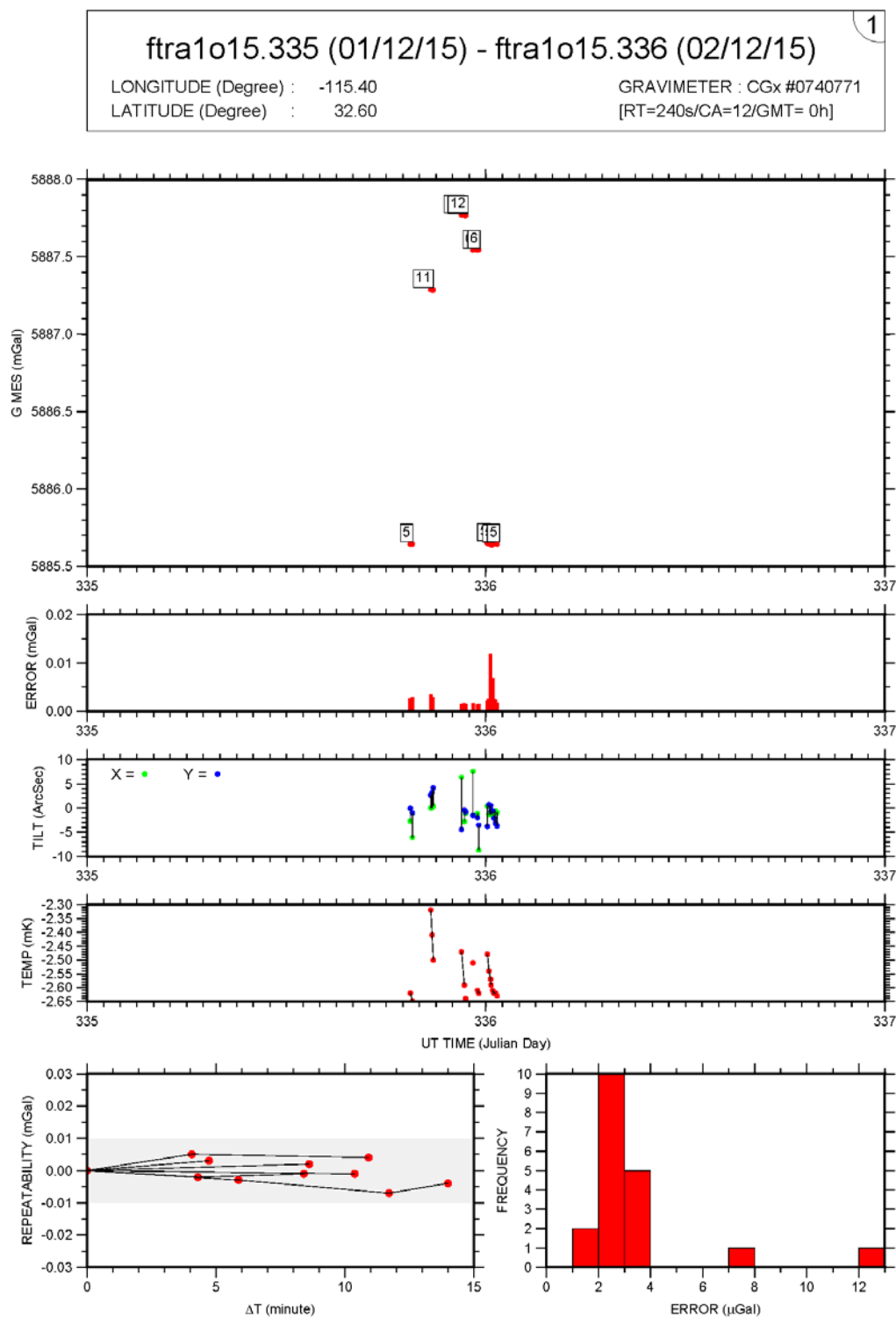


Figura 4-11. Hoja 1 de datos de entrada del polígono 3 en el programa CGxTool, obtenidas del programa GMT. De arriba hacia abajo: visualización de curva de deriva; desviaciones estándar de las series de observaciones; inclinación del plano x, y; temperatura (mK); repetitividad de las observaciones e histograma de las observaciones.

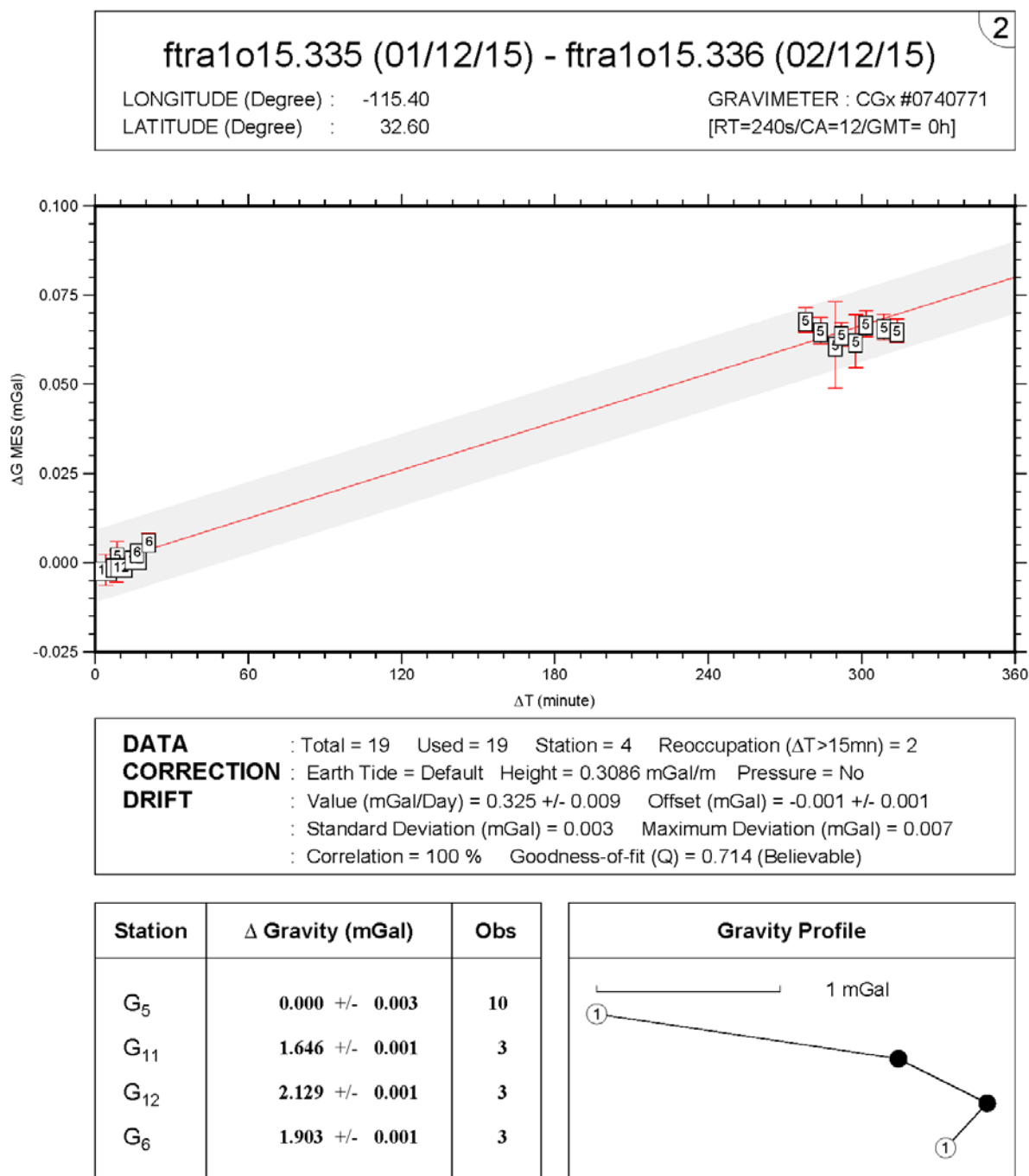


Figura 4-12. Hoja 2 de resultados de datos del polígono 3 respecto de la estación G5. De arriba hacia abajo: gráfica y parámetros del modelo de regresión de deriva remanente y diferencias de gravedad con respecto al vértice inicial.

En la figura 4-11 se muestra la gráfica de deriva y estadística de los datos. En tanto que en la gráfica 4-12, información sobre los parámetros de la deriva remanente calculada en 0.325 ± 0.009 mGal/día, con una correlación de 100%, indicando un ajuste confiable. Los dos últimos recuadros de la figura 4-12 muestra las diferencias de gravedad con respecto al banco P2A5 y perfiles gravimétricos.

Para cada polígono se realizó este proceso y los datos de diferencias de gravedad (Δ gravity) obtenidos son utilizados para la elaboración de las ecuaciones de observación.

4.1.3.6. Ajuste de Redes Gravimétricas de 2015.

Los valores de gravedad y error correspondiente de cada banco son utilizados para obtener los valores de cada vector Δg (diferencial de gravedad entre bancos) los cuales se usarán para la elaboración de las ecuaciones de observación como se explicó en el subcapítulo 3.1.4.

Tabla 4-2. Ejemplo del proceso para obtener Δg en cada vector. Utilizando el polígono 3 campaña 2015 de la figura 4-13.

POLÍGONO 3

$$\begin{aligned}\Delta g_1 &= P2A11 - P2A5 = 1.646 \pm 0.001 - (0.00 \pm 0.003) = (1.646 - 0.00) \pm (\sqrt{0.001^2 + 0.003^2}) \\ &= 1.646 \pm 0.004 \\ \Delta g_2 &= P2A12 - P2A11 = 2.129 \pm 0.001 - (1.646 \pm 0.001) = (2.129 - 1.646) (\sqrt{0.001^2 + 0.001^2}) \\ &= 0.483 \pm 0.002 \\ \Delta g_3 &= P2A6 - P2A12 = 1.903 \pm 0.001 - (2.129 \pm 0.001) = (1.903 - 2.129) \pm (\sqrt{0.001^2 + 0.001^2}) \\ &= -0.227 \pm 0.002 \\ \Delta g_4 &= P2A5 - P2A6 = 0.00 \pm 0.003 - (1.903 \pm 0.001) = (0.00 - 1.903) \pm (\sqrt{0.003^2 + 0.001^2}) \\ &= -1.903 \pm 0.003\end{aligned}$$

Cada segmento calculado (Δg) corresponde a la diferencia de gravedad medida entre bancos y la secuencia se determina de acuerdo al itinerario de adquisición de datos en campo. Los 46 segmentos formados y calculados de los 11 polígonos se verifican con su respectiva correspondencia de enlace (segmentos pares) entre polígonos como parte de la calidad de la red obtenida (Figura 4-13).

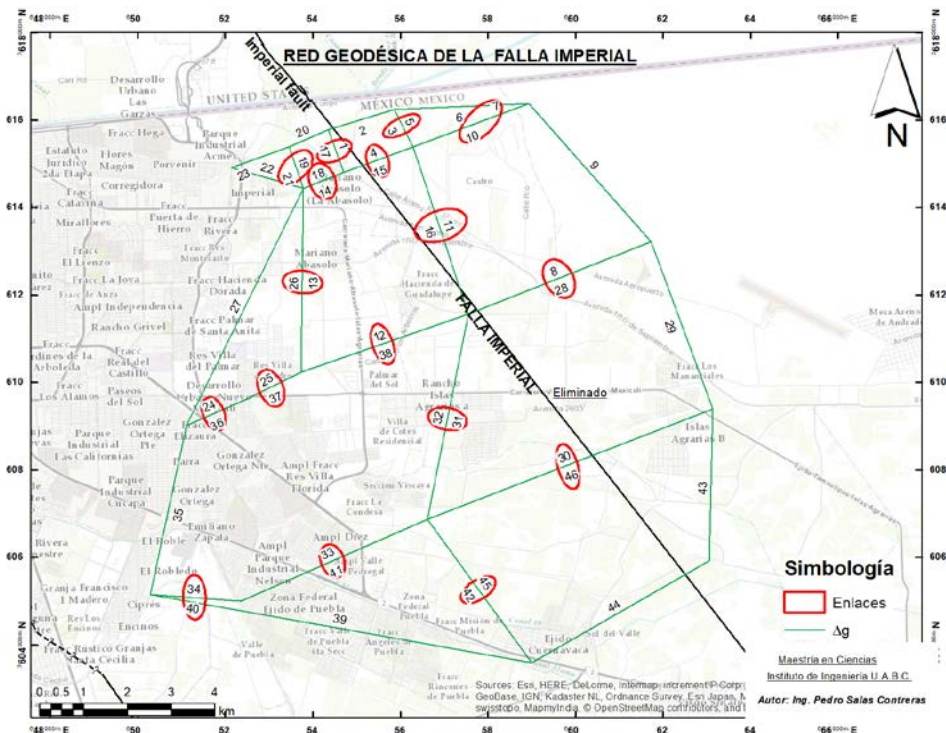


Figura 4-13. Localización y secuencia de segmentos (Δg) medidos. Óvalos identifican los enlaces entre polígonos.

A continuación, se muestran los valores estimados Δg para los polígonos de la figura 4-13 en donde se determinaron inconsistencias en Δg_{30} (0.509 mGal) contra Δg_{46} (0.077 mGal) y Δg_{31} (4.812 mGal) contra Δg_{32} (4.681 mGal) donde las variaciones son 0.077 y 0.131 mGal, respectivamente (Tabla 4-3). Después de realizar una comprobación del modelo con estos valores y sin estos se determinó que el impacto de ellos en el modelo se vería reflejado en la precisión de los valores de gravedad estimados, así que se tomó la decisión de eliminar estos valores y en conjunto los segmentos del polígono 9-1, como se observa en la figura 4-14.

Tabla 4-3. Diferencias entre segmentos de Δg identificados en la figura 4-14. Remarcados valores anómalos por encima de 0.065 mGal.

DIFERENCIAS DE GRAVEDAD REPETIDAS 2015														
	Δg (mgal)			Δg (mgal)		Diferencia		Δg (mgal)			Δg (mgal)		Diferencia	
Δg_1	1.646	vs	Δg_{17}	1.629	$\approx$	0.017		Δg_{19}	1.176	vs	Δg_{21}	1.237	$\approx$	0.061
Δg_3	0.227	vs	Δg_5	0.215	$\approx$	0.011		Δg_{24}	1.170	vs	Δg_{36}	1.155	$\approx$	0.015
Δg_4	1.903	vs	Δg_{15}	1.897	$\approx$	0.006		<u>Δg_{25}</u>	<u>0.445</u>	vs	<u>Δg_{37}</u>	<u>0.466</u>	$\approx$	<u>0.021</u>
Δg_7	2.514	vs	Δg_{10}	2.505	$\approx$	0.010		<u>Δg_{30}</u>	<u>0.509</u>	vs	Δg_{46}	0.433	$\neq$	<u>0.077</u>
Δg_8	2.697	vs	Δg_{28}	2.669	$\approx$	0.027		<u>Δg_{31}</u>	<u>4.812</u>	vs	Δg_{32}	4.681	$\neq$	<u>0.131</u>
Δg_{11}	4.119	vs	Δg_{16}	4.133	$\approx$	0.015		<u>Δg_{33}</u>	<u>1.515</u>	vs	<u>Δg_{41}</u>	<u>1.529</u>	$\approx$	<u>0.014</u>
Δg_{12}	2.313	vs	Δg_{38}	2.336	$\approx$	0.023		Δg_{34}	0.679	vs	Δg_{40}	0.645	$\approx$	0.034
Δg_{13}	3.179	vs	Δg_{26}	3.175	$\approx$	0.003		Δg_{42}	5.267	vs	Δg_{45}	5.269	$\approx$	0.002
Δg_{14}	1.370	vs	Δg_{18}	1.369	$\approx$	0.001								

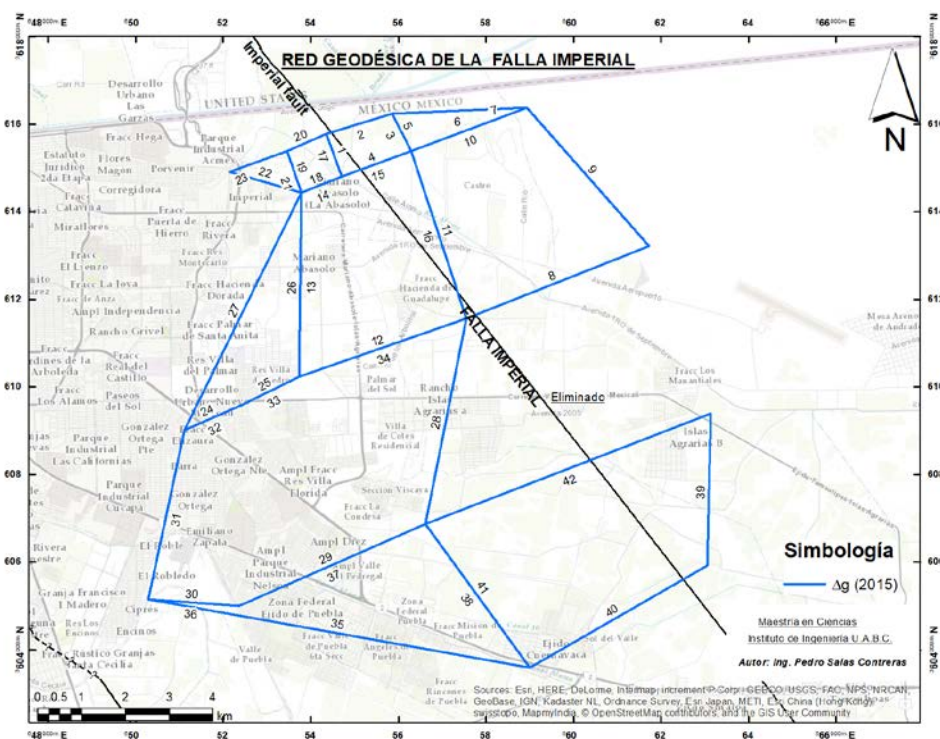


Figura 4-14. Red gravimétrica final de la campaña 2015 y segmentos (diferencias de gravedad) utilizados.

A partir de este momento se puede iniciar con la elaboración de las ecuaciones de observación, donde los parámetros de la matriz de diseño (A), términos independientes (L_b) y valores de ponderación (P) son obtenidos a partir de la tabla 4-4 de resultados de las diferencias de gravedad.

Tabla 4-4. Estimación de los valores de Δg (diferencias de gravedad) para la matriz de términos independientes. Para la matriz de ponderaciones se obtiene a partir de la normalización de las desviaciones estándar ($1/D.E.$) para la campaña 2015. D.E. Δg significa desviación estándar de la diferencia de gravedad; #Ec. Obs. corresponde al número de enlace o ecuación de observación (figura 4-15)

Polígono	De	A	Δg (mgal)	D.E. Δg (Mgal)	NORMALIZADO (1/D.E.)	# Ec. Obs.
POL 3	P2A5	P2A11	1.646	0.007	0.067	1
	P2A11	P2A12	0.483	0.006	0.078	2
	P2A12	P2A6	-0.227	0.006	0.088	3
	P2A6	P2A5	-1.903	0.007	0.074	4
POL 4	P2A6	P2A12	0.215	0.007	0.075	5
	P2A12	P2A8	-2.730	0.005	0.100	6
	P2A8	P2A6	2.514	0.006	0.085	7
POL 5	P3A7	P3A10	-2.697	0.002	0.333	8
	P3A10	P2A8	4.311	0.001	0.411	9
	P2A8	P2A6	2.505	0.002	0.330	10
	P2A6	P3A7	-4.119	0.002	0.286	11
POL 6	P3A7	P3A4	-2.313	0.006	0.082	12
	P3A4	P2A4	3.179	0.009	0.056	13
	P2A4	P2A5	1.370	0.009	0.053	14
	P2A5	P2A6	1.897	0.006	0.079	15
	P2A6	P3A7	-4.133	0.006	0.086	16
POL 2	P2A11	P2A5	-1.629	0.016	0.032	17
	P2A5	P2A4	-1.369	0.014	0.035	18
	P2A4	P2A10	1.176	0.023	0.022	19
	P2A10	P2A11	1.822	0.023	0.021	20
POL 1	P2A10	P2A4	-1.237	0.004	0.132	21
	P2A4	P2A9	-0.641	0.004	0.137	22
	P2A9	P2A10	1.878	0.003	0.161	23
POL 8	P3A2	P3A3	1.170	0.015	0.033	24
	P3A3	P3A4	0.445	0.014	0.037	25
	P3A4	P2A4	3.175	0.012	0.042	26
	P2A4	P3A2	-4.791	0.014	0.036	27
POL 9-2	P3A7	P4A5	-4.681	0.006	0.081	28
	P4A5	P4A2	1.515	0.001	0.530	29
	P4A2	P4A1	-0.679	0.001	1.000	30
	P4A1	P3A2	-0.112	0.001	0.556	31
	P3A2	P3A3	1.155	0.003	0.195	32
	P3A3	P3A4	0.466	0.003	0.177	33
	P3A4	P3A7	2.330	0.006	0.080	34
POL 10-2	P5A6	P4A1	6.151	0.005	0.094	35
	P4A1	P4A2	0.645	0.004	0.124	36
	P4A2	P4A5	-1.529	0.004	0.120	37
	P4A5	P5A6	-5.267	0.005	0.092	38
POL 10-1	P4A10	P5A9	-3.359	0.017	0.030	39
	P5A9	P5A6	-2.342	0.018	0.028	40
	P5A6	P4A5	5.269	0.014	0.036	41
	P4A5	P4A10	0.433	0.012	0.042	42

La ponderación observada en la tabla 4-4 es obtenida a partir del inverso de la desviación estándar ($\frac{1}{D.E.}$) arrojada en la estimación de diferencias de gravedad de las 42 observaciones de la campaña.

De tal manera que la matriz de diseño “a” quedará constituida por 42 observaciones, 18 incógnitas y asignando un punto conocido fijo P2A10 con un valor 0.00 ± 0.010 mGal, entonces, la solución

del sistema será derivar cada incógnita para construir la matriz de diseño (inciso a y b) y de términos independientes (l), por ejemplo, la matriz de diseño “a” y términos independientes del polígono 2:

a) Derivación de incógnitas

$$P2A5 - P2A11 = -1.629 \pm 0.004 + Vi = \Delta g_{17}$$

$$P2A4 - P2A5 = -1.369 \pm 0.002 + Vi = \Delta g_{18}$$

$$-P2A4 = 1.176 \pm 0.010 - P2A10 = \Delta g_{19}$$

$$P2A11 = 1.822 \pm 0.010 + P2A10 = \Delta g_{20}$$

b) Transformando cada operación en forma matricial, considerando 1 (uno) para incógnitas positivas, 0 (cero) donde no aparece incógnita que corresponde al renglón y -1 (uno negativo) para la incógnita con su signo negativo, se tiene:

$$a = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P2A5 \\ P2A11 \\ P2A4 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, la matriz de términos independientes (l), residuales (v) y ponderación (p) es:

$$l = \begin{bmatrix} -1.629 \\ -1.369 \\ 1.176 \\ 1.822 \end{bmatrix}; v = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix};$$

$$p = \begin{bmatrix} 1/0.004 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/0.002 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/0.01 \end{bmatrix}$$

Cada polígono medido es transformado y agregado a la matriz de diseño general “A” quedando finalmente constituida por 42 filas (observaciones) y 18 columnas (incógnitas), Por otra parte, la matriz de términos independientes (L) y residuales (V) tendrán una columna y 42 filas.

El siguiente paso es la solución del sistema de matrices por mínimos cuadrados, debido a las dimensiones de las matrices utilizadas el algoritmo es programado en la plataforma de *Matlab* a partir de la metodología mencionada en el apartado 3.3.3 de las operaciones desarrolladas de Wolf *et al.* (1995) y que se puede encontrar al final de este trabajo (Anexos).

Finalmente, los valores de cada punto gravimétrico y desviación estándar resultado del ajuste por mínimos cuadrados se muestran la tabla 4-5 y figuras 4-15 y 4-16.

Tabla 4-5. Valores de gravedad ajustados de la campaña 2015 en mGal. GRV es valor ajustado de gravedad en mGal, So es desviación estándar en mGal.

Estación	GRV (mGal)	So($\pm$) (mGal)
P2A5	0.145	0.013
P2A11	1.790	0.014
P2A12	2.268	0.014
P2A6	2.045	0.013
P2A8	-0.462	0.014
P3A7	-2.077	0.013
P3A10	-4.774	0.014
P3A4	-4.401	0.013
P2A4	-1.228	0.008

Estación	GRV (mGal)	So($\pm$) (mGal)
P2A9	-1.874	0.008
P3A2	-6.021	0.014
P3A3	-4.864	0.014
P4A5	-6.757	0.015
P4A2	-5.236	0.015
P4A1	-5.909	0.015
P5A6	-12.039	0.017
P4A10	-6.327	0.023
P5A9	-9.692	0.025

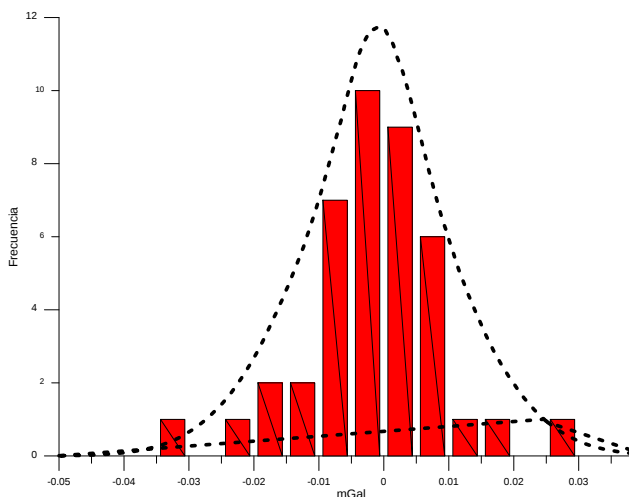


Figura 4-15. Histograma ajustado de residuales gravimétricos obtenido del ajuste de red 2015. Línea punteada (color negra) representa la distribución normal ajustada con media -0.001 mGal y desviación estándar 0.004 mGal.

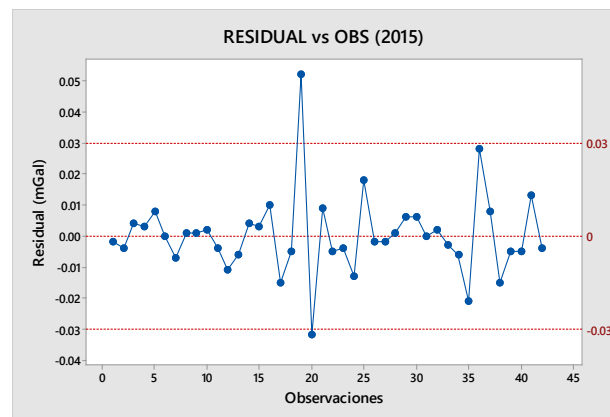


Figura 4-16. Comportamiento de residuales de campaña 2015 de gravimetría. Línea con puntos (azules) representa la magnitud de cada residual obtenido del ajuste.

El comportamiento obtenido en los valores de los residuales en los gráficos (histograma y grafica de residuales) tanto en su magnitud y comportamiento indican que no hay errores sistemáticos y la forma del histograma indican que se distribuyen normalmente con media -0.001 mGal y desviación estándar 0.00403 obtenidos a partir del ajuste. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3, el modelo matemático propuesto permite comprobar por métodos estadísticos el comportamiento del ajuste, como se muestra a continuación.

4.1.3.7. Comportamiento Estadístico.

4.1.3.7.1. Prueba Chi-Cuadrada

Para comprobar la compatibilidad estadística de la varianza *a posteriori* contra la *priori* del observable peso de unidad se aplicó la prueba Chi- cuadrada.

Por lo tanto, para la campaña de gravimetría de 2015 se tiene que los datos para la varianza *a posteriori* es $\hat{\sigma}_0^2 = 0.000016$ y la varianza *a priori* se fijó en $\sigma_0^2 = 0.000029$, que corresponde a una desviación estándar promedio de $\sigma = 0.005$ mGals, sustituyendo en la ecuación 3-6 con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y considerando 24 GL, se tiene:

$$X_{(24, 1-0.05/2)}^2 < \frac{0.000016}{0.000029} (24) < X_{(24, 0.05/2)}^2$$

Entonces a partir de tablas publicadas los valores Chi- Cuadrada de 0.975 y 0.025 con 24 GL es:

$$X_{(0.975=12.4)}^2 < 13.71 < X_{(0.025=39.3)}^2$$

Para esta campaña la hipótesis nula es aceptada ($H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$) aun nivel de confianza del 95% y por lo tanto el ajuste de la red es aceptable.

Por otra parte, para determinar la sensibilidad de la red ante posibles errores graves o groseros (*outliers*) presentes en los datos, se realizó un estudio de la sensibilidad interna de la red, aplicando la prueba de Baarda, cálculo de redundancias, mínimo error detectable y de homogeneidad interna, cuyos resultados se describen a continuación.

4.1.3.7.2. Prueba de Baarda

Para la prueba de Baarda se aplicó la ecuación 3-11 a los 42 residuales. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la figura 4-17 (A). De esta, se puede deducir que 41 observables pasaron la prueba del valor crítico $w_0 = 2.80$ de la prueba de Baarda para un nivel de confianza del 95%. En tanto que el observable 30 correspondiente al desnivel entre los vértices P4A2 y P4A1, con un valor del parámetro de Baarda de 3.334, debería ser rechazado.

4.1.3.7.3. Redundancias del Ajuste

Esta prueba es obtenida a partir de la aplicación de la ecuación 3-10 y el resultado es graficado en la figura 4-17 (B). De los valores de los números de redundancias obtenidos se puede decir que el 88% (37) de los observables caen en la región de suficiente a bien controlado ($0.3 < r_i < 1$), el 9% (4) en la de suficientemente controlado ($0.1 < r_i > 0.3$), correspondiendo a los siguientes segmentos (desniveles):

- 9: P3A10 – P2A8;
- 29: P4A5 – P4A2;
- 30: P4A2 – P4A1 y
- 42: P4A5 – P4A10.

El restante 3% en la de débilmente controlado ($0.01 < r_i < 0.1$) con un valor de 0.07. Este último valor corresponde al observable 31 entre los desniveles de los bancos P3A2 y P4A1. Ningún valor de la red cayó en la región de mal controlado ($0.0 < r_i < 0.01$).

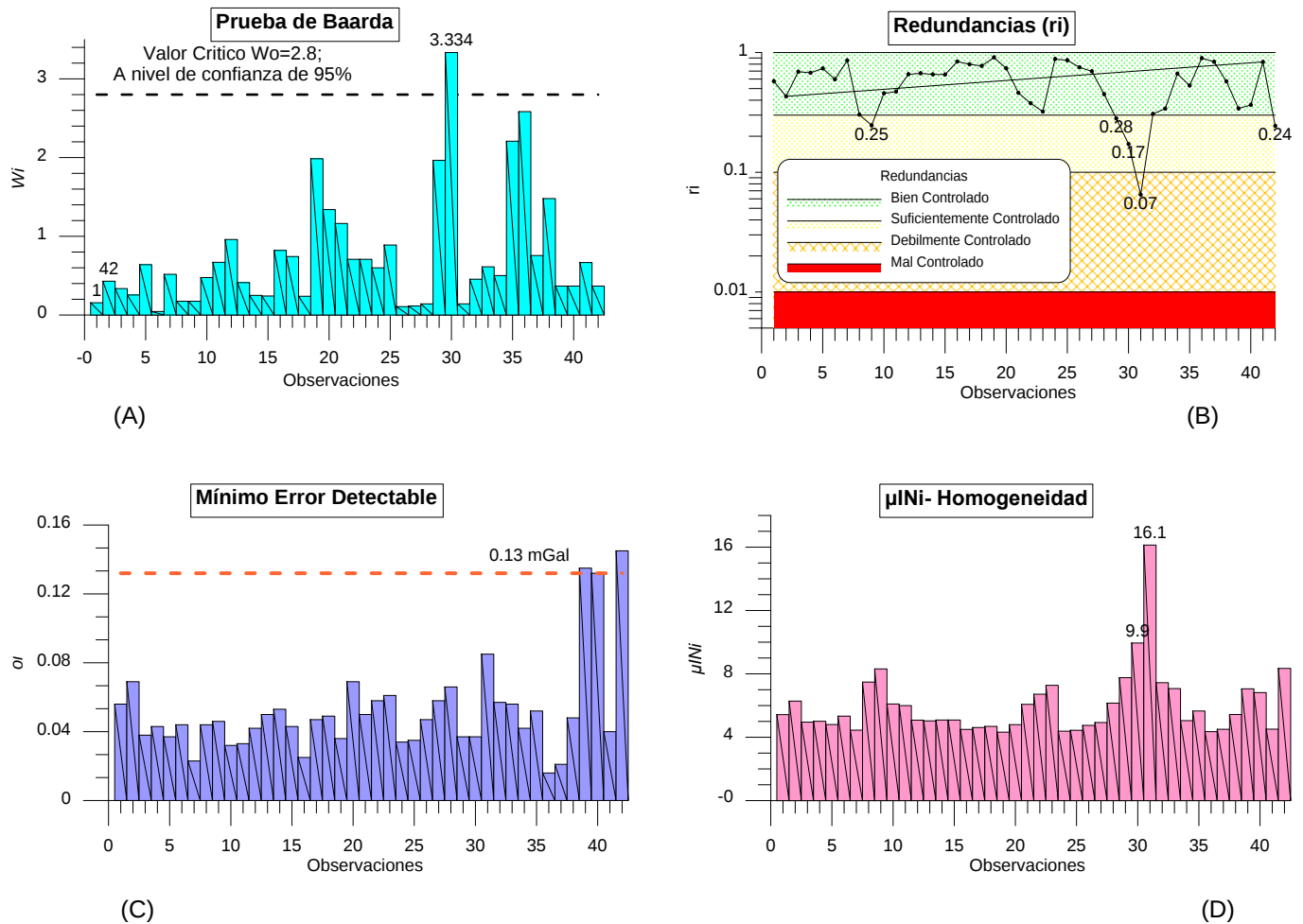


Figura 4-17. Pruebas estadísticas de observables ajustados de campaña 2015. (A) Grafico de prueba de Baarda con un nivel de confianza de 95% a partir de valor crítico 2.8. (B) Redundancias obtenidas y clasificación de acuerdo control en la red de 2015. (C) 0.13 es el Mínimo error detectable. (D) Homogeneidad de la red correlacionando con grafico (B) confirma la debilidad en el control de la red en el observable 31.

4.1.3.7.4. Mínimo Error Detectable.

El mínimo error detectable para un observable se obtiene de la ecuación 3-13, tomando en cuenta lo definido en la sección 3.1.5.2.2, la fiabilidad interna tendrá una probabilidad de 80% (β) a un nivel de significancia de $\alpha = 0.001$ y el sesgo o parámetro de traslación de $\delta = 4.12$. Los resultados de los cálculos se muestran en la gráfica de la figura 4-17 C. De esta, se deduce que el error máximo que puede deslizarse en uno de los observables y no ser detectados es de 0.13 mGal correspondiente a los observables 39, 40 y 42.

Pero la fiabilidad interna en sí misma no proporciona información sobre la repercusión o impacto que pueden tener la aparición de errores graves en los parámetros ajustados. Se realizó el análisis

de la fiabilidad externa de la red con la finalidad de observar cómo influyen dichos errores. La fiabilidad externa es definida por los parámetros de homogeneidad externa y los vectores de fiabilidad externa, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.1.3.7.5. Parámetro de Homogeneidad Interna.

Los resultados del parámetro de homogeneidad interna, calculando con la ecuación 3-13 y que se muestran en la gráfica de la figura 4-17 D. confirma la información obtenida por los números de redundancia (Figura 4-17 B). Se observa que a mayores redundancias menor homogeneidad y por lo tanto mejor control de la red. Existen valores anómalos en los observables 30 y 31 que muestran valores por encima de 9 mGal.

4.1.3.7.6. Fiabilidad Externa: Parámetros de Homogeneidad y Vectores de Fiabilidad.

Parámetros de homogeneidad externa. Los resultados del parámetro de homogeneidad externa, calculado con la ecuación 3-16, que se muestra en la gráfica de la figura 4-18, confirma la información obtenida por los números de redundancia (figura 4-17 B) y los parámetros de homogeneidad interna (Figura 4-17D). Los valores de la calidad del ajuste son inversamente proporcionales al valor de dichos parámetros. En la gráfica de la figura 4-18 se muestra que 30 observaciones ajustadas son de buena calidad ($\mu EX_i < 5$), 11 de regular calidad ($5 \leq \mu EX_i \leq 10$) y una de las observaciones (31) se determinó de mala calidad ($\mu EX_i > 10$).

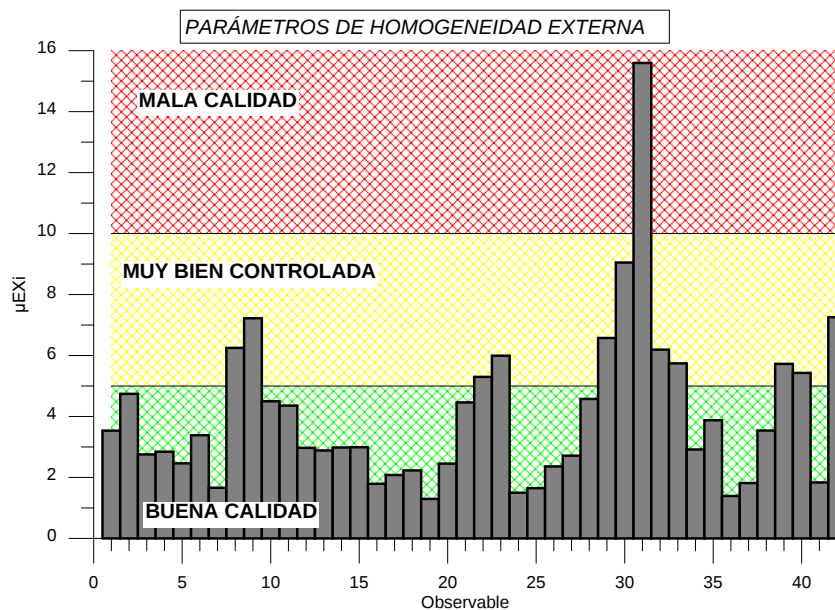


Figura 4-18. Parámetros de homogeneidad externa de la campaña 2015 de la red 2015.

Vectores de fiabilidad externa. Para determinar la influencia de los errores groseros no detectado de los observables en los parámetros ajustados ($\hat{X}$), se estimaron los vectores de fiabilidad externa (ecuación 3-15). Cuyo comportamiento y magnitud se muestran en la figura 4-19.

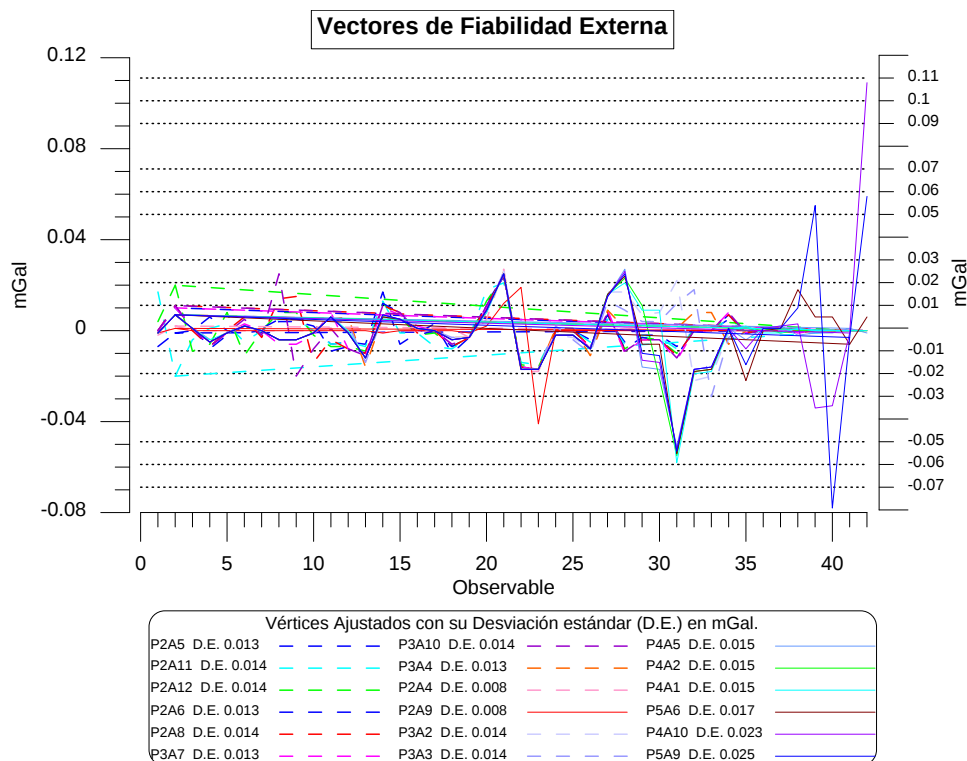


Figura 4-19. Vectores de fiabilidad externa, obtenidos a partir de cada uno de los observables ajustados en el modelo matemático de la red gravimétrica 2015.

De esta, se deduce que los errores graves presentes en los observables impactan a los vértices P4A1, P5A6, P4A10 y P5A9. La magnitud de los vectores de fiabilidad externa de los observables 23, 31, 39, 40 y 42 se encuentran por encima de la desviación estándar (D.E.) de los valores ajustados de dichos vértices.

4.1.4. Campaña de Gravimetría de 2016.

La adquisición de campo se realizó del 27 al 30 de junio de 2016, sobre los mismos polígonos trazados en la temporada de diciembre 2015. En esta ocasión el instrumento gravimétrico utilizado es un CG-3 de *Scintrex*.

4.1.4.1. Deriva Instrumental

De forma similar que la campaña anterior se actualizó la deriva instrumental del gravímetro CG-3 en el que se realizó con una semana de antelación a la campaña de campo. El procedimiento consistió en medir continuamente por más de 12 horas cada 120 segundos en modo cíclico. En donde, del valor de 0.1541 se actualizó a 0.0694 mGal/día.

4.1.4.2. Temperatura del Instrumento

Para este instrumento (CG-3), el sistema de compensación de temperatura se ajustó mecánicamente mediante tornillos a un rango de temperatura de -1.0 a 1.0 mK de acuerdo al manual del equipo (*Scintrex*, 1995).

4.1.4.3. Calidad de los Datos de Campo: Cierre y Tolerancia.

Tomando como base la planificación realizada en la campaña 2015 (figura 4-7), durante 5 días se recorrieron los polígonos. En cada vértice de la red se obtuvieron sesiones de lecturas de 180 segundos con muestras cada segundo, en cada sitio se tomaron al menos 5 sesiones de datos. De cada grupo de mediciones se seleccionaron 3 a 4 lecturas.

Como parte de la calidad de los datos que integrarán la red, se realizó la verificación de los valores de cierre de cada polígono mediante la aplicación de la ecuación 3-5. En la tabla 4-6 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-6. Error de cierre (EC) y tolerancia (T) de los polígonos medidos del 27 de junio al 1 de julio de 2016. Donde ea= desviación estándar promedio (D.E.); u= número de ejes del polígono; b= deriva del gravímetro; t= tiempo de recorrido del itinerario gravimétrico.

POLÍGONO	t=(t1-t0)	b (mGal/h)	U	ea (mGal)	EC	T (mGal)
POL1	02:55	0.003	4	0.050	0.045	0.150
POL2	04:23	0.003	5	0.042	0.021	0.145
POL3	03:35	0.003	5	0.036	0.018	0.123
POL4	02:30	0.003	4	0.034	0.032	0.103
POL5	03:10	0.003	5	0.045	0.035	0.152
POL6	03:45	0.003	6	0.045	0.027	0.167
POL8	03:14	0.003	5	0.044	0.023	0.149
POL9-1	03:26	0.003	5	0.045	0.025	0.154
POL9-2	05:35	0.003	8	0.054	-0.021	0.232
POL10-1	04:30	0.003	5	0.052	0.025	0.176
POL10-2	03:39	0.003	5	0.063	0.029	0.211

Se observa en los resultados que los valores de cierre (EC) y tolerancia (T), muestran satisfactoriamente que nunca se rebaso el umbral de la tolerancia y por lo tanto se puede continuar con el proceso.

4.1.4.4. Correcciones Gravimétricas.

El procedimiento de ajuste de las lecturas gravimétricas se llevó de igual manera que la campaña anterior (apartados 4.1.1.2 y 4.1.1.3) en el programa CG5Tool. Considerando las correcciones de marea remanente, deriva, altura de instrumento.

En el caso de cambios de presión atmosférica nuevamente se consultó las estaciones de interés. La consulta solo mostro información de dos estaciones (Mexicali y Nuevo León), en las demás estaciones propuestas se encontraron en periodo de mantenimiento y no fue posible recabar información de ellas (IIUABC, Algodones y Rio Colorado).

Considerando el factor de conversión de presión de atmosférica en la zona de estudio a unidades de gravedad ($-0.3 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$) se obtiene el siguiente gráfico que muestra las variaciones de presión atmosférica y la compensación correspondiente en unidades de gravedad (figura 4-20).

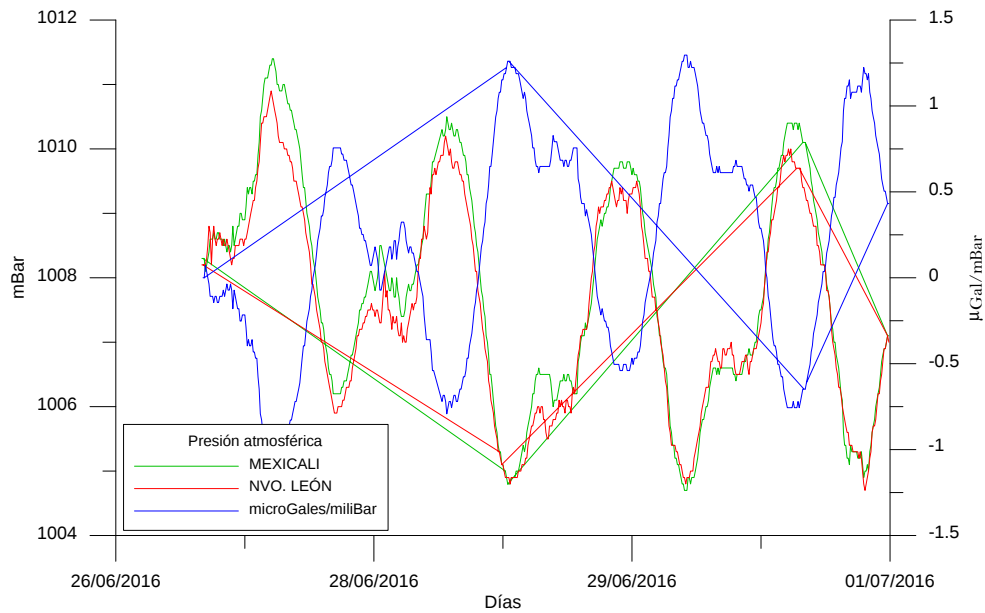


Figura 4-20. Presión atmosférica (mBar) y corrección gravimétrica (CORR. GRV) en mGal/mBar de la estación Mexicali y Nuevo León, para la segunda campaña de junio –julio de 2016.

Los resultados muestran que la presión atmosférica influyo en al menos $\pm 2 \mu\text{Gal mbar}^{-1}$, por lo tanto, los efectos que pudieran derivar de los cambios atmosféricos son insignificantes y no son aplicados a las correcciones de datos gravimétricos procesados.

Finalmente, los valores de gravedad, desviación estándar y ponderación (normalización de pesos) después de las correcciones aplicadas en esta parte incluyendo el proceso en el programa CG5Tool a los datos colectados en campo se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4-7. Cálculo de los Δg (diferencias de gravedad) de los polígonos y normalización de las desviaciones estándar (1/D.E.) de cada uno de los observables (#Ec. de Obs).

Polígono	De	A	Δg (mGal)	D.E. Δg (mGal)	NORMALIZADO (1/D.E.)	# Ec. De Obs.
POL 3	P2A5	P2A11	1.613	0.001	0.442	1
	P2A11	P2A12	0.487	0.002	0.280	2
	P2A12	P2A6	-0.209	0.003	0.151	3
	P2A6	P2A5	-1.891	0.003	0.166	4
POL 4	P2A6	P2A12	0.212	0.005	0.110	5
	P2A12	P2A8	-2.704	0.005	0.095	6
	P2A8	P2A6	2.492	0.004	0.119	7
POL 5	P3A7	P3A10	-2.685	0.002	0.221	8
	P3A10	P2A8	4.341	0.002	0.307	9
	P2A8	P2A6	2.481	0.001	0.479	10
	P2A6	P3A7	-4.137	0.002	0.265	11
POL 6	P3A7	P3A4	-2.259	0.002	0.236	12
	P3A4	P2A4	3.145	0.001	1.000	13
	P2A4	P2A5	1.407	0.002	0.234	14
	P2A5	P2A6	1.844	0.002	0.234	15
	P2A6	P3A7	-4.136	0.002	0.234	16
POL 2	P2A11	P2A5	-1.618	0.003	0.164	17
	P2A5	P2A4	-1.357	0.004	0.117	18
	P2A4	P2A10	1.224	0.004	0.139	19
	P2A10	P2A11	1.750	0.002	0.250	20
POL 1	P2A10	P2A4	-1.204	0.001	0.414	21
	P2A4	P2A9	-0.659	0.001	0.447	22
	P2A9	P2A10	1.863	0.001	0.336	23
POL 8	P3A2	P3A3	1.176	0.003	0.146	24
	P3A3	P3A4	0.472	0.003	0.146	25
	P3A4	P2A4	3.186	0.006	0.084	26
	P2A4	P3A2	-4.834	0.006	0.084	27
POL 9-1	P3A7	P3A10	-2.708	0.003	0.161	28
	P3A10	P4A10	-1.624	0.003	0.156	29
	P4A10	P4A5	-0.398	0.003	0.149	30
	P4A5	P3A7	4.730	0.003	0.153	31
POL 9-2	P3A7	P4A5	-4.712	0.005	0.109	32
	P4A5	P4A2	1.532	0.006	0.079	33
	P4A2	P4A1	-0.600	0.005	0.098	34
	P4A1	P3A2	-0.128	0.005	0.107	35
	P3A2	P3A3	1.157	0.004	0.116	36
	P3A3	P3A4	0.457	0.002	0.265	37
	P3A4	P3A7	2.295	0.001	0.390	38
POL 10-2	P5A6	P4A1	6.139	0.006	0.088	39
	P4A1	P4A2	0.653	0.004	0.120	40
	P4A2	P4A5	-1.528	0.004	0.126	41
	P4A5	P5A6	-5.264	0.006	0.090	42
POL 10-1	P4A10	P5A9	-3.384	0.007	0.071	43
	P5A9	P5A6	-2.301	0.008	0.061	44
	P5A6	P4A5	5.240	0.005	0.097	45
	P4A5	P4A10	0.444	0.003	0.156	46

4.1.4.5. Ajuste de Redes Gravimétricas 2016.

El paso siguiente de la etapa del procesamiento gravimétrico es el ajuste de la red, en el que los valores estimados de la tabla 4-7 se emplean para elaborar las matrices del modelo matemático, y en el que nuevamente se determina el valor fijo del banco P2A10 (Valor de referencia).

Entonces, las dimensiones de la matriz “A” son 18 columnas (incógnitas) y 46 filas correspondientes al número de observaciones.

Posteriormente, con las matrices A, L y V definidas se procesan con el algoritmo del programa Matlab para obtener los valores ajustados ($\hat{X}$) con sus respectivo error (So) que se muestra en la tabla 4-8.

Tabla 4-8. Valores finales de gravedad ajustados de la campaña 2016. GRV valor ajustado de gravedad en mGal, So es desviación estándar en mGal.

Estación	GRV (mGal)	So($\pm$) (mGal)	Estación	GRV (mGal)	So($\pm$) (mGal)
P2A5	0.168	0.012	P2A9	-1.869	0.010
P2A11	1.772	0.012	P3A2	-6.022	0.018
P2A12	2.257	0.015	P3A3	-4.840	0.015
P2A6	2.042	0.013	P4A5	-6.812	0.017
P2A8	-0.442	0.015	P4A2	-5.281	0.021
P3A7	-2.090	0.013	P4A1	-5.909	0.021
P3A10	-4.781	0.015	P5A6	-12.061	0.022
P3A4	-4.368	0.011	P4A10	-6.394	0.019
P2A4	-1.215	0.009	P5A9	-9.770	0.029

Finalmente, con los valores de gravedad ajustados se obtienen los residuales en el que se muestra que el comportamiento (figura 4-21 y 4-22), tanto en su magnitud y comportamiento indican que no hay errores sistemáticos y la forma del histograma indica que se distribuye normalmente con media 0.0009 y desviación estándar 0.008 mGal obtenidos a partir del ajuste.

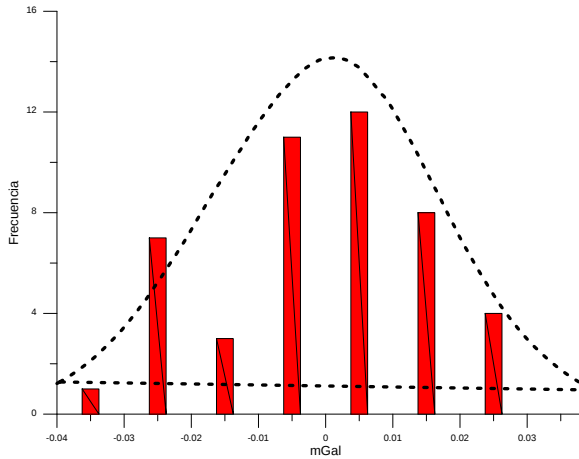


Figura 4-21. Histograma y ajuste de residuales de la campaña 2016.

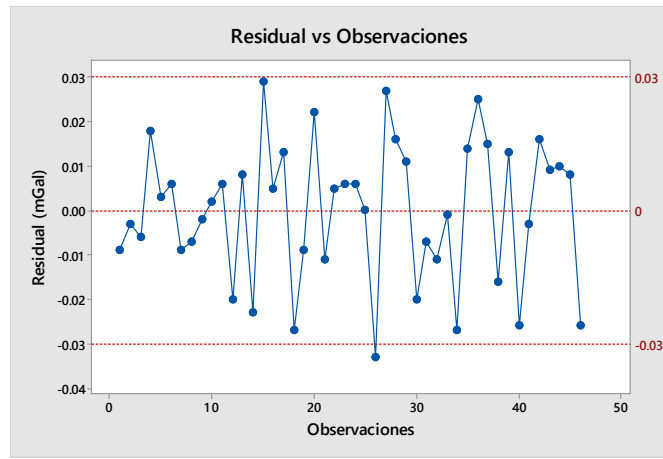


Figura 4-22. Comportamiento de residuales de la campaña 2016 de gravimetría.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3 y siguiendo el mismo proceso que la campaña 2015 es posible que a partir del modelo matemático propuesto es importante comprobar por métodos estadístico el comportamiento del ajuste obtenido en esta campaña y que se explica a continuación.

4.1.4.6. Comportamiento Estadístico

4.1.4.6.1. Prueba Chi- Cuadrada

Primero, para comprobar la compatibilidad estadística de la varianza a *posteriori* del observable peso de unidad se aplicó la prueba Chi- Cuadrada

Por lo tanto, la varianza a *priori* es $\sigma_0^2 = 0.000049$, que corresponde a una desviación estándar promedio de $\sigma = 0.007$ mGal, la varianza a *posteriori* es $\sigma_0^2 = 0.0000644$ con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y considerando 28 GL, se tiene:

$$X_{(28, 1-0.5/2)}^2 < \frac{0.0000644}{0.0000490} (28) < X_{(28, 0.5/2)}^2$$

Entonces a partir de tablas publicadas los valores de Chi- Cuadrada para 28 grados de libertad se tiene:

$$X_{(0.975=15.3)}^2 < 36.83 < X_{(0.025=44.5)}^2$$

Para esta campaña la hipótesis nula es aceptada ($H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$) a un nivel de confianza del 95% y por lo tanto el ajuste de la red es aceptable.

Por otra parte, para entender la sensibilidad de la red ante posibles errores graves o groseros presentes en los datos, se realizó un análisis de sensibilidad interna de la red, aplicando la prueba de Baarda, cálculo de redundancias, mínimo error detectable y de homogeneidad interna, cuyos resultados se describen a continuación.

4.1.4.6.2. Prueba de Baarda

Para la prueba de Baarda se aplica la ecuación 3-11 a los 46 residuales. Los resultados obtenidos se muestran en una gráfica en la figura 4-23 (A). De esta, se deduce que los 46 observables pasaron la prueba del valor crítico $w_0=2.80$ del test de Baarda para un nivel de confianza del 95 %.

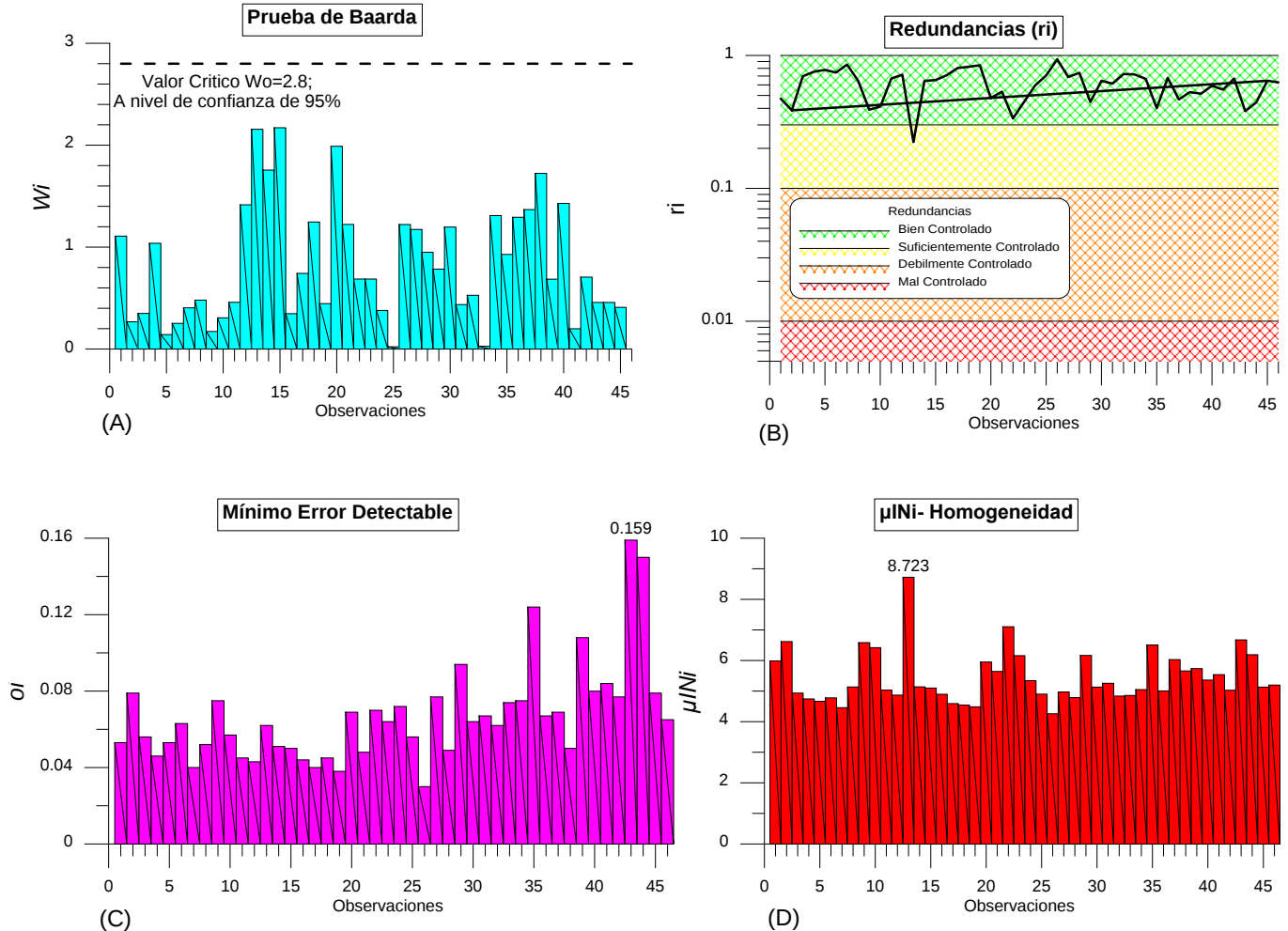


Figura 4-23. Pruebas estadísticas de observables ajustados de campaña 2016. (A) Gráfico de prueba de Baarda con un nivel de confianza de 95% a partir de valor crítico $w_0=2.8$. (B) Redundancias obtenidas y clasificación de acuerdo control en la red de 2016. (C) 0.15 es el Mínimo error detectable. (D) Homogeneidad de la red correlacionando con gráfico (B) confirma la debilidad en el control de la red en el observable 13.

4.1.4.6.1. Redundancias del Ajuste.

Esta prueba es obtenida a partir de la aplicación de la ecuación 3-10 y el resultado es graficado en la figura 4-17(b). De los valores de los numero de redundancia obtenidos se puede decir que 45 observables (98%) están en la región de bien controlados ($0.3 < r_i < 1$), el 2% restante (observable 13) está en la región de suficientemente a débilmente controlado ($0.1 < r_i < 0.3$) (Figura 4-23 B).

4.1.4.6.2. Mínimo Error Detectable.

El mínimo error detectable para un observable se obtiene de la ecuación 3-13, tomando en cuenta lo definido en la sección 3.1.5.2.2, la fiabilidad interna tendrá una probabilidad de 80% (β) a un

nivel de significancia de $\alpha = 0.001$ y el sesgo o parámetro de traslación de $\delta = 4.12$. Los resultados de los cálculos se muestran en la gráfica de la figura 4-23 C. De esta, se deduce que el error máximo que puede deslizarse en uno de los observables y no ser detectados es de 0.159 mGal correspondiente al observable 43.

Pero la fiabilidad interna en sí misma no proporciona información sobre la repercusión o impacto que pueden tener la aparición de errores graves en los parámetros ajustados. De tal forma que es necesario realizar el análisis de la fiabilidad externa de la red con la finalidad de observar cómo influyen dichos errores. La fiabilidad externa es definida por los parámetros de homogeneidad externa y los vectores de fiabilidad externa, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.1.4.6.3. Parámetro de Homogeneidad Interna.

Los resultados del parámetro de homogeneidad interna, calculado con la ecuación 3-14, y que se muestra en la gráfica de la figura 4-23 D, confirma la información obtenida por los números de redundancia (figura 4-23 B). Se observa que, a mayores redundancias menor homogeneidad y por lo tanto mejor control de la red. También se observa que existen un valor anómalo en el observable 13 de polígono correspondiente al desnivel entre los vértices P3A4 a P2A4, que muestra valores por encima de 8 mGal.

El paso siguiente es realizar el análisis de la fiabilidad externa, con la finalidad de conocer la repercusión o impacto que puedan tener la aparición de errores graves en los parámetros ajustados. De similar forma que la campaña 2015 los resultados de la fiabilidad externa son definidos por los parámetros de homogeneidad externa y los vectores de fiabilidad externa, como se muestra a continuación.

4.1.4.6.4. Fiabilidad Externa: Parámetros de Homogeneidad y Vectores de fiabilidad.

Parámetros de homogeneidad externa. Los resultados del parámetro de homogeneidad externa, calculado con la ecuación 3-16, que se muestra en la gráfica de la figura 4-24, que confirma la información obtenida por los números de redundancia (figura 4-23 B) y los parámetros de homogeneidad interna (Figura 4-23 D). Los valores de la calidad del ajuste son inversamente proporcionales al valor de dichos parámetros. En la gráfica de la figura 4-24 se muestra que la mayoría de las observaciones ajustadas son de buena calidad ($\mu EX_i < 5$), 5 de regular calidad ($5 \leq \mu EX_i \leq 10$) y ninguna de las observaciones en mala calidad ($\mu EX_i > 10$).

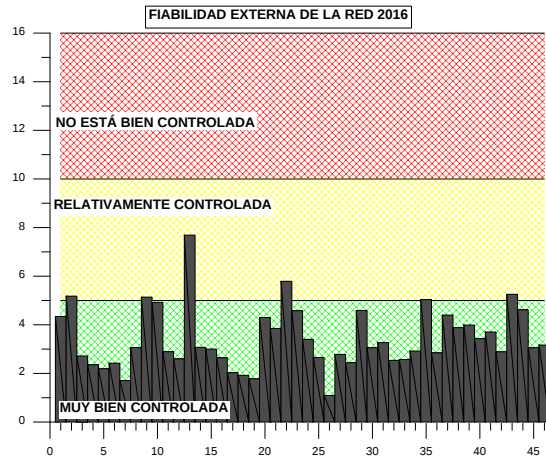


Figura 4-24. Fiabilidad externa a partir de las residuales del modelo de la campaña 2016.

Vectores de fiabilidad externa. Para determinar la influencia de los errores groseros no detectado de los observables en los parámetros ajustados ($\hat{X}$), se estimaron los vectores de fiabilidad externa (ecuación 3-15). Cuyo comportamiento y magnitud se muestran en la figura 4-25.

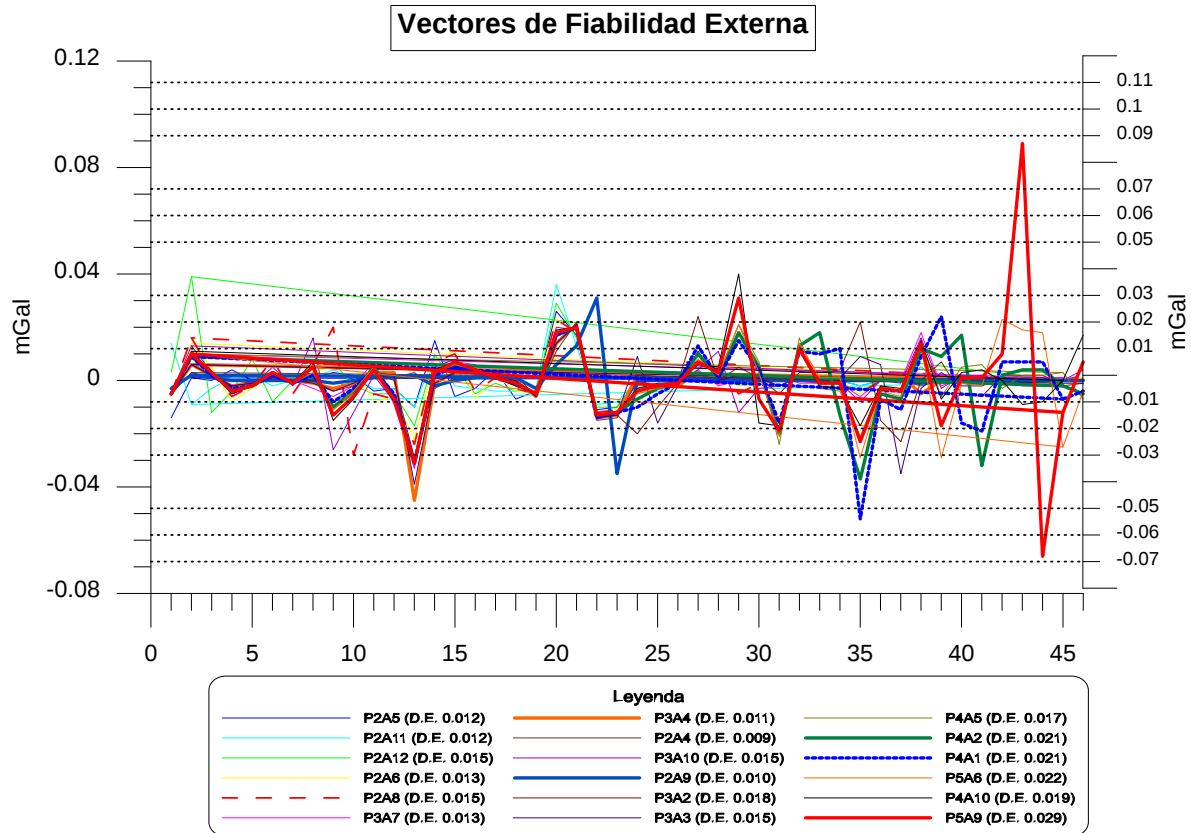


Figura 4-25. Vectores de fiabilidad externa, obtenidos a partir de cada uno de los observables ajustados en el modelo matemático de la red gravimétrica 2016.

De esta, se deduce que los errores graves presentes en los observables impactan a los vértices P4A1, P5A6, P4A10 y P5A9. La magnitud de los vectores de fiabilidad externa de los observables 23, 31, 39, 40 y 42 se encuentra por encima de la desviación estándar (D. E.) de los valores ajustados de dichos vértices.

De esta se deduce que los errores graves presentes en los observables del vértice P5A9 influyen en los observables 43 y 44. También, el ajuste de los vértices P3A4, P2A9, P4A2 y P4A1 impactan de 0.03 mGal de desviación estándar (D. E.).

4.1.5. Mediciones en Red GPS.

4.1.6. Campaña GPS de Noviembre 2014.

La adquisición de datos se realizó en 11 bancos durante 5 días del 16 al 20 de noviembre de 2014 por personal del CICESE, IIUABC y UAS coordinada por el Mtro. Juan Manuel Espinosa. (Tabla 4-9 y figura 4-26).

Tabla 4-9. Bancos y fechas de observaciones GPS campaña 2014.

Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado
16-nov	P2A12	18-nov	P2A3	19-nov	P3A4
	P2A6		P2A5		P3A5
17-nov	P2A10		P2A9	20-nov	P3A10
	P2A11				P3A7

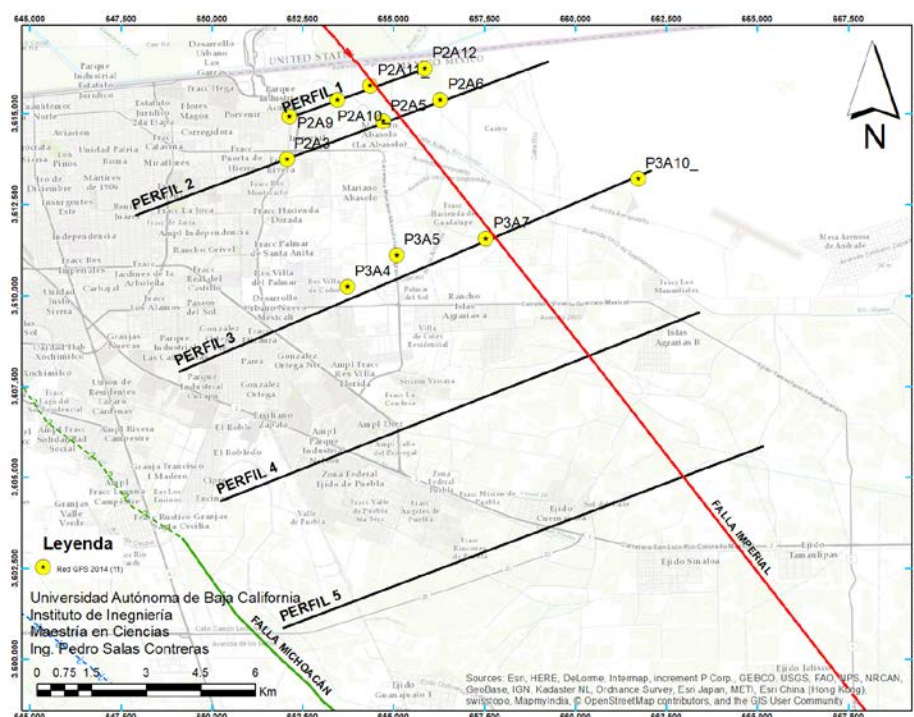


Figura 4-26. Localización de puntos de observación GPS en noviembre 2014.

4.1.6.1. Resultados de Ajuste TBC.

Como se mencionó en el subcapítulo 3.4, los resultados son obtenidos del post- proceso de las estaciones GPS que es la edición, cálculo y ajuste de las observaciones.

Para ejemplificar este proceso se presenta el informe de la hoja del proceso del día 18 de noviembre, en el que se midieron los bancos P2A9 y P2A5. Como parte del proceso se incluye la

estación P500 con coordenadas fijas (Tabla 3-2) y su respectivo ajuste se muestra en figura 4-27 y el resumen en tabla 4-10.

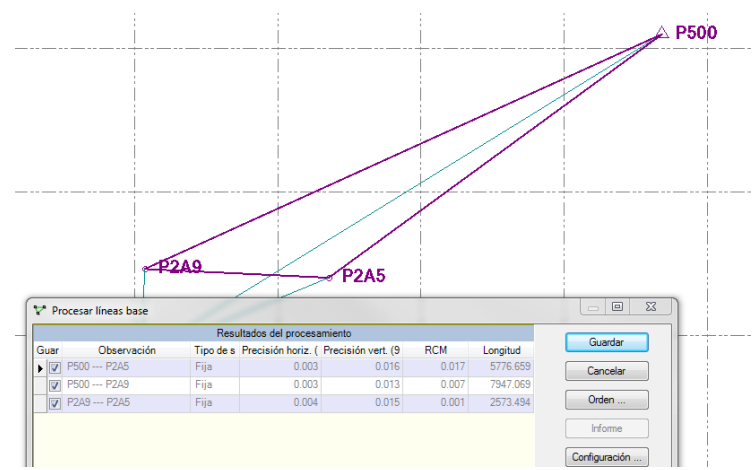


Figura 4-27. Subproceso de cálculo de líneas base del día 18 de noviembre de 2014.

Tabla 4-10. Tabla resumen del cálculo de líneas base para el día 18 de noviembre de 2014. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.

Observación	De	A	Tipo de Solución	Prec. H. (m)	Prec. V. (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Aci. Geod.	Dist. Elip (m)	Δ Altura (m)
P2A9 - P2A5	P2A9	P2A5	Fija	0.004	0.015	2283.090	-1179.868	-135.197	93°35'17"	2573.502	0.763
P500 - P2A5	P500	P2A5	Fija	0.003	0.018	-5035.319	393.713	-2803.630	234°48'15"	5776.677	-2.031
P500 - P2A9	P500	P2A9	Fija	0.004	0.017	-7318.426	1573.564	-2668.419	246°31'05"	7947.096	-2.767

Es posible que existen errores atípicos y para determinarlos se utiliza el cierre de ciclo, en donde básicamente se analiza la cantidad de errores en un conjunto de observaciones que se encuentran en la red (subcapítulo 3.4.1). Si existiera algún vector defectuoso es importante regresar al análisis del previo al cálculo de líneas base y verificar la calidad del mismo, aunque también se puede inhabilitar dicho vector y verificar nuevamente el cierre de ciclo de la red.

En el caso de los vectores calculados en esta campaña no hubo vectores defectuosos y el cierre de ciclo utilizado no mostro inconsistencias o errores en las coordenadas de cada banco medido. El último paso es el ajuste de red de los vectores que pasaron las anteriores pruebas de calidad y el informe obtenido del proceso de 18 de noviembre es exitoso después de 2 iteraciones y con una confiabilidad de 95 % y se acepta la hipótesis nula (Tabla 4-11).

Tabla 4-11. Estadísticas del ajuste de 18 de nov de 2014.

Número de iteraciones para un ajuste exitoso:	2
Factor de referencia de red:	1.00
Prueba Chi- Cuadrado (95%):	Pasado
Nivel de confianza de la precisión:	95%
Grados de libertad:	3

Estadísticas de vectores con post-procesamiento	
Factor de referencia:	1.00
Número de redundancias:	3.00
Escalar a priori:	2.15

En el mismo reporte se incluyen las coordenadas de cuadrícula ajustadas (en metros) y coordenadas geodésicas ajustadas (Tabla 4-12 y 4-13). Para los propósitos del trabajo de estimar los vectores de desplazamiento horizontal y vertical se utilizarán los valores de cuadrícula ajustadas (Tabla 3-15).

Tabla 4-12. Coordenadas de cuadrícula ajustadas para el 18 de noviembre de los bancos P2A5 y P2A9.

ID de punto	Este (m)	Error (m)	Norte (m)	Error (m)
P2A5	654711.160	0.004	3614798.794	0.005
P2A9	652140.820	0.004	3614920.559	0.005

Tabla 4-13. Coordenadas geodésicas ajustadas para el 18 de noviembre de los bancos P2A5 y P2A9.

ID de punto	Latitud	Longitud	Altura (m)	Error (m)
P2A5	N32°39'36.03422"	O115°21'00.86039"	-21.800	0.030
P2A9	N32°39'41.27307"	O115°22'39.42621"	-22.555	0.029

Los resultados finales de la campaña 2014, siguiendo los procesos de calidad anteriormente explicados muestra además de las desviaciones estándar (errores) las elipses de error de cada punto ajustado (Tabla 4-14 y Figura 4-28, respectivamente).

Tabla 4-14. Coordenadas finales para las observaciones de GPS, noviembre de 2014.

Id De Punto	Este (m)	Error (m)	Norte (m)	Error (m)	Altura Elipsoidal (m)	Error (m)	Semieje Mayor (m)	Semieje Menor (m)
P2A9	652140.820	0.004	3614920.56	0.005	-22.555	0.029	0.006	0.005
P2A10	653450.313	0.002	3615387.78	0.002	-23.312	0.009	0.002	0.002

P2A11	654355.743	0.002	3615779.93	0.002	-23.183	0.009	0.002	0.002
P2A12	655861.935	0.002	3616246.05	0.002	-22.508	0.008	0.003	0.002
P2A5	654711.160	0.004	3614798.79	0.005	-21.8	0.030	0.006	0.006
P2A6	656288.410	0.002	3615381.35	0.002	-22.402	0.01	0.002	0.002
P3A4	653732.847	0.003	3610234.89	0.003	-22.959	0.014	0.004	0.003
P3A5	655082.401	0.003	3611098.68	0.003	-23.64	0.014	0.004	0.003
P3A7	657541.232	0.001	3611570.05	0.001	-20.98	0.009	0.002	0.002
P3A10	661727.652	0.001	3613212.22	0.002	-13.387	0.009	0.002	0.002

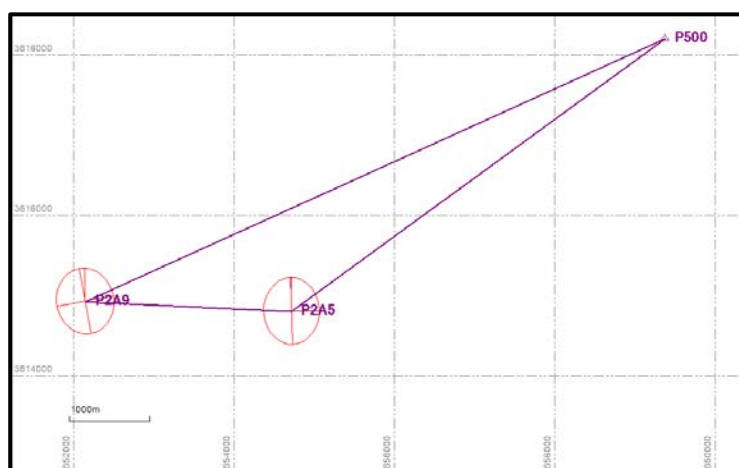


Figura 4-28. Ajuste exitoso de bancos P2A9 y P2A5 con elipses de error.

4.1.7. Campaña GPS 2015.

La campaña 2015 se inició por personal de la UABC, CICESE y UAS con estaciones medidas desde el 23 de noviembre y hasta el 12 de diciembre, se observaron un total de 22 estaciones con equipos *Trimble*, *Leica*, *Geomax* y *Topcon*. En particular esta campaña de GPS se trabajó simultáneamente con las mediciones de gravimetría. Los puntos medidos por día se muestran en la tabla 4-15 y figura 4-29.

Tabla 4-15. Bancos y fechas de observaciones GPS de 2015.

Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado
23-nov	P2A1	02-dic	P3A2	11-dic	P4A10
	P2A2		P3A3		P4A5
30-nov	P2A8		P3A4		P5A6
	P3A10		P3A7		P5A9
01-dic	P2A10	06-dic	P2A11	12-dic	P4A1
	P2A5		P2A12		P4A2
	P2A9		P3A8		
	P2A4				
	P3A5				

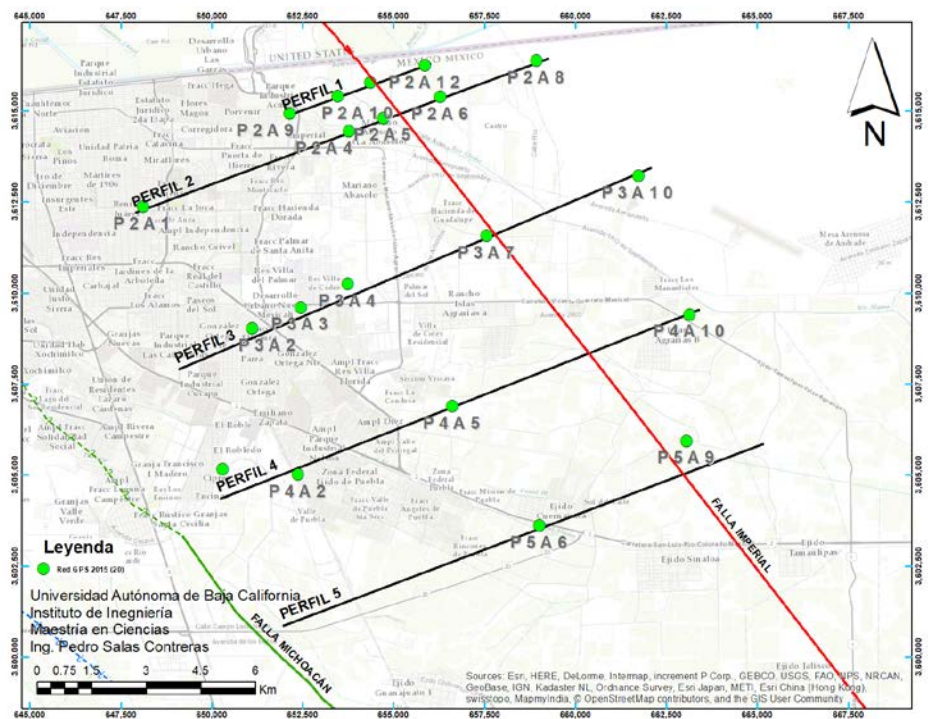


Figura 4-29. Localización de puntos de observación GPS de la campaña 2015.

4.1.7.1. Resultados de Ajuste TBC.

Para ejemplificar el procesado de la campaña de 2015 se seleccionó el proceso del 01 de diciembre de 2015 en el que se calculan y ajustan los bancos P2A10, P2A4, P2A5, P2A9 y P3A5 a partir del punto base P500 e incluyendo en el proceso las efemérides precisas. El ajuste de líneas base consistió en 15 observaciones o segmentos calculados que previamente fueron limpiadas las sesiones satelitales de cada segmento. El mayor error medio cuadrático se observó entre bancos P2A5 y P2A9 el cual después de aplicar la herramienta de ciclo de cierre existía un error, razón

por la cual se inhabilito y se realizó nuevamente el cálculo de líneas base sin el segmento defectuoso (Figura 4-30 y tabla 4-16).

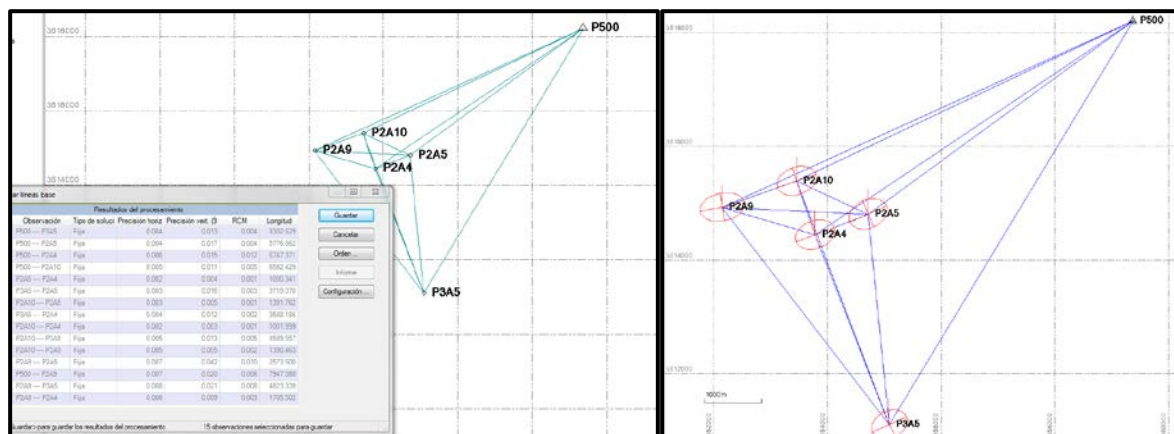


Figura 4-30. Cálculo de líneas base (izquierda) y ajuste de red con elipses de error (derecha) del día 01 de diciembre de 2015.

Tabla 4-16. Resultados del cálculo de líneas base del día 01 de diciembre de 2015. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (m)	Prec. V. (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Aci. geod.	Dist. elip (m)	Δ Altura (m)
P2A9 - P2A4	P2A9	P2A4	Fija	0.006	0.009	1355.278	-943.946	-425.355	107°13'11"	1705.508	-0.662
P2A9 - P2A5	P2A9	P2A5	Fija	0.007	0.042	2283.208	-1179.63	-135.363	93°35'17"	2573.508	0.770
P3A5 - P2A5	P3A5	P2A5	Fija	0.003	0.016	571.556	1939.213	3121.579	355°09'44"	3719.082	1.770
P2A5 - P2A4	P2A5	P2A4	Fija	0.002	0.004	-927.928	235.672	-289.985	249°54'39"	1000.344	-1.416
P3A5 - P2A4	P3A5	P2A4	Fija	0.003	0.012	-356.374	2174.895	2831.591	339°33'33"	3588.198	0.346
P2A9 - P3A5	P2A9	P3A5	Fija	0.008	0.021	1711.650	-3118.83	-3256.95	143°17'27"	4823.356	-1.013
P500 - P2A9	P500	P2A9	Fija	0.007	0.020	-7318.42	1573.606	-2668.43	246°31'05"	7947.106	-2.777
P2A10 - P3A5	P2A10	P3A5	Fija	0.005	0.013	418.408	-2773.14	-3632.99	160°02'59"	4589.573	-0.255
P2A10 - P2A9	P2A10	P2A9	Fija	0.005	0.005	-1293.24	345.679	-376.040	251°14'56"	1390.468	0.769
P500 - P2A5	P500	P2A5	Fija	0.004	0.017	-5035.20	393.983	-2803.80	234°48'15"	5776.680	-2.024
P2A10 - P2A5	P2A10	P2A5	Fija	0.003	0.005	989.962	-833.92	-511.416	115°55'12"	1391.766	1.508
P500 - P2A4	P500	P2A4	Fija	0.006	0.015	-5963.14	629.654	-3093.78	237°01'21"	6747.393	-3.430
P500 - P3A5	P500	P3A5	Fija	0.004	0.013	-5606.76	-1545.24	-5925.37	212°04'21"	8302.657	-3.776
P500 - P2A10	P500	P2A10	Fija	0.005	0.011	-6025.17	1227.907	-2292.38	245°30'35"	6562.451	-3.527
P2A10 - P2A4	P2A10	P2A4	Fija	0.002	0.003	62.031	-598.261	-801.397	161°50'18"	1002.002	0.102

Finalmente, los vectores calculados son sometidos al ajuste de red para obtener las coordenadas finales de los bancos que intervienen en el post-proceso. Las estadísticas del ajuste indican que el proceso paso la prueba Chi- Cuadrado con un nivel confianza del 95% con 30 grados de libertad y se acepta la hipótesis nula (Tabla 4-17).

Tabla 4-17. Estadísticos del ajuste de la red del día 01 de diciembre de 2015.

Número de iteraciones para un ajuste exitoso:	2	Estadísticas de vectores con post-procesamiento	
Factor de referencia de red:	1.00		
Prueba de Chi-Cuadrado (95%):	Pasado		
Nivel de confianza de la precisión:	95%		
Grados de libertad:	30		
		Factor de referencia:	1.00
		Número de redundancias:	30.00
		Escalar a priori:	1.70

Las coordenadas finales del día 01 de diciembre son (Tabla 4-18 y 4-19):

Tabla 4-18. Coordenadas de cuadrícula ajustadas y error respectivo del día 01 de diciembre de 2015.

ID de punto	Este (m)	Error (m)	Norte (m)	Error (m)
P2A10	653450.304	0.004	3615387.78	0.004
P2A4	653777.217	0.003	3614440.685	0.002
P2A5	654711.148	0.003	3614798.806	0.002
P2A9	652140.811	0.004	3614920.568	0.003
P3A5	655082.397	0.003	3611098.689	0.003

Tabla 4-19. Coordenadas geodésicas ajustadas y altura elipsoidal de cada punto del día 01 de diciembre de 2015.

ID de punto	Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal (m)	Error (m)
P2A10	N32°39'55.78721"	O115°21'48.89727"	-23.083	0.019
P2A4	N32°39'24.87914"	W115°21'36.91272"	-23.207	0.011
P2A5	N32°39'36.03461"	W115°21'00.86086"	-21.798	0.012
P2A9	N32°39'41.27337"	W115°22'39.42656"	-22.542	0.013
P3A5	N32°37'35.73516"	W115°20'48.82470"	-23.558	0.014

De igual manera que la campaña de 2014, se presentan los resultados finales de los días procesados y que cumplen con la calidad requerida para el estudio (Tabla 4-20).

Tabla 4-20. Coordenadas finales para las estaciones con observaciones GPS de 2015.

Id De Punto	Coord. Este (m)	Error (m)	Coord. Norte (m)	Error (m)	Altura Elipsoidal (m)	Error (m)	Semieje Mayor (m)	Semieje Menor (m)
P2A9	652140.811	0.004	3614920.57	0.003	-22.542	0.013	0.005	0.003
P2A10	653450.304	0.004	3615387.78	0.004	-23.083	0.0019	0.006	0.003
P2A11	654355.737	0.002	3615779.93	0.002	-23.167	0.011	0.003	0.002
P2A4	653777.217	0.003	3614440.69	0.002	-23.207	0.011	0.004	0.003
P2A5	654711.148	0.003	3614798.81	0.002	-21.798	0.012	0.004	0.003
P2A6	656288.401	0.001	3615381.36	0.001	-22.394	0.003	0.001	0.001
P2A8	658931.665	0.00	3616380.72	0.001	-18.155	0.001	0.001	0.001
P3A2	651105.699	0.004	3609021.11	0.004	-26.075	0.016	0.005	0.004
P3A3	652423.523	0.004	3609636.21	0.005	-25.317	0.022	0.006	0.005
P3A4	653732.843	0.002	3610234.9	0.002	-22.923	0.009	0.003	0.002
P3A5	655082.397	0.003	3611098.69	0.003	-23.558	0.014	0.004	0.003
P3A7	657541.229	0.002	3611570.05	0.002	-20.991	0.009	0.003	0.002
P3A10	661727.656	0.003	3613212.21	0.003	-13.38	0.016	0.002	0.001
P4A1	650286.469	0.003	3605146.75	0.003	-27.89	0.014	0.004	0.003
P4A2	652325.103	0.003	3605040.9	0.003	-25.93	0.016	0.004	0.004
P4A5	656652.837	0.002	3606863.78	0.003	-24.135	0.014	0.003	0.003
P4A10	663142.997	0.002	3609398.18	0.002	-18.903	0.013	0.003	0.002
P5A6	659014.868	0.003	3603594.38	0.003	-21.586	0.018	0.004	0.003
P5A9	663059.827	0.002	3605917.61	0.003	-20.669	0.016	0.003	0.003

4.1.8. Campaña GPS de 2016.

Esta campaña fue realizada por personal del IIUABC y se realizaron observaciones GPS en 19 bancos (figura 4-31), con tiempos de observación de al menos 4 horas.

Tabla 4-21. Bancos y fechas de observaciones GPS de junio-julio de 2016

Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado	Fecha de Observación	Banco Observado
25-jun	P4A2	27-jun	P2A11	30-jun	P2A6
	P4A5		P2A5		P2A8
	P5A6	28-jun	P2A10		P3A10
26-jun	P3A2		P2A4		P3A7
	P3A3	29-jun	P4A1	01-jul	P2A12
	P3A4		P4A2		P2A9
					P4A10
					P5A9

Para ejemplificar el procesado de la información de la campaña 2016 se eligió el último día de trabajo (01 de julio de 2016- Tabla 4-21) que involucra los bancos P2A12, P2A9, P4A10 y P5A9, la elección de los días fue motivada para mostrar el proceso en bancos coincidentes, en las primeras dos campañas los bancos que se repiten es el P2A5 y P2A9 en esta campaña solo coincide P2A9.

Para el cálculo de líneas base se utilizaron 12 segmentos que entre lazan los bancos con el punto P500, al igual que las anteriores campañas se incluyen efemérides precisas para el post-proceso. Además, para apoyar la estadística en estos datos se incluyó la estación MEXI de la red geodésica de INEGI como se muestra en la figura 4-31.

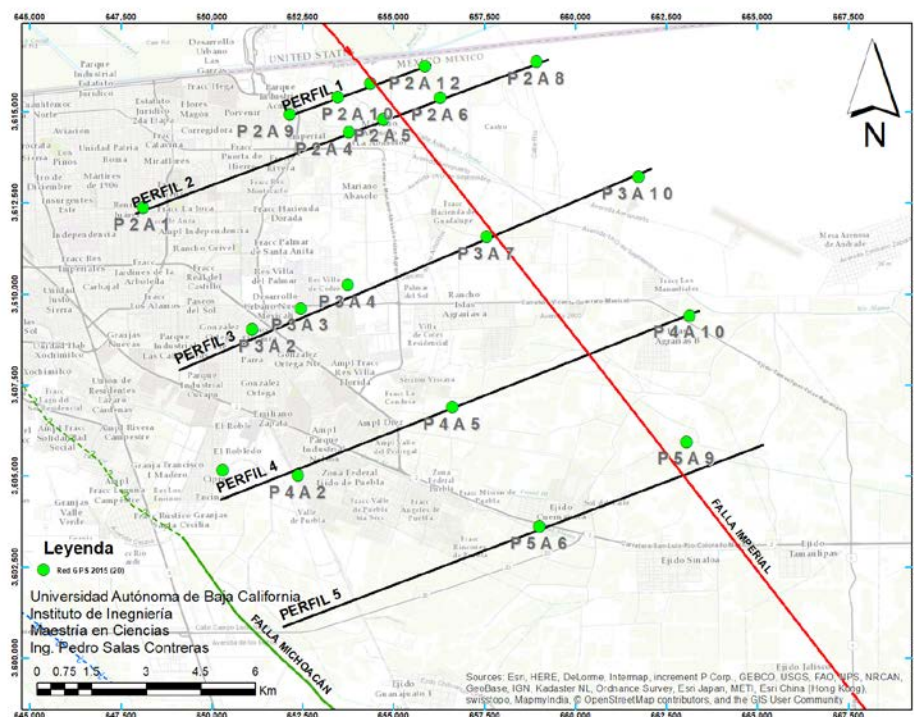


Figura 4-31. Plano de localización de puntos de observación GPS de la campaña 2016.

4.1.8.1. Resultados del ajuste TBC.

El resultado del cálculo de los vectores (figura 4-23) se muestra en la tabla (Tabla4-22):

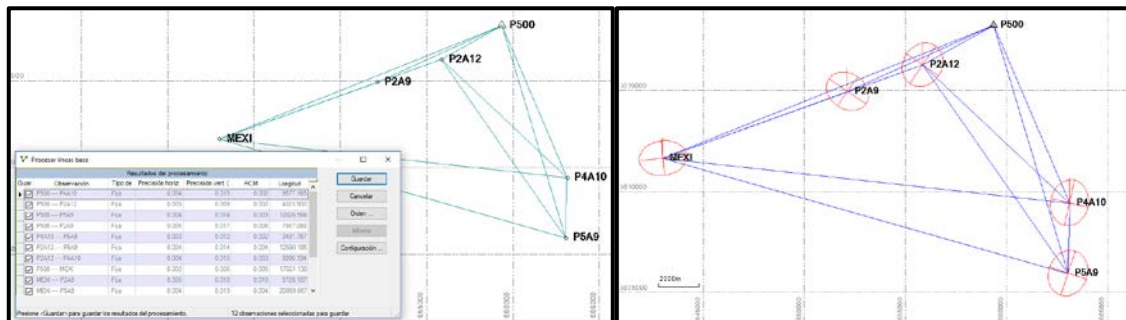


Figura 4-32. Cálculo de líneas base (izquierda) y ajuste de red con elipses de error (derecha) del día 01 de julio de 2016.

Tabla 4-22. Resultados del cálculo de líneas base del 01 de julio de 2016. Prec. H. es precisión horizontal; Prec. V. es precisión vertical; Δ es incremento en la respectiva componente.

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (m)	Prec. V. (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Acimut Geodésico	Distancia elipsoidal (m)	Δ Altura (m)
MEXI - P2A9	MEXI	P2A9	Fija	0.005	0.018	9041.388	-2412.248	2659.319	71°01'49"	9728.220	-0.977
MEXI - P5A9	MEXI	P5A9	Fija	0.004	0.013	16666.461	-11493.491	-5067.550	106°42'00"	20869.942	0.923
P2A12 - P4A10	P2A12	P4A10	Fija	0.004	0.015	4876.854	-6463.092	-5862.477	134°08'26"	9996.225	3.385
P4A10 - P5A9	P4A10	P5A9	Fija	0.003	0.012	-925.840	-1633.875	-2931.913	182°18'19"	3481.797	-1.549
P2A12 - P5A9	P2A12	P5A9	Fija	0.004	0.014	3951.016	-8096.968	-8794.393	146°01'25"	12590.226	1.835
P500 - P5A9	P500	P5A9	Fija	0.004	0.014	306.625	-7507.635	-10395.296	164°13'53"	12826.607	-0.888
P500 - P2A9	P500	P2A9	Fija	0.005	0.017	-7318.433	1573.605	-2668.429	246°31'06"	7947.114	-2.792
MEXI - P4A10	MEXI	P4A10	Fija	0.004	0.014	17592.299	-9859.616	-2135.637	97°07'56"	20279.664	2.473
MEXI - P2A12	MEXI	P2A12	Fija	0.003	0.012	12715.444	-3396.519	3726.839	71°05'03"	13678.798	-0.916
P500 - P4A10	P500	P4A10	Fija	0.004	0.015	1232.462	-5873.763	-7463.380	157°45'45"	9577.194	0.666
P500 - P2A12	P500	P2A12	Fija	0.003	0.009	-3644.387	589.333	-1600.906	241°48'44"	4023.913	-2.725
P500 - MEXI	P500	MEXI	Fija	0.002	0.005	-16359.827	3985.852	-5327.745	249°03'14"	17661.201	-1.810

En este proceso no se encontraron segmentos defectuosos o con errores y se continúa con el ajuste de la red, teniendo en cuenta 21 grados de libertad se aplica el estadístico Chi- Cuadrado con un nivel de confianza de 95% como se muestra en la tabla 4-23.

Tabla 4-23. Estadísticos del ajuste de red del 01 de julio 2016.

Número de iteraciones para un ajuste exitoso:	2
Factor de referencia de red:	1.00
Prueba de Chi al cuadrado (95%):	Pasado
Nivel de confianza de la precisión:	95%
Grados de libertad:	21

Estadísticas de vectores con post-procesamiento	
Factor de referencia:	1.00
Número de redundancias:	21.00
Escalar a priori:	1.55

De la misma manera que en los estadísticos de gravimetría se acepta la hipótesis nula a nivel de confianza de 95%, determinando así que la varianza *a priori* es igual a la varianza *a posteriori*.

Las coordenadas finales ajustadas de cuadrícula (tabla 4-24) y geodésicas (Tabla 4-25), son:

Tabla 4-24. Coordenadas de cuadrícula ajustadas del 01 de julio de 2016.

ID de Punto	Este (m)	Error (m)	Norte (m)	Error (m)
P2A12	655861.930	0.002	3616246.053	0.002
P2A9	652140.790	0.004	3614920.569	0.004
P4A10	663143.009	0.002	3609398.193	0.003
P5A9	663059.864	0.002	3605917.639	0.003

Tabla 4-25. Coordenadas geodésicas ajustadas del 01 de julio de 2016.

ID de Punto	Latitud	Longitud	Altura (m)	Altura Error (m)
P2A12	N32°40'22.43146"	O115°20'15.83005"	-22.503	0.010
P2A9	N32°39'41.27340"	O115°22'39.42736"	-22.568	0.020
P4A10	N32°36'36.35927"	O115°15'40.69169"	-19.116	0.012
P5A9	N32°34'43.42295"	O115°15'46.06134"	-20.665	0.012

Este proceso es repetido con los mismos estándares de calidad para el cálculo de líneas base y ajuste mostrando que en cada uno de los días procesados el estadístico Chi- Cuadrado cumple con la hipótesis nula a un nivel de confianza de 95%. Las coordenadas finales de la campaña se muestran en la tabla 4-26.

Tabla 4-26. Coordenadas finales para las estaciones GPS de junio- julio 2016

Id De Punto	Coord. Este (m)	Error (m)	Coord. Norte (m)	Error (m)	Altura Elipsoidal (m)	Error (m)	Semieje Mayor (m)	Semieje Menor (m)
P2A9	652140.790	0.004	3614920.57	0.004	-22.568	0.020	0.006	0.004
P2A10	653450.303	0.001	3615387.79	0.001	-23.311	0.006	0.002	0.001
P2A11	654355.718	0.004	3615779.93	0.006	-23.154	0.028	0.007	0.005
P2A12	655861.930	0.002	3616246.05	0.002	-22.503	0.01	0.003	0.002
P2A4	653777.220	0.001	3614440.68	0.001	-23.256	0.006	0.002	0.001
P2A5	654711.144	0.005	3614798.8	0.006	-21.77	0.029	0.007	0.006
P2A6	656288.395	0.001	3615381.35	0.001	-22.183	0.006	0.002	0.001
P2A8	658931.659	0.001	3616380.72	0.001	-17.938	0.002	0.001	0.001
P3A2	651105.693	0.003	3609021.12	0.004	-26.534	0.021	0.005	0.004
P3A3	652423.511	0.002	3609636.21	0.003	-25.076	0.012	0.003	0.003
P3A7	657541.227	0.002	3611570.05	0.002	-20.766	0.008	0.003	0.002
P4A1	650286.460	0.002	3605146.76	0.002	-27.899	0.011	0.003	0.003
P4A2	652325.112	0.002	3605040.89	0.03	-25.931	0.012	0.003	0.003
P4A5	656652.768	0.001	3606863.82	0.002	-24.116	0.01	0.002	0.002
P4A10	663143.009	0.003	3609398.19	0.003	-19.116	0.012	0.003	0.003
P5A6	659014.873	0.002	3603594.38	0.002	-22.636	0.01	0.002	0.002
P5A9	663059.864	0.002	3605917.64	0.003	-20.665	0.012	0.003	0.003

4.2. Estimación de la Deformación Vertical y Horizontal del Terreno.

Para estimar la deformación vertical en el área de la RGFI, se elaboraron perfiles perpendiculares al trazo superficial de la falla Imperial de diferencias de gravedad, convertidas a metros y de alturas elipsoidales en el periodo 2015- 2016. Para la deformación horizontal, se realizaron mapas y perfiles de resultados horizontales a partir de las observaciones GPS del periodo 2014- 2016. Procedimientos y resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.2.1. Estimación de Diferencias de Alturas.

Para la estimación de la deformación en la vertical se estableció como punto de partida el banco P2A10, tanto para las mediciones gravimétricas como para las observaciones GPS. Pero como es conocido los valores de gravedad están en unidades de mGal y las coordenadas de los vértices, derivadas con observaciones GPS, en metros. Con fines comparativos habrá que convertir mili Gales a metros o metros a mili Gales, la primera opción resulta más práctica para dimensionar los desplazamientos encontrados. Para realizar esta conversión se recomienda tener valores directos de gradientes por medio de nivelación de precisión, pero aún no se conoce dicha información de referencia y por lo tanto se utilizará el factor de conversión de aire libre utilizado en el subcapítulo 3.1.2.2 de 0.3086 mGal/m para la respectiva conversión de valores (Tabla 4-27).

Así mismo, las diferencias de alturas elipsoidales, con respecto a la estación P2A10, de las campañas de observaciones GPS se muestran en la Tabla 4-28.

Tabla 4-27. Resultados de la conversión de diferencias de gravedad, con respecto a la estación P2A10, a diferencias de alturas de las campañas 2015 y 2016. DE corresponde a la desviación estándar

Estación	Campaña 2015				Campaña 2016			
	mGal	DE(±) (mgal)	m	DE(±) (m)	mGal	DE(±) (mgal)	m	DE(±) (m)
P2A9	-1.874	0.008	0.578	-0.003	-1.869	0.010	0.577	-0.003
P2A10	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
P2A11	1.790	0.014	-0.552	-0.004	1.772	0.012	-0.547	-0.004
P2A12	2.268	0.014	-0.700	-0.004	2.257	0.015	-0.697	-0.005
P2A4	-1.228	0.008	0.379	-0.003	-1.215	0.009	0.375	-0.003
P2A5	0.145	0.013	-0.045	-0.004	0.168	0.012	-0.052	-0.004
P2A6	2.045	0.013	-0.631	-0.004	2.042	0.013	-0.630	-0.004
P2A8	-0.462	0.014	0.143	-0.004	-0.442	0.015	0.136	-0.005
P3A2	-6.021	0.014	1.858	-0.004	-6.022	0.018	1.858	-0.005
P3A3	-4.864	0.014	1.501	-0.004	-4.840	0.015	1.494	-0.005
P3A4	-4.401	0.013	1.358	-0.004	-4.368	0.011	1.348	-0.003
P3A7	-2.077	0.013	0.641	-0.004	-2.090	0.013	0.645	-0.004
P3A10	-4.774	0.014	1.473	-0.004	-4.781	0.015	1.475	-0.005
P4A1	-5.909	0.015	1.824	-0.005	-5.909	0.021	1.824	-0.007
P4A2	-5.236	0.015	1.616	-0.005	-5.281	0.021	1.630	-0.007
P4A5	-6.757	0.015	2.085	-0.005	-6.812	0.017	2.102	-0.005
P4A10	-6.327	0.023	1.953	-0.007	-6.394	0.019	1.973	-0.006
P5A6	-12.039	0.017	3.715	-0.005	-12.061	0.022	3.722	-0.007
P5A9	-9.692	0.025	2.991	-0.008	-9.770	0.029	3.015	-0.009

Tabla 4-28. Diferencias de alturas elipsoidales, respecto a la estación P2A10 y entre campañas.

Estación	Campaña 2015		Campaña 2016		Diferencias 2015-2016	
	Altura (m)	Altura Error (m)	Altura (m)	Altura Error (m)	Altura (m)	Altura Error (m)
P2A9	-0.541	0.013	-0.743	0.021	0.202	0.025
P2A10	0.000	0.003	0.000	0.008	0.000	0.009
P2A11	0.084	0.011	-0.157	0.029	0.241	0.031
P2A12			-0.808	0.012		
P2A4	0.124	0.011	-0.055	0.008	0.179	0.014
P2A5	-1.285	0.012	-1.541	0.030	0.256	0.032
P2A6	-0.689	0.004	-1.128	0.008	0.439	0.009
P2A8	-4.928	0.002	-5.373	0.006	0.445	0.006
P3A2	2.992	0.016	3.223	0.022	-0.231	0.027
P3A3	2.234	0.022	1.765	0.013	0.469	0.026
P3A4	-0.160	0.009				0.009
P3A5	0.475	0.014				0.014
P3A7	-2.092	0.009	-2.545	0.010	0.453	0.013
P3A10	-9.691	0.005				0.005
P4A1	4.807	0.014	4.588	0.013	0.219	0.019
P4A2	2.847	0.016	2.620	0.013	0.227	0.021
P4A5	1.052	0.014	0.805	0.012	0.247	0.018
P4A10	-4.180	0.013	-4.195	0.130	0.015	0.131
P5A6	-1.497	0.018	-0.675	0.012	-0.822	0.022
P5A9	-2.414	0.016	-2.646	0.013	0.232	0.021

Finalmente, con los datos obtenidos de las tablas 4-27 y 4-28 se estiman las diferencias de alturas de observaciones gravimétricas y GPS, entre las campañas 2015 y 2016. Los resultados se presentan en la tabla 4-29.

Tabla 4-29. Diferencias entre campañas de gravedad y GPS componente vertical en metros. Δ cambios de altura en centímetros respecto del banco P2A10; DE desviación estándar.

Estación	Gravedad		GPS	
	Diferencia 2015 - 2016		Diferencias 2015-2016	
	Δ (cm)	DE($\pm$) (cm)	Δ (cm)	Altura Error (cm)
P2A9	0.15	0.4	20.2	2.5
P2A10	0.00	0.0	0.0	0.9
P2A11	-0.56	0.6	24.1	3.1
P2A12	-0.34	0.6	0.0	0.0
P2A4	0.40	0.4	17.9	1.4
P2A5	0.71	0.5	25.6	3.2
P2A6	-0.09	0.6	43.9	0.9
P2A8	0.62	0.6	44.5	0.6
P3A2	-0.03	0.7	-23.1	2.7
P3A3	0.74	0.6	46.9	2.6
P3A4	1.02	0.5	0.0	0.9
P3A7	-0.40	0.6	45.3	1.3
P3A10	-0.22	0.6	0.0	0.0
P4A1	0.00	0.8	21.9	1.9
P4A2	-1.39	0.8	22.7	2.1
P4A5	-1.70	0.7	24.7	1.8
P4A10	-2.07	0.9	1.5	13.1
P5A6	-0.68	0.9	-82.2	2.2
P5A9	-2.41	1.2	23.2	2.1

4.2.2. Análisis de la Deformación Vertical.

Para el análisis de la deformación vertical del terreno en el período 2015- 2016 se elaboraron perfiles de variaciones de alturas, derivadas de gravimetría y GPS perpendiculares al inferido trazo superficial de la Imperial. Los perfiles originales (figura1-2) se modificaron sobre las estaciones con datos como se observa en la figura 4-33, esto permitirá ver tendencias y rangos de desplazamiento (deformación) a detalle teniendo como punto central la falla Imperial.

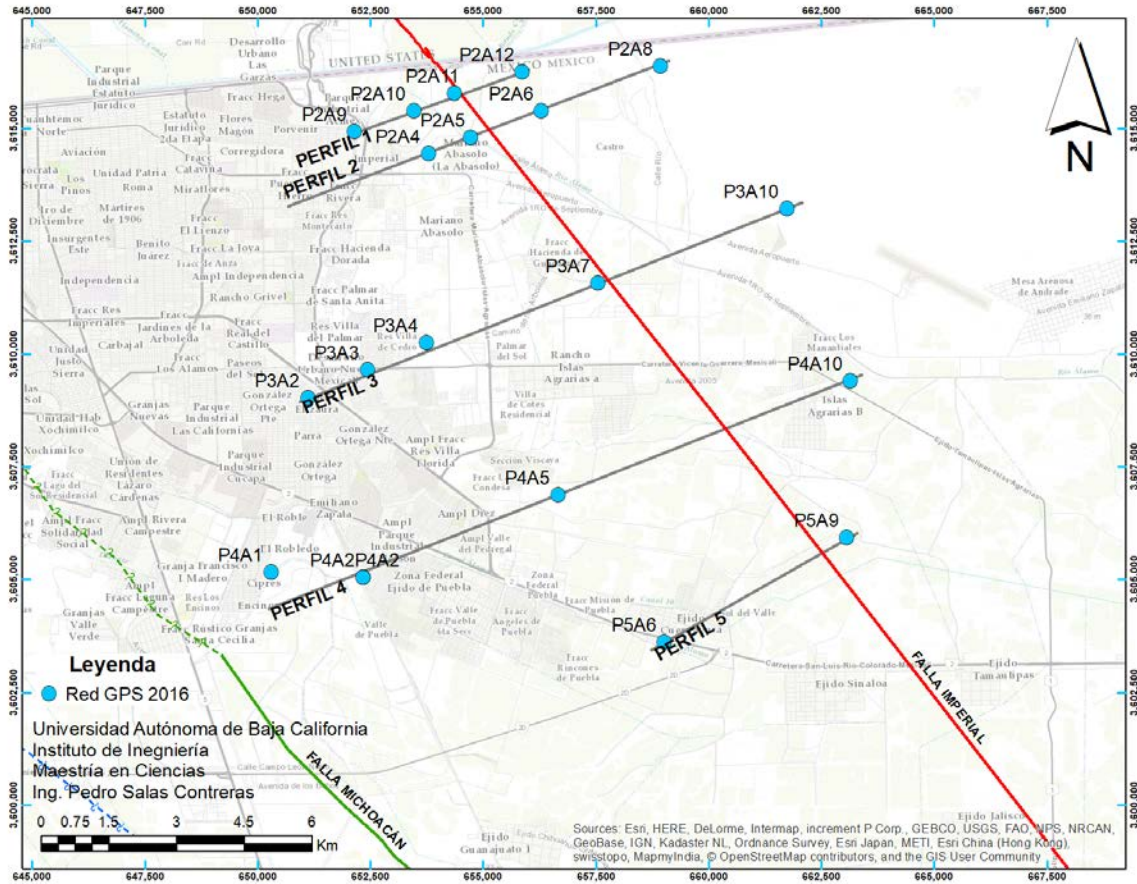


Figura 4-33. Localización de perfiles propuestos para el análisis de la deformación vertical. Línea punteada corresponde al trazo superficial de la falla Imperial.

4.2.2.1. Descripción de Perfiles

4.2.2.1.1. Perfil 1

El perfil 1 se localiza en el extremo norte de la zona de estudio, tiene una longitud aproximada de 4.2 km (figura 4-33) y está constituido por los vértices P2A9, P2A10, P2A11 y P2A12. Los valores obtenidos en la campaña de gravimetría (figura 4-34 A) y GPS (Figura 4-34 B) difieren de los rangos mostrados en metros de escala medidos, pudiendo ser resultado a que la componente vertical (z) de GPS aún tiene deficiencias en la precisión relacionadas a posibles errores en la medición de la altura de la antena.

Considerando como punto de referencia el banco P2A10 se observa que las tendencias en ambos perfiles indican un ligero levantamiento de P2A9. En tanto que los bancos P2A11 y P2A12 experimentan subsidencia al Este de la falla Imperial, siendo esta mayor en las cercanías de la falla (P2A11) y disminuyendo conforme se aleja de la misma (P2A12).

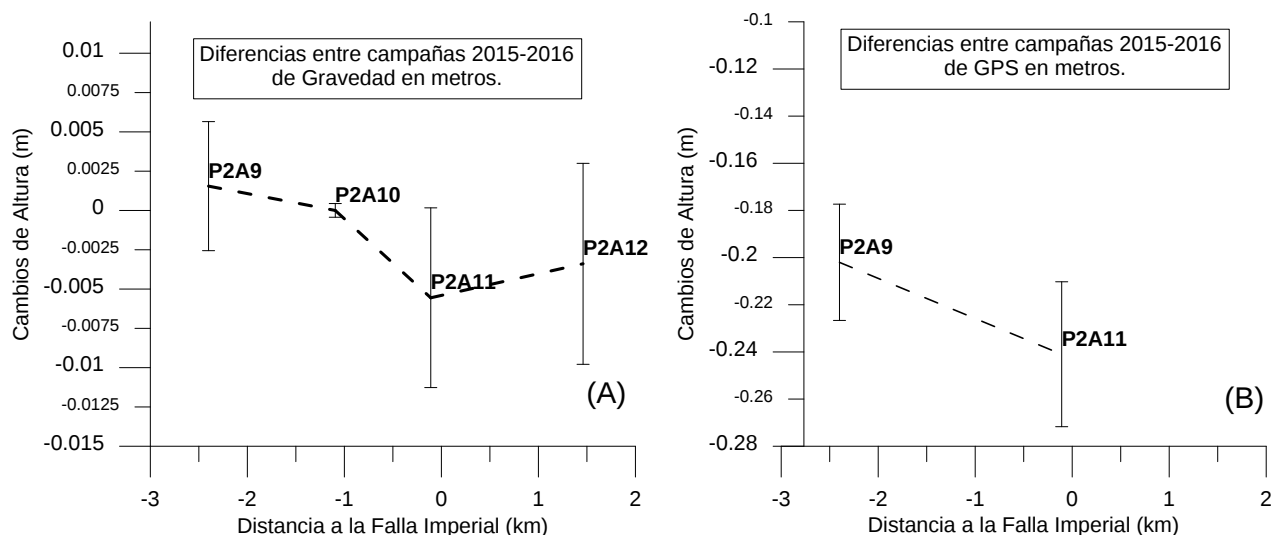


Figura 4-34. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (A) y altura elipsoidal (B) en vértices a lo largo del Perfil 1, relativos al vértice P2A10, período 2015 a 2016.

4.2.2.1.2. Perfil 2

El perfil 2, constituido por las estaciones P2A4, P2A5, P2A6 y P2A8, tiene una longitud de 5.5 km (Figura 4-33). Las tendencias observadas en el perfil 2 son relativamente diferentes entre lo estimado con gravimetría y GPS. En gravimetría (figura 4-35 A) existe un ligero levantamiento (0.004 a 0.007 m) hacia el oeste de la falla Imperial en los bancos P2A4 y P2A5, P2A6 se observa relativamente estable con un valor -0.001 m y aproximadamente a 4 km al este del trazo de la falla P2A8 con un levantamiento de al menos 0.006 m (figura 4-35).

En el perfil de GPS (figura 4-35, derecha) la tendencia es de subsidencia de oeste a este (P2A4 a P2A6), posterior entre P2A6 y P2A8 el desplazamiento se mantiene relativamente estable sin cambios (-0.211 a -0.217 m).

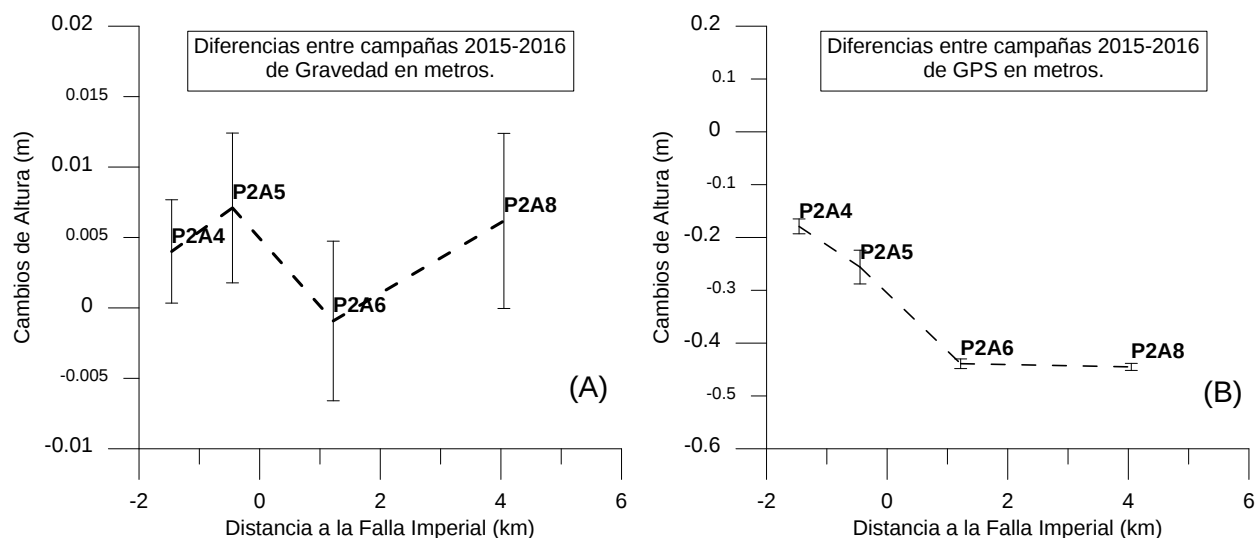


Figura 4-35. Cambios temporales de gravedad convertida a metros (A) y de altura elipsoidal (b) en vértices del Perfil 2, relativos al vértice P2A10, período 2015- 2016.

4.2.2.1.3. Perfil 3

El perfil 3, constituido por las estaciones P3A2, P3A3, P3A4, P3A7 y P3A10, tiene una longitud aproximada de 12 km, los bancos que conforman el perfil gravimétrico llevan una tendencia diferente que los anteriores en la zona oeste de la falla Imperial (figura 4-36 A). Entre los bancos P3A2 a P3A7 se observa un levantamiento siendo P3A4 la cima con una diferencia de hasta 10 mm respecto del banco P2A10, de P3A7 a P3A10 se estima una relativa subsidencia siendo menor en el banco (P3a10) más lejano de la falla.

Por otra parte, en el perfil de diferencias de alturas elipsoidales (figura 4-36 b) el banco P3A2 tiene un levantamiento que contrasta con el resultado de gravimetría en este mismo banco. En tanto, que los bancos P3A3 y P3A7 presentan una subsidencia de -0.241 a -0.225 respecto del banco P2A10.

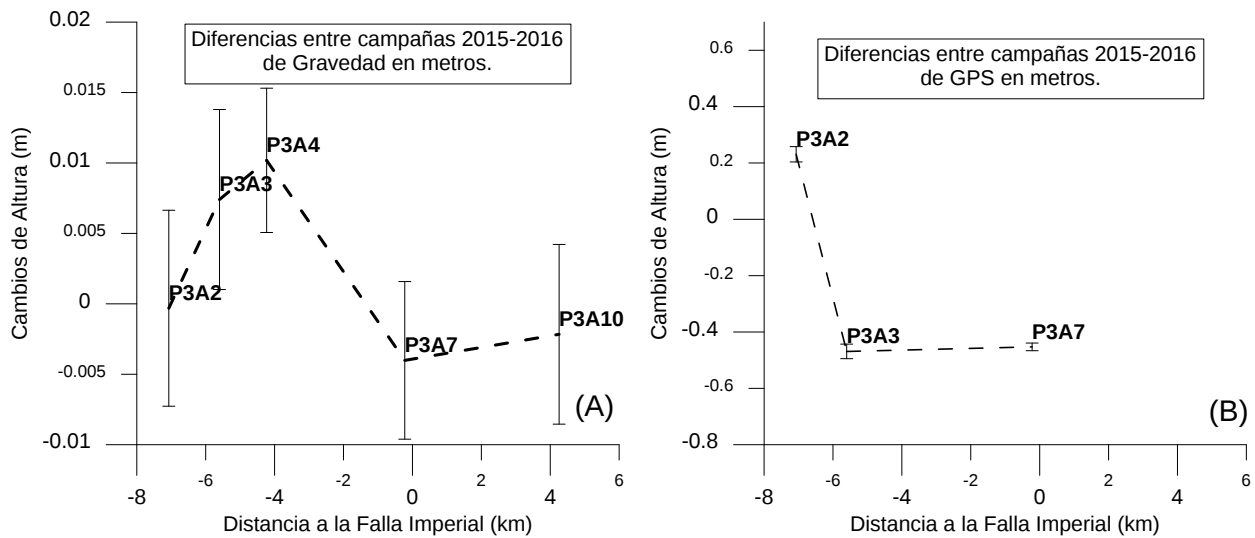


Figura 4-36. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (a) y altura elipsoidal (B) del Perfil 3, relativos al vértice P2A10, período de 2015- 2016.

4.2.2.1.4. Perfil 4

El perfil 4, constituido por los bancos P4A1, P4A2, P4A5 y P4A10, tiene una longitud de aproximadamente 13 km. El vértice P4A10 en el perfil de diferencias de altura elipsoidales (figura 4-37 B) presenta un levantamiento con respecto al vértice P4A5. Pero en el caso de los resultados obtenidos con microgravimetría (figura 4-37 A) la tendencia general del desplazamiento vertical de los vértices es hacia un hundimiento.

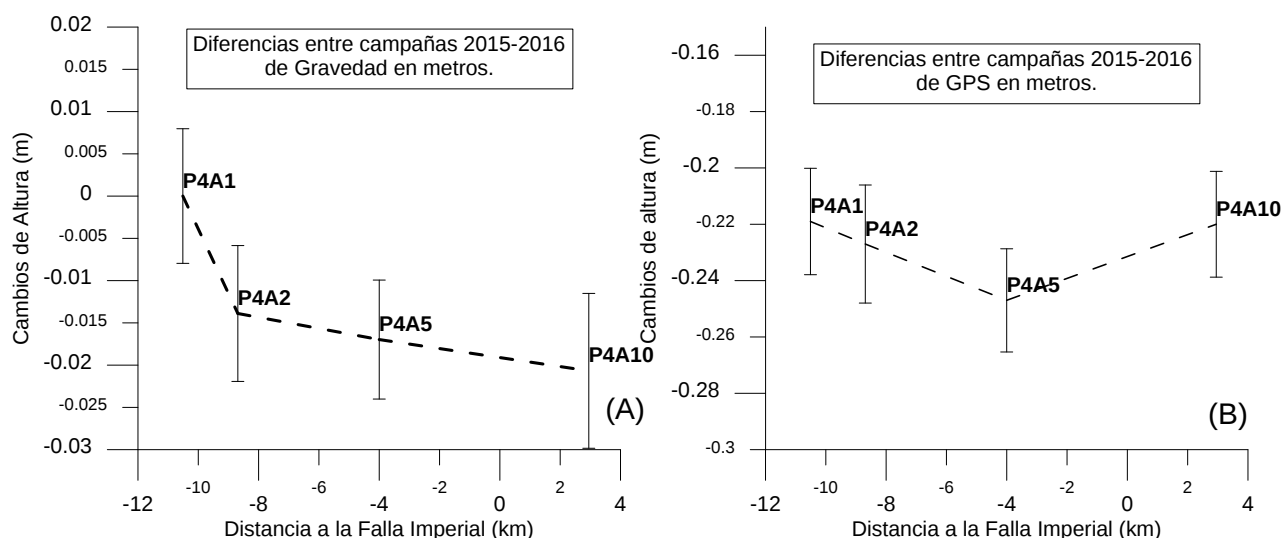


Figura 4-37. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (a) y altura elipsoidal (b) en vértices del **Perfil 4**, período 2015- 2016.

En general los resultados muestran la misma tendencia que se viene observando en perfiles anteriores con tendencias a la subsidencia hacia la falla imperial. El desplazamiento vertical en el perfil 4 es de al menos 0.02 m según los datos gravimétricos, en tanto que con las observaciones GPS se estima un cambio de elevación de 0.23 m.

4.2.2.1.5. Perfil 5

El perfil 5, con una longitud aproximada de 5 km se compone de dos estaciones (P5A6 y P5A9) que se encuentra al extremo sur del área de estudio (figura 4-33). Tanto el perfil de diferencias de alturas derivadas con gravimetría (figura 4-38 A) como el de diferencias de alturas elipsoidales (figura 4-38 B) indican un hundimiento al este de la falla Imperial (vértice P5A9). Con magnitudes de 0.024 m y 0.232 m, respectivamente.

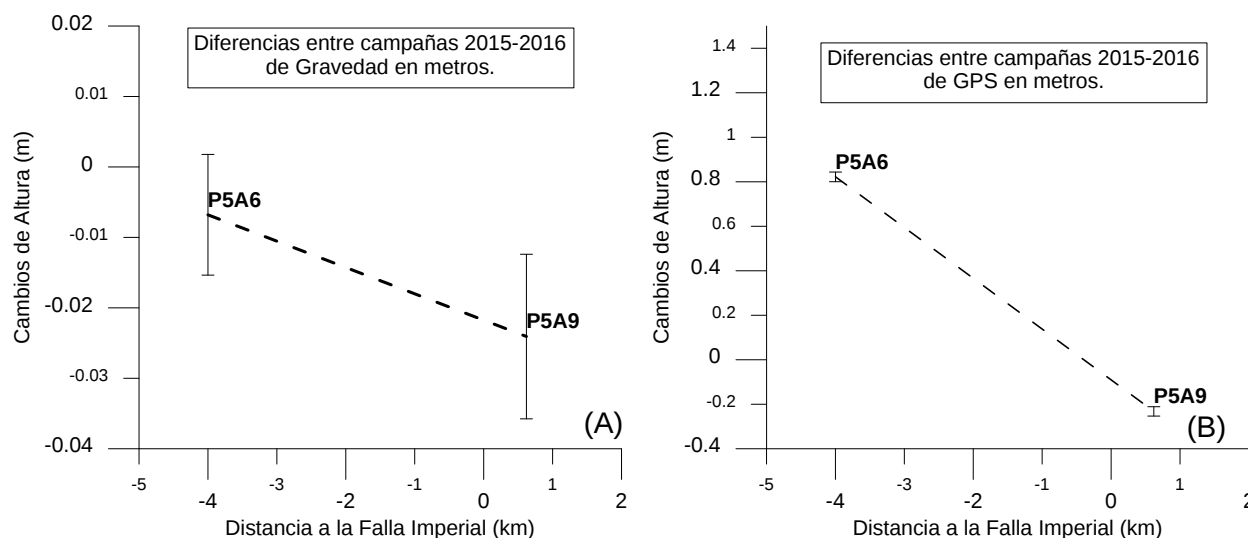


Figura 4-38. Cambios temporales de gravedad convertidos a metros (A) y altura elipsoidal (B) en vértices del **Perfil 5**, relativos al banco P2A10, período de 2015- 2016.

4.2.3. Análisis de Deformación Horizontal

El análisis de la información se realizó mediante el cálculo de los vectores de desplazamiento horizontal a partir de las diferencias de los resultados del ajuste de las coordenadas horizontales (X, Y) de los vértices de la RGFI, para los períodos 2014 a 2015, 2015 a 2016 y 2014 a 2016, tomando como referencia la estación GPS de monitoreo continuo P500 (subcapítulo 3.4.2). Los resultados se muestran en la Tabla 4-30 y en las figuras 4-39, 4-40 y 4-41, respectivamente.

Tabla 4-30. Cambios temporales de posición horizontales estimados en las campañas GPS. D es desplazamiento en cm.

Diferencias 2014 a 2015				Diferencias 2015 a 2016				Diferencias 2014 a 2016			
Estación	D (cm)	Error (cm)	Distancia falla (km)	Estación	D (cm)	Error (cm)	Distancia falla (km)	Estación	D (cm)	Error (cm)	Distancia falla (km)
P2A9	1.3	0.8	-4.36	P2A9	2.1	0.8	-4.36	P2A9	3.2	0.9	-4.36
P2A10	0.9	0.6	-2.97	P2A10	1.4	0.6	-2.97	P2A10	1.7	0.3	-2.97
P2A11	0.6	0.4	-2.03	P2A11	1.9	0.8	-2.03	P2A11	2.5	0.8	-2.03
P2A5	1.7	0.7	-2.28	P2A5	0.4	0.9	-2.28	P2A12	0.5	0.4	-0.43
P2A6	1.1	0.3	-0.62	P2A8	1.0	0.2	2.16	P2A5	1.9	1.0	-2.28
P3A5	1.2	0.6	-4.25	P3A2	1.3	0.8	-7.14	P2A6	1.5	0.3	-0.62
P3A7	0.4	0.3	-2.00	P3A3	1.2	0.7	-5.70	P3A4	0.8	0.5	-4.27
P3A10	0.6	0.5	4.26	P3A7	0.3	0.4	-2.00	P3A7	0.5	0.3	-2.00
				P4A1	1.3	0.6	-10.73				
				P4A5	0.7	0.4	4.08				
				P4A10	1.5	0.5	2.92				

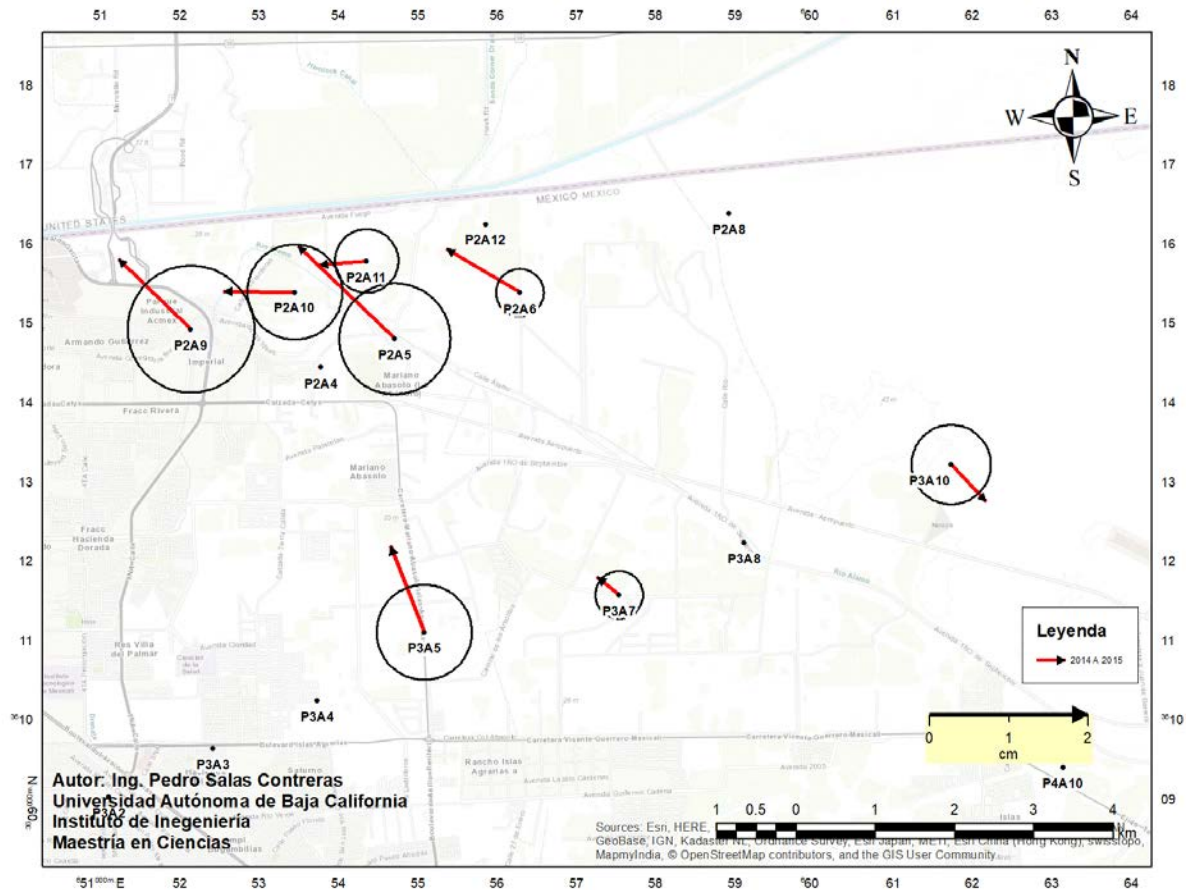


Figura 4-39. Vectores de desplazamiento para el período 2014- 2015, estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95%. Todas las mediciones son relativas al vértice P500.

Los vectores de desplazamiento correspondientes al período 2014- 2015 (figura 4-39), muestran en general una orientación hacia el noroeste- sureste, reflejando el patrón de deformación regional conocido. Siendo el vértice P2A5 el que presenta el máximo desplazamiento (1.7 ± 0.7 cm). Se observa que los vectores lejanos a la falla Imperial de margen izquierda que corresponden a P2A9, P3A5 tienen un desplazamiento de 1.3 ± 0.8 cm y 1.2 ± 0.6 cm, respectivamente. En tanto que el vector P3A10, en margen derecha respecto de la traza de la falla se obtuvo 0.6 ± 0.5 cm de deformación hacia el sureste. En cuanto a los vértices cercanos a la falla (<2.5 km) se observan magnitudes que varían entre 1.1 ± 0.6 cm (banco P2A6) a 0.6 ± 0.4 cm, esta última encontrada en el banco P2A11, ambos con movimientos hacia el noroeste.

Siguiendo con el análisis de la deformación horizontal se presenta el mapa de vectores obtenidos de la campaña 2015 a 2016.

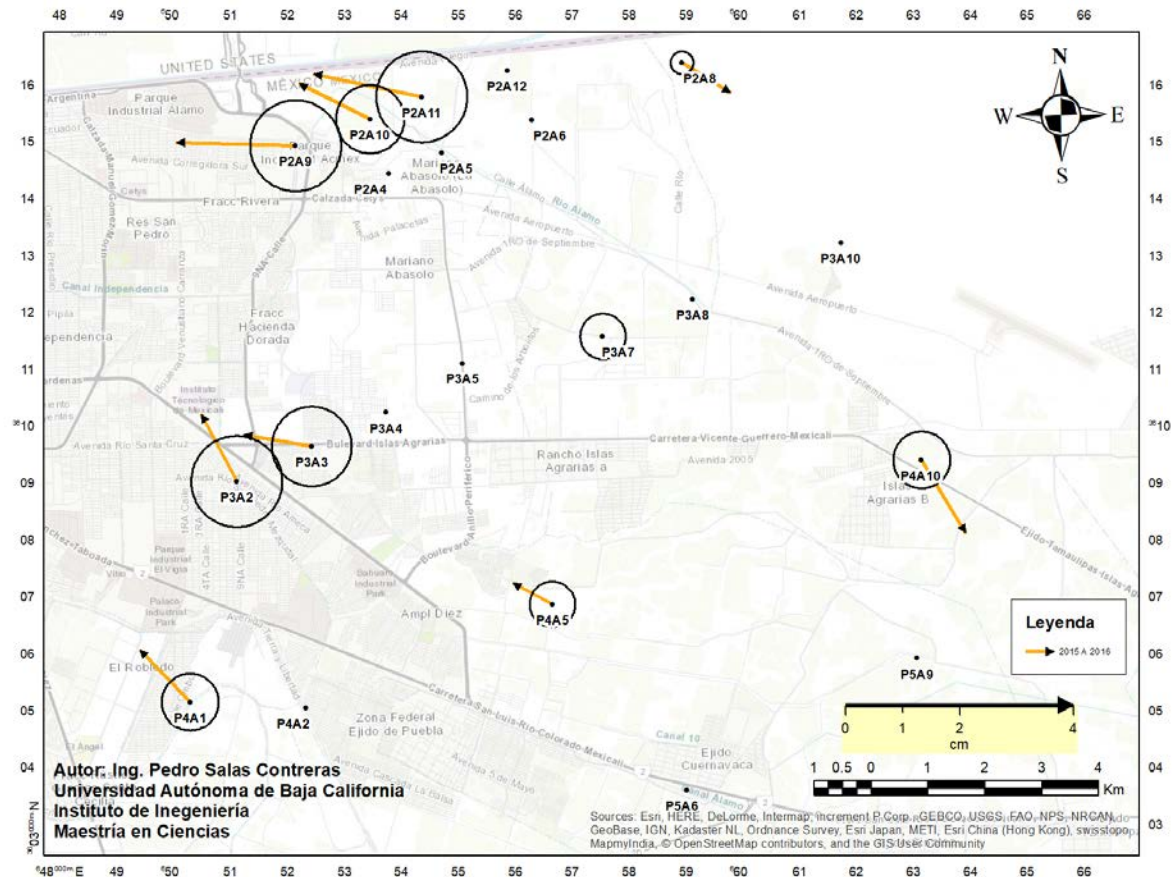


Figura 4-40. Vectores de desplazamiento para el período 2015-2016 (6 meses), estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95 %. Todas las mediciones son relativas al vértice P500.

Los vectores de desplazamiento del período 2015 a 2016 (figura 4-40), muestran un movimiento hacia el noroeste- sureste, aunque más cargado al oeste en algunos casos (P2A9 y P3A3). Los desplazamientos mayores se presentan en los bancos P2A9 (2.1 ± 0.8 cm) y P2A11 (1.9 ± 0.8 cm). Las mínimas magnitudes se localizan en los vértices P2A5 (0.45 ± 0.9 cm) y P3A7 (0.3 ± 0.4 cm), tomando en cuenta las elipses de error obtenidos para cada vértice estos últimos valores son estadísticamente no significativas.

Finalmente, el último período mostrado corresponde a los vectores de desplazamiento del período 2014 a 2016 (figura 4-41) que muestran una dirección de deformación de sureste a noroeste. Los desplazamientos de menor magnitud se presentan en los bancos P2A12 (0.5 ± 0.4 cm) y P3A7 (0.5 ± 0.3 cm), en tanto que los de mayor magnitud (>2 cm) se estimaron en los vértices P2A9 (3.2 ± 0.9 cm) y P2A11 (2.5 ± 0.8 cm), en el resto de los bancos la deformación estadísticamente significativa se obtuvo en los vértices P2A10 (1.7 ± 0.3 cm) y P2A6 (1.5 ± 0.3 cm), localizados en el extremo norte de la zona de estudio.

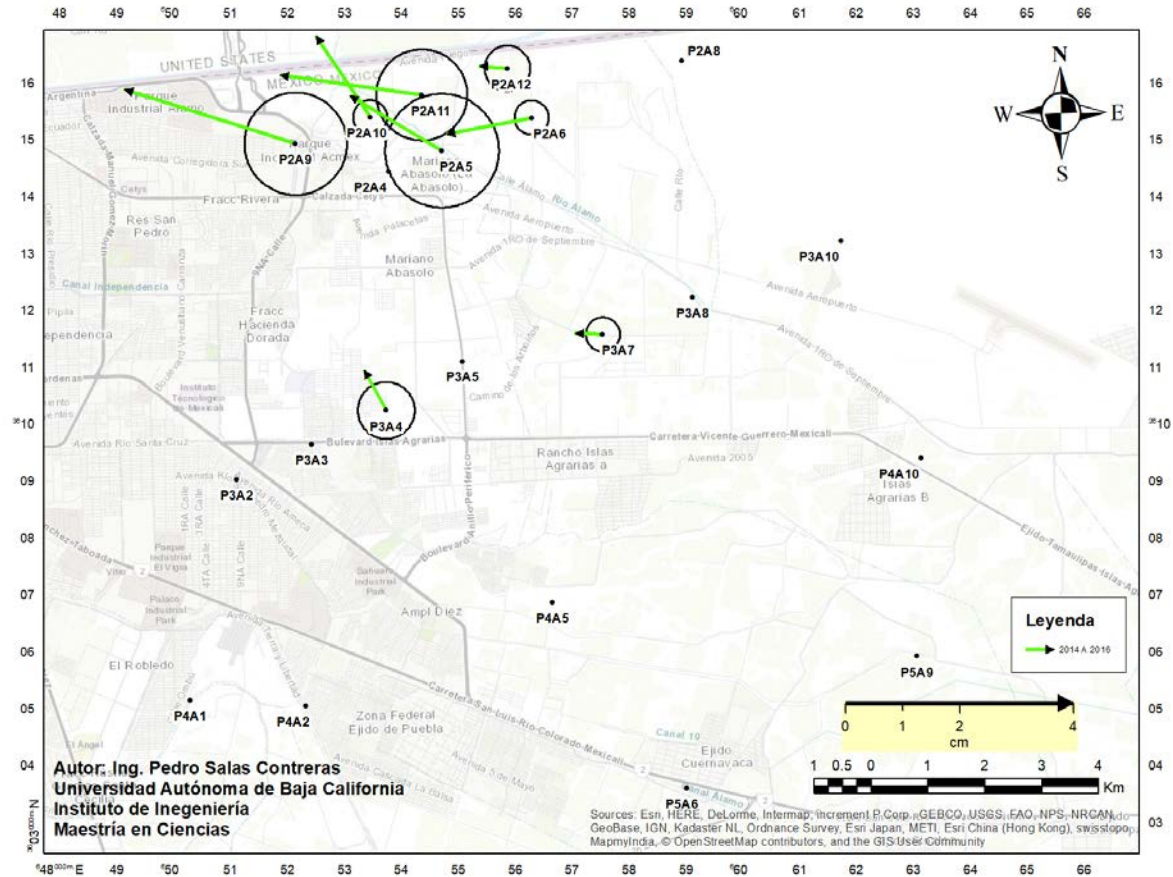


Figura 4-41. Vectores de desplazamiento para el período 2014– 2016, estimados a partir de observaciones GPS. Las elipses de error son dibujadas a un nivel de confianza del 95%. Todas las mediciones son relativas al vértice P500.

En general las deformaciones encontradas para cada vértice de la red durante el período analizado muestran la dirección esperada de desplazamiento lateral derecho de la falla Imperial, pero en el estudio de la deformación pre-sísmica es conveniente conocer la velocidad de desplazamiento anual de los vértices. Para obtener las velocidades representativas se realizó el análisis de cada componente horizontal (Este y Norte) tomando como muestra las estaciones que al menos tuvieran 3 observaciones. Los 5 vértices que cumplen con las características corresponden a P2A9, P2A10, P2A11, P2A5 y P3A7, en donde para obtener la velocidad anual se realizó el análisis de cada una de las componentes observadas obtenidas directamente de los resultados mostrados en las tablas 4-14, 4-20 y 4-26.

El análisis de cada una de las componentes se plantea como una regresión lineal donde cada uno de los datos tiene una incertidumbre relacionada con las diferentes precisiones del valor obtenido. En tal caso se graficaron los valores obtenidos con su respectivo error y fue analizándose cada grupo para obtener la velocidad a partir de la regresión ponderada, primero en la componente Este y posteriormente en la Norte para finalmente obtener la velocidad promedio anual del vértice ajustada, cabe señalar que para el cálculo de esta velocidad se realiza con el valor absoluto de la velocidad por componente para obtener la velocidad anual promedio de cada sitio, como se muestra en la figura 4-42.

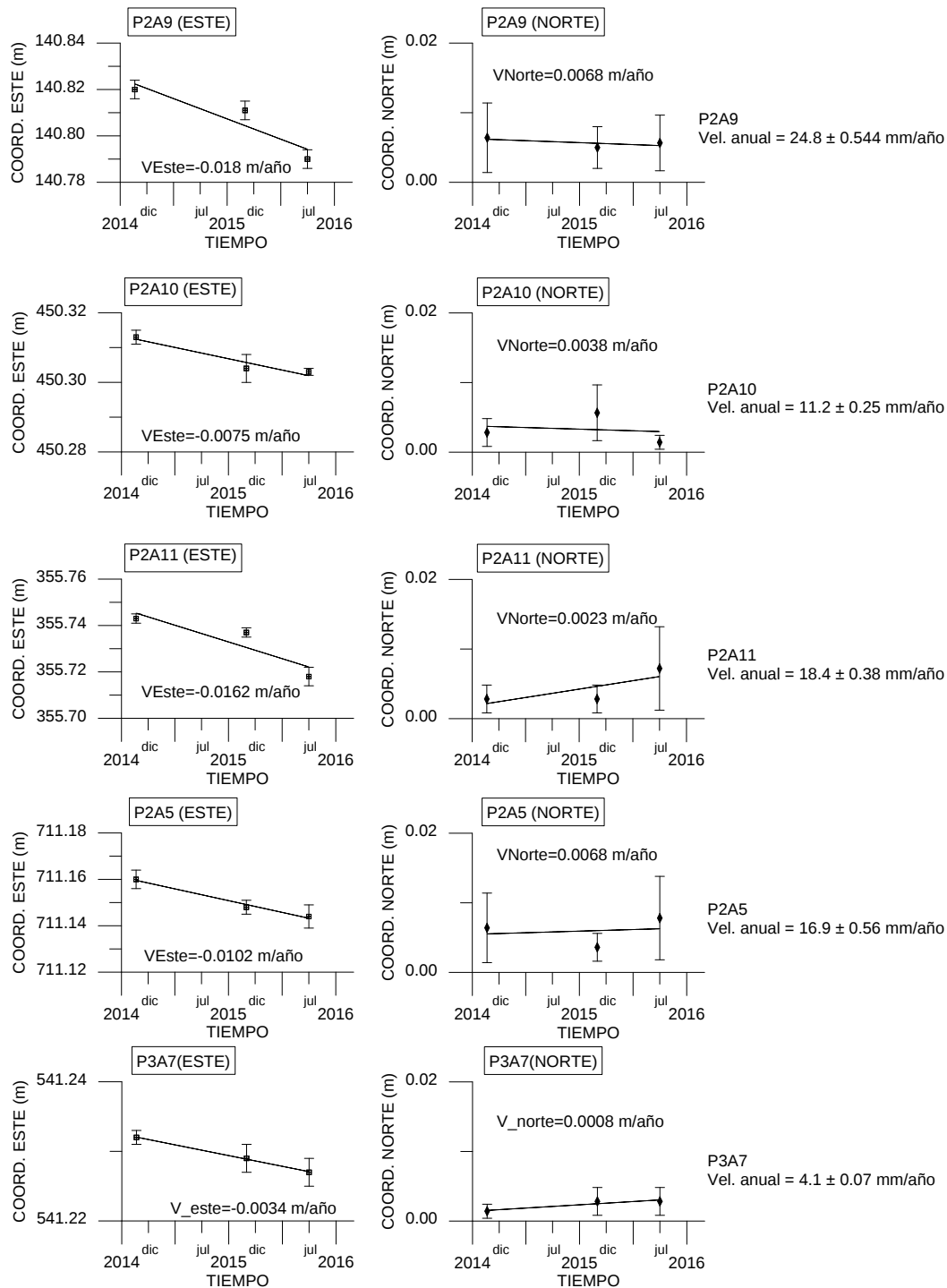


Figura 4-42. Gráficas de velocidad de las componentes este y norte de los vértices P2A9, P2A10, P2A11, P2A5 con 3 observaciones. Datos de la Tabla 4-14, 4-20 y 4-26; Izquierda corresponde a la componente este de cada vértice e izquierda componente norte de cada vértice; extrema derecha la velocidad ajustada.

A partir de esta, se procede a realizar el análisis de deformación mediante el modelo unidimensional de Weertman (1964) para el desplazamiento horizontal, tomando como punto de

partida los parámetros de Lyons *et al.* (2002) que fueron obtenidos aproximadamente a 10 km de la zona de estudio sobre la falla Imperial, de donde se tiene que los parámetros iniciales de profundidad para el modelo son 5.6 km con ± 3 km a la zona bloqueada (H); en cuanto a la velocidad de desplazamiento (V) Lyons *et al.* (2002) estima que oscila alrededor de los 36.5 mm/año, pero de acuerdo con Lisowski *et al.* (1991) esta puede variar hasta velocidades de 46 mm/año en promedio en el sector norte de la misma falla, valor que se utilizará en el modelo.

Entonces con la ecuación 2-1 que explica la deformación entorno a la falla Imperial con desplazamiento lateral derecho es:

$$D(x) = -\frac{46 \left(\frac{\text{mm}}{\text{año}}\right)}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\text{Distancia a la falla Imperial en km}}{5.6 \pm 3 \text{ km}} \right)$$

Y su grafico a partir de D(x) para distancias hasta 6 km en ambos lados de la falla Imperial es:

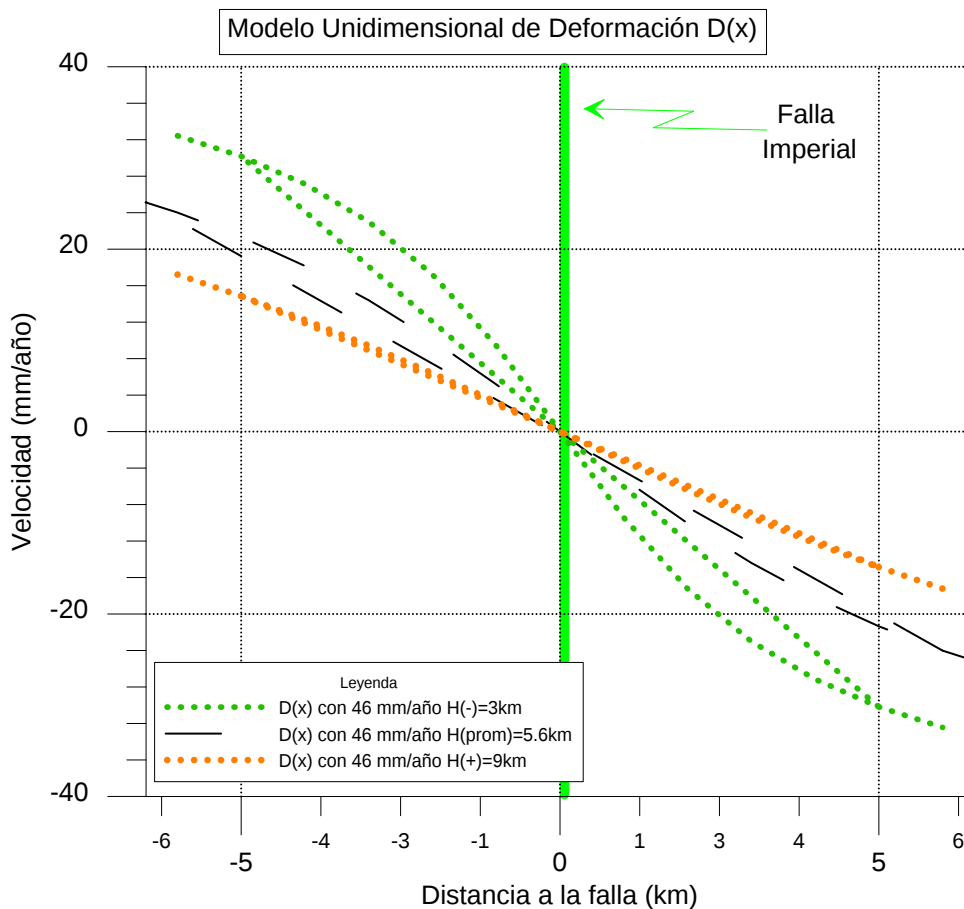


Figura 4-43. Modelo de velocidad de deformación superficial anual esperada entorno a la Falla Imperial, a partir de parámetros de velocidad (46 mm/año) y profundidad a la zona bloqueada (5 ± 3 km) mostradas como líneas punteadas de colores.

Integrando el modelo obtenido con los parámetros de deformación esperada para la falla Imperial y proyectando las velocidades de los 5 vértices calculados que se muestran en la tabla 4-31 se obtiene la figura 4-44, como sigue.

Tabla 4-31. Velocidades promedio calculadas en bancos con observaciones en los 3 períodos. D. E. desviación estándar en mm por año; FI distancia de los bancos al trazo conocido en superficie de la Falla Imperial.

Banco	Velocidad Anual (mm/año)	D. E. $\pm$ (mm/año)	Distancia FI (Km)
P2A9	24.816	0.544	-4.36
P2A10	11.280	0.257	-2.97
P2A11	18.424	0.386	-2.03
P2A5	16.920	0.565	-2.28
P3A7	4.136	0.007	-2.00

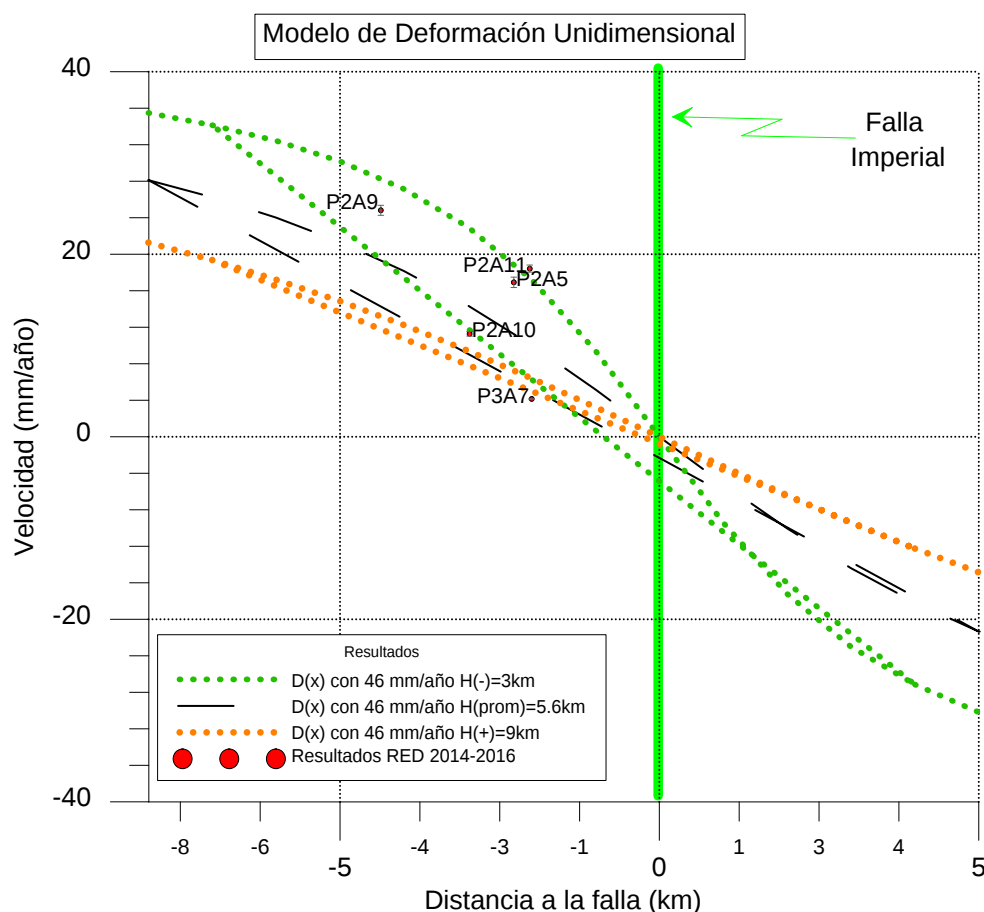


Figura 4-44. Modelo de deformación superficial de la red con respecto al trazo superficial de la falla Imperial, período 2014-2016, a diferentes profundidades (líneas punteadas de colores); puntos de color rojo corresponde a la posición (proyectada) de bancos de la RGF I con barras de desviación estándar (líneas de color gris).

De esta tabla y figura (4-31 y 4-43) se observa que los bancos P2A9 y P2A11 son los sitios con mayor velocidad, el primero con 24.8 ± 0.5 mm/año y el segundo con 11.2 ± 0.3 mm/año, ambos ajustando con la profundidad de 3 km. Otro banco que también muestra una velocidad alta es el P2A5 (16.9 ± 0.5 mm/año). El banco P2A10 con una velocidad de 11.2 ± 0.25 mm/año se localiza entre las curvas de 5.6 y 9 km del modelo, pero considerándose dentro del rango del modelo de deformación esperado para el sitio. Por último, el banco P3A7 muestra una velocidad de $4.1 \pm$

0.007 mm/año, a pesar de mostrar un bajo desviación estándar el resultado se encuentra fuera de rango con los parámetros del modelo, donde posiblemente el resultado este asociado a errores de observación, procesamiento o ajuste para el período estimado.

En general el modelo estimado a partir de los parámetros de Lyons *et al.* (2002) combinado con las velocidades reportadas por Lisowski *et al.* (1991) es bueno para comprender las observaciones en los períodos estimados, exceptuando algunos bancos que se salen de lo esperado en el mismo modelo, debiéndose de reanalizar o mejorar con observaciones posteriores. Siguiendo los objetivos propuestos de este trabajo y teniendo los resultados de la deformación vertical y horizontal se realiza una zonificación.

4.3.Zonificación.

En este subcapítulo se abordará el último objetivo planteado sobre la zonificación de la deformación vertical y horizontal en el área que abarca la RGFI, a partir de los resultados obtenidos de las observaciones gravimétricas y GPS realizadas. Para eso se propone la agrupación de bancos de acuerdo a su localización y movimientos resultantes (vertical y horizontal) estadísticamente significativos.

Para realizar dicha tarea se ha utilizado únicamente la componente vertical obtenida de las estimaciones gravimétricas y para la componente horizontal los resultados de GPS en las campañas de 2015 y 2016. Dado que se tienen estimaciones de GPS en 2014 el análisis de la zonificación solo incluirá lo estimado en la componente horizontal para el periodo de 2014 a 2015, como a continuación se muestra en la tabla 4-31 de deformaciones estimadas por zona.

Tabla 4-32. Deformación estadísticamente significativa clasificada por zonas en el área de estudio. Para zonas con levantamientos signo positivo (+) y para zonas con subsidencia signo negativo (-). Los valores mostrados se encuentran en metros.

	Deformación 2014 a 2015				
	Desplazamiento vertical*		Desplazamiento horizontal		
Zona	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Rumbo aprox.
A	-	-	1.1 ± 0.3	1.7 ± 0.7	Noroeste 
B	-	-	-	0.6 ± 0.5	Sureste 
	Deformación 2015 a 2016				
Zona	Desplazamiento vertical*		Desplazamiento horizontal		Rumbo aprox.
	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	
A		$(-)1.7 \pm 0.7$	1.3 ± 0.6	2.1 ± 0.8	Noroeste 
B		$(-)2.1 \pm 0.9$	1.0 ± 0.2	1.5 ± 0.5	Sureste 
* (+) Levantamiento; (-) Subsidencia.					

A continuación, se describen las zonas definidas para cada período de observación.

4.3.1. Zonificación de Movimientos 2014 a 2015

Partiendo del desplazamiento conocido de la falla Imperial, se determinaron dos zonas denominadas A y B (Figura 4-45). En la primera zona (A) se encontraron deformaciones de 1.1 ± 0.3 cm observado en el vértice P2A6 y el máximo encontrado en P2A5 (1.7 ± 0.7 cm). En cambio, la zona B presenta ligeros desplazamientos 0.6 ± 0.5 cm en el banco P3A10.

4.3.2. Zonificación de Movimientos de 2015 a 2016

En el período de 2015 a 2016 los movimientos estadísticamente significativos se localizaron mayormente en el sector norte de la zona de estudio, siendo el mayor valor de deformación al noroeste en el banco P2A9, reportando 2.1 ± 0.8 cm de deformación, también los bancos que reportaron altos valores son P2A11 (1.9 ± 0.8 cm), P2A10 (1.4 ± 0.6 cm) y en el sector sur de la zona A el banco P4A1 con desplazamientos de hasta 1.3 ± 0.6 cm. Por otra parte, en la zona B localizada en el extremo este de la zona de estudio se observaron deformaciones de 1.0 ± 0.2 cm hasta 1.5 ± 0.5 cm en los bancos P2A8 y P4A10, respectivamente, ambos con dirección al sureste (Figura 4-46).

Respecto de la deformación vertical, a partir de las observaciones gravimétricas, se tiene reportado que la mayor parte de la zona norte y central de la zona de estudio no tiene cambios significativos, únicamente tendencias hacia un probable levantamiento con respecto del banco P2A10. En cambio, en el sector sur de ambas zonas (A y B) se observó cambios negativos de altura (subsistencia), en los bancos P4A5 (-1.7 ± 0.7 cm), P4A10 (-2.1 ± 0.9 cm) y P5A9 (-2.4 ± 1.2 cm).

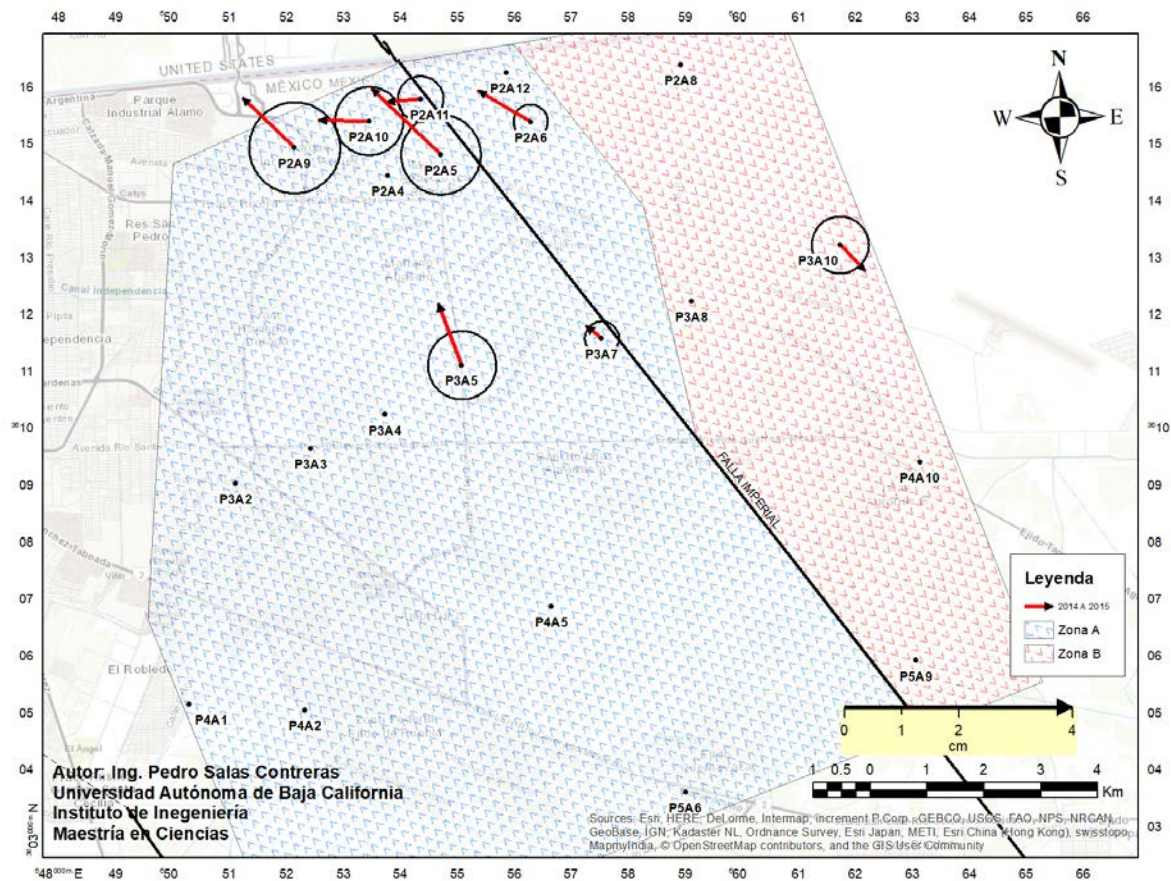


Figura 4-45. Zonificación del área que abarca la RGFI, según el desplazamiento horizontal (GPS) ocurrido en el período 2014 a 2015. Vectores (flechas en color rojo) es el desplazamiento calculado con errores (elipses en color negro) a un nivel de confianza de 95%.

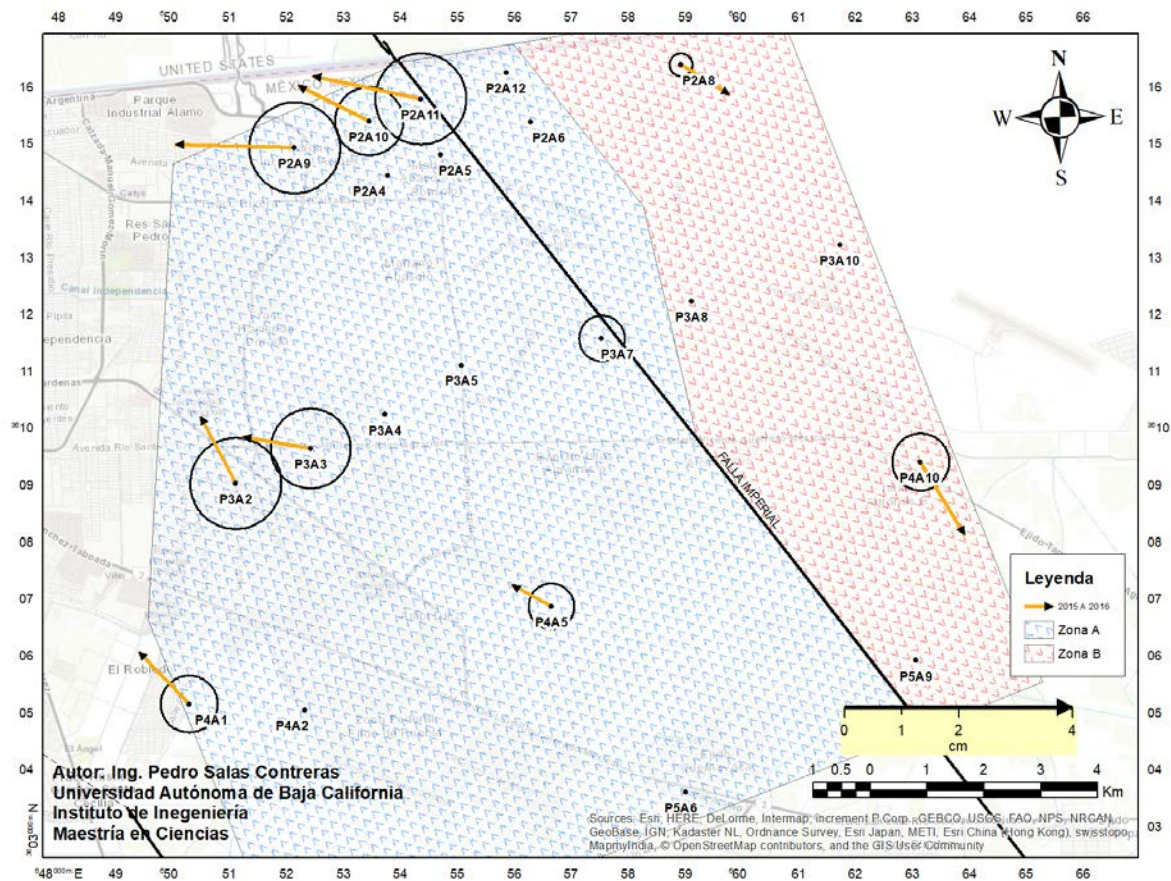


Figura 4-46. Zonificación del área que abarca la RGFI, según el desplazamiento horizontal (GPS) y vertical (microgravimetría) ocurrido en el período 2015 a 2016. Vectores (flechas en color naranja) es el desplazamiento calculado con errores (elipses en color negro) a un nivel de confianza de 95%.

5. CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

5.1. Conclusiones

Del monitoreo gravimétrico y GPS durante 2014 a 2016 de la RGFI, se deduce las siguientes conclusiones:

1. Con la finalidad de alcanzar los niveles de precisión requeridos ($< 20 \mu\text{Gal}$) para el análisis de la deformación vertical con mediciones gravimétricas es necesario, que el ajuste de los datos se realice en conjunto con el análisis de los residuales de este proceso, tomando en cuenta el análisis de confiabilidad interna y externa con la finalidad de identificar errores groseros y cuantificar su impacto en los parámetros ajustados. Los resultados obtenidos en ambas redes de gravimetría cumplieron con la calidad y se consideran confiables.
2. Durante el procesamiento de datos gravimétricos se determinó que la compensación por cambios atmosféricos no son significativos, ya que las variaciones observadas estaban dentro de los límites de precisión de la observación ($< 20 \mu\text{Gal}$).
3. A partir de las mediciones de GPS y microgravimetría combinados durante el período 2014-2015 y 2015-2016, se estimó la magnitud y zonas de la deformación superficial vertical y horizontal del área que barca la RGFI. Con esto se obtuvo información relevante para evaluar el riesgo de movimientos superficiales.
4. De la comparación, de los desplazamientos horizontales del terreno obtenidas con observaciones GPS, con modelos de desplazamiento lateral derecho, se infiere para el sector central de la falla Imperial una velocidad promedio de 46 mm/año y profundidad de 5.6 km a la zona de bloqueo o deslizamientos (*Creep*).
5. Del levantamiento y análisis combinado de la información de GPS durante el período 2014-2015 en bancos de la RGFI, se definieron dos zonas A y B de deformación horizontal. La primer zona (A), localizada al oeste de la zona de estudio, se caracteriza por el desplazamiento hacia el noroeste con valores desde 1.1 ± 0.3 cm hasta 1.7 ± 0.7 cm; la segunda zona (B), localizada al este de la zona de estudio, se caracterizó por desplazamientos al sureste de 0.6 ± 0.5 cm a partir del valor obtenido en el vértice P3A10.
6. A partir del levantamiento y análisis de observaciones GPS durante el período 2014- 2015, se corroboraron los desplazamiento de las zonas A y B; la primer zona reportando valores 1.3 ± 0.6 cm hasta 2.1 ± 0.8 cm con movimiento noroeste, aproximadamente. En la zona B se observó un desplazamiento sureste de 1.0 ± 0.2 cm hasta 1.5 ± 0.5 cm. Derivado del análisis de la información gravimétrica se identificaron cambios de altura significativos en los bancos P4A5 (-1.7 ± 0.7 cm), P4A10 (-2.1 ± 0.9 cm) y P5A9 (-2.4 ± 1.2 cm).
7. La existencia de hundimientos significativos en ambas zonas desde el punto de vista tectónico pueda correlacionarse con estructuras ocultas (fallas) que aún no han tenido expresión en superficie, esto podría ser resultado de la actividad sísmica observada en el período de estudio. Sin embargo, se sabe por otros estudios cercanos que este fenómeno en el Valle de Mexicali se puede asociar con actividades antropogénicas como las mostradas por Ramírez-Hernández *et al.* (1999), Sarychikhina *et al.* (2010) y Sarychikhina *et al.* (2011).

5.2. Recomendaciones.

1. Se recomienda continuar con el monitoreo gravimétrico y observaciones GPS, al menos cada dos años, para caracterizar con más detalle el movimiento asísmico del sector central y sur de la zona de estudio entorno a la falla Imperial.
2. Así mismo, es importante reponer los vértices destruidos e inhabilitados y aumentar su número. Para las nuevas ubicaciones de bancos de la RGFI es importante realizar un estudio de ruido cultural con el fin de asegurar las mejores condiciones para mediciones futuras.
3. Para la adquisición en campo y mejorar el post- proceso es importante incorporar más estaciones GPS, con sesiones de al menos 8 a 10 horas, cuando las condiciones de seguridad lo permitan. Además, se recomienda agregar estaciones GPS de monitoreo continuo cercanas al área de estudio.
4. En cuanto a la gravimetría es importante establecer vértices de referencia gravimétrica en o cerca de la zona de estudio, con el fin de establecer puntos de control para futuras calibraciones entre gravímetros o entre campañas.
5. Es recomendable estudiar si las observaciones de GPS son afectadas por los efectos de campo cercano y lejano observados en los modelos unidimensionales, descritos por Catane *et al.* (2000), en el supuesto de que algunos bancos de la RGFI son sobreestimados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldiss, D., Burke, H., Chacksfield, B., Bingley, R., Teferle, N., Williams, S., . . . Press, N. (2014). Geological interpretation of current subsidence and uplift in the London area, UK, as shown by high precision satellite-based surveying. *Proceedings of the Geologists Association*, 125(1), 1-13. doi: 10.1016/j.pgeola.2013.07.003
- Allis, R., Bromley, C., & Currie, S. (2009). Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 38(1), 169-180. doi: 10.1016/j.geothermics.2008.12.006
- Amiri-Simkooei, A. (2007). *Least-squares variance component estimation: theory and GPS applications*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Astrid-Moreno, J. (2016). *Ajuste matemático y análisis de un sistema altimétrico para la caracterización de deformaciones superficiales, caso particular: falla geológica activa Imperial, Mexicali, B. C.* (Licenciatura), Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa.
- Baarda, W. (1968). A testing procedure for use in geodetic networks. *Delft, Kanaalweg 4, Rijkscommissie voor Geodesie*, 1968., 1.
- Bennett, R. A., Rodi, W., & Reilinger, R. E. (1996). Global Positioning System constraints on fault slip rates in southern California and northern Baja, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 101(B10), 21943. doi: 10.1029/96jb02488
- Berné-Valero, J. L., Baselga-Moreno, S., & Anquela-Julián, A. B. (2003). Microgeodesia y redes locales de alta precisión: RedTop, una solución informática. *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 20(115), 16-27.
- Bonvalot, S., Diamant, M., & Gabalda, G. (1998). Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophysical Journal International*, 135(2), 470-494. doi: 10.1046/j.1365-246X.1998.00653.x
- Brinker, R. C., & Minnick, R. (2012). *The surveying handbook*: Springer Science & Business Media.
- Brown, G. C., Rymer, H., & Stevenson, D. (1991). Volcano monitoring by microgravity and energy budget analysis. *Journal of the Geological Society*, 148, 585-593. doi: 10.1144/gsjgs.148.3.0585
- Carbone, D., Currenti, G., & Del Negro, C. (2007). Elastic model for the gravity and elevation changes before the 2001 eruption of Etna volcano. *Bulletin of Volcanology*, 69(5), 553-562. doi: 10.1007/s00445-006-0090-5
- Carbone, D., & Greco, F. (2007). Review of microgravity observations at Mt. Etna: A powerful tool to monitor and study active volcanoes. *Pure and Applied Geophysics*, 164(4), 769-790. doi: 10.1007/s00024-007-0194-7
- Carnec, C., & Fabriol, H. (1999). Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(9), 1211-1211. doi: 10.1029/1999GL900062
- Castle, R. O., Alt, J. N., Savage, J. C., & Balazs, E. I. (1974). Elevation changes preceding the San Fernando earthquake of February 9, 1971. *Geology*, 2(2), 61-66. doi: 10.1130@0091-7613(1974)2_61_ECPTSF_2.0.CO;2
- Castle, R. O., Church, J. P., Elliott, M. R., & Morrison, N. L. (1975). Vertical crustal movements preceding and accompanying the San Fernando earthquake of February 9, 1971: A summary. *Tectonophysics*, 29(1), 127-140. doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90138-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90138-9)
- Catane, J., Kanbara, H., Obara, K., Sugiawara, N., Hirose, K., Olivar, R., . . . Lanuza, L. (2000). *Deformation in the Leyte geothermal production field, Philippines between 1991–1999*. Paper presented at the Proc. World Geoth. Congress, Japan.

- CG3TOOL. (2003). Programa interactivo de tratamiento de datos gravimetricos Scintrex CG-3/3M.
- Chakraborty, P. K., & Lahiri, A. K. (2008). Microgravity monitoring in Sikkim-Darjeeling Himalaya - an area of potential seismic hazard. *Himalayan Geology*, 29(2), 161-169. doi: <Go to ISI>://WOS:000257696200007
- Chanes, J. J. (2012). *Características estructurales y sismoestratigráficas en un sector del delta del Río Colorado, noroeste de México, a partir de sísmica de reflexión*. (Maestro), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Revisada de <http://biblioteca.cicese.mx/catalogos/tesis/ficha.php?id=18885> Disponible en Biblioteca del CICESE Pelicano database.
- Chavez, D., Gonzalez, J., Reyes, A., Medina, M., Duarte, C., Brune, F., . . . Johnson, C. (1982). Main-shock location and magnitude determination using combined U.S. and Mexican data. In G. Survey (Ed.), (doi: <https://books.google.com.mx/books?id=2r9RAQAAMAAJ>): U.S. Government Printing Office.
- Chavez, R., Lazaro-Mancilla, O., Campos-Enriquez, J., & Flores-Marquez, E. (1999). Basement topography of the Mexicali Valley from spectral and ideal body analysis of gravity data. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 579-587. doi: 10.1016/s0895-9811(99)00041-3
- Ellsworth, W., Lindh, A., Prescott, W., & Herd, D. (1981). The 1906 San Francisco earthquake and the seismic cycle. *Earthquake Prediction*, 126-140.
- Espinal-Zapata, L. M. (2015). *Estudio de los efectos troposféricos en la precisión de mediciones GPS en el suroccidente colombiano*. (Licenciatura), Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Espinosa-Cardena, J., & Campos-Enriquez, J. (2008). Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data from Cerro Prieto geothermal area, Baja California, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(4), 601-609. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.04.014
- Espinosa-Cardena, J., Trejo-Soto, M., Ramirez-Hernandez, J., & Gonzalez Bojórquez, G. (2014). Primera campaña de mediciones gravimétricas del polígono geodinámico de la falla Imperial.
- Fedotov, S. (1968). On the seismic cycle, feasibility of quantitative seismic zoning and long-term seismic prediction. *Seismic Zoning of the USSR*, 121-150.
- Fletcher, J. M. (2014). Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor-Cucapah (Mexico) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, 10(4), 797. doi: 10.1130/ges00933.1
- Fletcher, J. M., & Spelz, R. M. (2009). Patterns of Quaternary deformation and rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge? *Geosphere*, 5(4), 385-407. doi: 10.1130/ges00206.1
- Gabalda, G., & Bonvalot, S. (2016). CG5 TOOL Programa Interactivo de Tratamiento de Datos Gravimétricos CG3/CG5 (Version 201603).
- Gabalda, G., Bonvalot, S., & Hipkin, R. (2003). CG3TOOL: an interactive computer program to process Scintrex CG-3/3M gravity data for high-resolution applications. *Computers & Geosciences*, 29(2), 155-171. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00114-0)
- Gabtni, H., Zenatti, B. C., Jallouli, C., Mickus, K. L., & Bedir, M. (2010). The crustal structure of the Sahel Basin (eastern Tunisia) determined from gravity and geothermal gradients: implications for petroleum exploration. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3-4), 507-516. doi: 10.1007/s12517-010-0151-0
- Galloway, D., & Burbey, T. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5

- Gerasimenko, M. D., Shestakov, N. V., & Kato, T. (2000). On optimal geodetic network design for fault-mechanics studies. *Earth Planets and Space*, 52(11), 985-987. doi: 10.1186/BF03352317
- Glowacka, E., Gonzalez, J., & Fabriol, H. (1999). Recent vertical deformation in Mexicali Valley and its relationship with tectonics, seismicity, and the exploitation of the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 156(4), 591-614. doi: 10.1007/s000240050314
- Glowacka, E., Sarychikhina, O., & Nava, F. (2005). Subsidence and Stress Change in the Cerro Prieto Geothermal Field, B. C., Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 162(11), 2095-2110. doi: 10.1007/s00024-005-2706-7
- Glowacka, E., Sarychikhina, O., Suárez, F., Nava, F. A., Farfan, F., De Cossio Batani, G., & Garcia Arthur, M. (2010). *Anthropogenic subsidence in the Mexicali Valley, BC, Mexico, caused by the fluid extraction in the Cerro Prieto geothermal Field and the role of faults*. Paper presented at the Proceedings of the World Geothermal Congress (WGC).
- González, J. (1990). La falla imperial en el Valle de Mexicali. *Revista de Ingeniería Sísmica*(40), 35-46.
- Hautmann, S., Gottsmann, J., Camacho, A. G., Fournier, N., Sacks, I. S., & Sparks, R. S. J. (2010). Mass variations in response to magmatic stress changes at Soufriere Hills Volcano, Montserrat (WI): Insights from 4-D gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(1-2), 83-89. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.004
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). Physical geodesy. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 86(1), 491-492.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2001). *Global positioning system: theory and practice* (5a ed., 10.1007/978-3-7091-6199-9): Springer Science & Business Media.
- Hopfield, H. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 4487-4499.
- Hunt, T. M., Bromley, C. J., Risk, G. F., Sherburn, S., & Soengkono, S. (2009). Geophysical investigations of the Wairakei Field. *Geothermics*, 38(1), 85-97. doi: 10.1016/j.geothermics.2008.11.002
- Hunt, T. M., & Graham, D. J. (2009). Gravity changes in the Tauhara sector of the Wairakei-Tauhara geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 38(1), 108-116. doi: 10.1016/j.geothermics.2008.12.003
- INEGI. (2015). Censo de Población 2015, Mexicali, B.C., México. Revisada Noviembre, 2017, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/>
- Jerrett, A. S. (2016). *Paleoseismology of the Imperial Fault at the US-Mexico border, and correlation of regional lake stratigraphy through analysis of oxygen/carbon isotope data*. San Diego State University.
- Jiang, J., & Fialko, Y. (2016). Reconciling seismicity and geodetic locking depths on the Anza section of the San Jacinto fault. *Geophysical Research Letters*, 43(20), 10,663-610,671. doi: 10.1002/2016GL071113
- Jiménez-Martínez, M., Marquez-Mateu, A., Paredes-Asencio, J., & Villar-Cano, M. (2012). Progreso en la práctica del ajuste gaussiano de una red local. Método de Triangulación, Valencia, Real Academia de Cultura Valenciana. *Revista Digital: www.racv.es/racv digital*.
- Jiménez-Vega, N. (2006). *Software para procesamiento de datos GPS*. (Licenciatura), Universitat Politècnica de Catalunya.
- Johnson, H., & Wyatt, F. (1994). Geodetic network design for fault-mechanics studies. *Manuscripta geodaetica*, 19(5), 309-309.
- Johnson, H. O., Johnson, H. O., Wyatt, F. K., & Wyatt, F. K. (1994). Geodetic network design for fault-mechanics studies. *Manuscripta Geodaetica*, 19, 309-323.

- Jousset, P., Mori, H., & Okada, H. (2003). Elastic models for the magma intrusion associated with the 2000 eruption of Usu Volcano, Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125(1-2), 81-106. doi: 10.1016/s0377-0273(03)00090-8
- Kaplan, E., & Hegarty, C. (2005). *Understanding GPS: principles and applications*: Artech house.
- King, N. E., & Thatcher, W. (1998). The coseismic slip distributions of the 1940 and 1979 Imperial Valley, California, earthquakes and their implications. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 103(B8), 18069-18086. doi: 10.1029/98jb00575
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*: John Wiley & Sons.
- Ley-Garcia, J. (2010). *Atlas de Riesgos Naturales y Químicos: Ciudad de Mexicali*. Mexicali, Baja California: Gobierno del Estado Retrieved from http://www.anr.gob.mx/Docs/HABITAT/vr_ATLAS_mexicali.pdf.
- Lisowski, M., Savage, J. C., & Prescott, W. H. (1991). The velocity field along the San Andreas Fault in central and southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5), 8369-8389. doi: 10.1029/91JB00199
- Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355. doi: 10.1029/JZ064i012p02351
- Lyons, S. N., Bock, Y., & Sandwell, D. T. (2002). Creep along the imperial fault, southern California, from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107(B10). doi: 10.1029/2001jb000763
- Meltzner, A. J., Rockwell, T. K., & Owen, L. A. (2006). Recent and long-term behavior of the Brawley fault zone, Imperial Valley, California: An escalation in slip rate? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2304-2328. doi: 10.1785/0120050233
- Mendoza-Garcilazo, L. (2014). *Atlas de riesgos de Baja California: identificación y actualización de peligros*. Retrieved from <http://www.proteccioncivilbc.gob.mx/e-library.html>.
- Merriam, J. (1992). Atmospheric pressure and gravity. *Geophysical Journal International*, 109(3), 488-500.
- Miranda, S., Herrada, A., & Pacino, M. C. (2013). Respuesta instrumental del gravímetro scintrex autograv cg-5 (s/n 40484) en modos continuo y relevamiento. *Geoacta*, 38, 0-0. doi: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442013000100001&nrm=iso
- NGS. (2016). Red CORS. 2016, de <http://geodesy.noaa.gov/UFCORS/>
- Niebauer, T. (2007). Gravimetric Methods—Absolute Gravimeter: Instruments Concepts and Implementation-3.03.
- Niell, A. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3227-3246.
- Nishenko, S. P. (1985). Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B5), 3589-3615.
- Nordquist, G. A., Acuna, J., & Stimac, J. (2010). *Precision Gravity Modeling and Interpretation at the Salak Geothermal Field, Indonesia*. Paper presented at the Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Pajares, M. H., Subirana, J. S., & Zornoza, J. M. J. (2001). *Procesado de datos GPS: código y fase: algoritmos, técnicas y habilidades*.

- Pamukcu, O., Gonenc, T., Cirmik, A., Sindirgi, P., Kaftan, I., & Akdemir, O. (2015). Investigation of vertical mass changes in the south of Izmir (Turkey) by monitoring microgravity and GPS/GNSS methods. *Journal of Earth System Science*, 124(1), 137-148. doi: <Go to ISI>://WOS:000350359700011
- Pamukcu, O., Gonenc, T., Uyanik, O., Sozbilir, H., & Cakmak, O. (2014). A microgravity model for the city of Izmir (Western Anatolia) and its tectonic implementations. *Acta Geophysica*, 62(4), 849-871. doi: 10.2478/s11600-014-0203-z
- Pamukçu, O., Gönenç, T., Uyanik, O., Sözbilir, H., & Çakmak, O. (2014). A microgravity model for the city of İzmir (Western Anatolia) and its tectonic implementations. *Acta Geophysica*, 62(4), 849-871. doi: 10.2478/s11600-014-0203-z
- Park, Y. S., Rim, H., & Lim, M. (2007). A Microgravity for Mapping and Monitoring the Subsurface Cavities. [□□□□ □□ □□□□ □□ □□ □□□□]. *Geophysical Exploration*, 10(4), 383-392. doi: <Go to ISI>://KJD:ART001209812
- Perdiguer, R., Zurutuza'v, J., Ruiz, M., & Sevilla, M. (2008). *Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión*
- Pevnev, A. (2009). Sobre las grandes causas que no permiten resolver el problema del pronóstico sísmico por los métodos de solución inversa (pp. 156-170). San Petersburgo: Universidad Estatal Rusa de Hidrometeorología.
- Poland, M., Burgmann, R., Dzunisin, D., Lisowski, M., Masterlark, T., Owen, S., & Fink, J. (2006). Constraints on the mechanism of long-term, steady subsidence at Medicine Lake volcano, northern California, from GPS, leveling, and InSAR. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150(1-3), 55-78. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.07.007
- Ramírez-Hernández, J., & Cobo-Rivera, J. M. (1999). Cambios de gravedad inducidos en el campo geotérmico de Cerro Prieto entre 1978 y 1997. *GEOS*, 19(2), 94-104.
- Ramirez-Ramos, E. E., Vidal-Villegas, A., Gonzalez-Fernandez, A., & Stock, J. M. (2014). A Crustal Velocity Model for the Southern Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Seismological Research Letters*, 86(1), 181-191. doi: 10.1785/0220140007
- Ramón-Morales, E. (2010). *Determinación directa del geode en el sector norte de la red geodésica de la ciudad y puerto de Ensenada*. (Maestría), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Revisada de <http://biblioteca.cicese.mx/catalogos/tesis/ficha.php?id=18457> Disponible en Biblioteca del CICESE Pelicano database.
- Reid, H. F. (1910). *The mechanics of the earthquake* (Vol. 2): Carnegie institution of Washington.
- RESNOM. (2015). Red Sísmica del Noroeste de México. Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada., Baja California, México, Revisada 01/12/2017, 2017, de <http://resnom.cicese.mx>
- Reudink, R., Klees, R., Francis, O., Kusche, J., Schlesinger, R., Shabanlou, a., . . . Timmen, L. (2014). High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters. *Journal of Geodesy*, 88(6), 617-622. doi: 10.1007/s00190-014-0705-0
- Rockwell, T. K., & Klinger, Y. (2013). Surface Rupture and Slip Distribution of the 1940 Imperial Valley Earthquake, Imperial Fault, Southern California: Implications for Rupture Segmentation and Dynamics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 629-640. doi: 10.1785/0120120192

- Romero-Andrade, R. (2014). *Establecimiento de un sistema geoespacial utilizando métodos geodésicos satelitales en el estudio de campos de deformaciones superficiales sismogénicas*. (Maestría), Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa.
- Rymer, H. (1989). A contribution to precision microgravity data-analysis using Lacoste and Romberg gravity meters. *Geophysical Journal-Oxford*, 97(2), 311-322. doi: 10.1111/j.1365-246X.1989.tb00503.x
- Santos-Jr, G. (2005). *Rede Gravimétrica: Novas perspectivas de ajustamento, análise de qualidade e integração de dados gravimétricos*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 165 p.[Links].
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., & Vidal, F. S. (2011). Land subsidence in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005: An integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204(1-4), 76-90. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.004>
- Sarychikhina, O., Mellors, R., & Glowacka, E. (2010). *Analysis of Spatial and Temporal Evolution of the Ground Deformation in the Cerro Prieto Geothermal Field (Mexicali Valley, BC, Mexico) Using DInSAR and Leveling Data*. Paper presented at the Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Savage, J., & Burford, R. (1973). Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5), 832-845.
- Scholz, C. H. (1988). Mechanisms of seismic quiescences. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2), 701-718. doi: 10.1007/bf00879016
- Scintrex. (1995). CG-3/3M Autograv automated Gravity Meter, Operador Manual.
- Scintrex. (2009). CG-5 Scintrex Autograv System operation manual (Revisión 5 ed.).
- Seigel, H., Brcic, I., & Mistry, P. (1995). A guide to high precision land gravimeter surveys. *Scintrex Limited*, 222.
- Sevilla, M. J. (1986). Formulación de modelos matemáticos en la compensación de redes geodésicas. *IGN-LAG. Cursos y seminarios*(2).
- Sevilla, M. J. (1987). *Colocación mínimos cuadrados*. CSIC-UCM-Instituto de Astronomía y Geodesia (IAG).
- Sevilla, M. J., & Núñez-García del Pozo, A. (1990). Ajuste y análisis estadístico de ondulaciones del geoide obtenidas por métodos astrogeodésicos.
- Shahbazi, A., Safari, A., Foroughi, I., & Tenzer, R. (2016). A numerically efficient technique of regional gravity field modeling using Radial Basis Functions. *Comptes Rendus Geoscience*, 348(2), 99-105. doi: 10.1016/j.crte.2015.08.003
- Smith-Konter, B. R., Sandwell, D. T., & Shearer, P. (2011). Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 116. doi: 10.1029/2010jb008117
- Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., Nafarrete-Zamarripa, L. M., Ramírez, J., & Glowacka, E. (2008). Shape and Dimensions of the Cerro Prieto Pull-Apart Basin, Mexicali, Baja California, Mexico, Based on the Regional Seismic Record and Surface Structures. *International Geology Review*, 50(7), 636-649. doi: 10.2747/0020-6814.50.7.636
- Suarez-Vidal, F., Munguia-Orozco, L., Gonzalez-Escobar, M., Gonzalez-Garcia, J., & Glowacka, E. (2007). Surface rupture of the Morelia fault near the Cerro Prieto geothermal field, Mexicali, Baja California, Mexico, during the M-w 5.4 earthquake of 24 May 2006. *Seismological Research Letters*, 78(3), 394-399. doi: 10.1785/gssrl.78.3.394

- Sugihara, M., & Ishido, T. (2008). Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, 73(6), WA37-WA47. doi: 10.1190/1.2991105
- Sykes, L. R., & Nishenko, S. P. (1984). Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San-Andreas, San-Jacinto, and Imperial faults, California, 1983-2003. *Journal of Geophysical Research*, 89(NB7), 5905-5927. doi: 10.1029/JB089iB07p05905
- Tavera, H. (1992). El Proceso de Ruptura Sísmica: Barrera o Asperidad? *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 83, 61-66.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1): Cambridge university press.
- Thomas, A. P., & Rockwell, T. K. (1996). A 300- to 550-year history of slip on the Imperial fault near the US-Mexico border: Missing slip at the Imperial fault bottleneck. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 101(B3), 5987-5997. doi: 10.1029/95jb01547
- Tizzani, P., Battaglia, M., Castaldo, R., Pepe, A., Zeni, G., & Lanari, R. (2015). Magma and fluid migration at Yellowstone Caldera in the last three decades inferred from InSAR, leveling, and gravity measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2627-2647. doi: 10.1002/2014JB011502
- Trejo-Soto, M., Espinosa-Cardena, J. M., Pevnev Kusmish, A., Ramírez-Hernández, J., Lázaro Mancilla, O., Reyes López, J., . . . Lopez L., M. (2011). Monitoreo geodésico de los movimientos del subsuelo como resultado de eventos sísmicos en fallas geológicas activas, caso de estudio: Valle de Mexicali.
- Trimble. (2008). Guía del Usuario TBC v2.0.
- Trimble. (2012). Procesamiento de Trimble HD-GNSS (doi: www.trimble.com pp. 15). Westminster, Colorado, USA.
- USGS. (2017). Catálogo Sísmico United State Geological Service. USA, Revisada 01/12/2017, 2017, de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Warburton, R. J., & Goodkind, J. M. (1977). The influence of barometric-pressure variations on gravity. *Geophysical Journal International*, 48(3), 281-292. doi: 10.1111/j.1365-246X.1977.tb03672.x
- Weertman, J. (1964). Continuum distribution of dislocations on faults with finite friction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54(4), 1035-1058. doi: <http://www.bssaonline.org/content/54/4/1035.abstract>
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. (1995). Survey Measurement Adjustments by Least Squares *The Surveying Handbook* (pp. 383-413): Springer.
- Wynn, J. C. (1986). A review of geophysical methods used in archaeology. *Geoarchaeology*, 1(3), 245-257.
- Zhou, W., Li, J., & Du, X. (2014). Semiautomatic interpretation of microgravity data from subsurface cavities using curvature gradient tensor matrix. *Near Surface Geophysics*, 12(5), 579-586. doi: 10.3997/1873-0604.2014021

7. ANEXOS

7.1.Bancos de Referencia GPS

Estación Geodésica P500

IGS 08
ALLAMERICNCS2005 (P500), CALIFORNIA

Created on 01May2012 at 09:52:59.

Antenna Reference Point(ARP): ALLAMERICNCS2005 CORS ARP

PID = DN7404

IGS08 POSITION (EPOCH 2005.0)

Computed in Apr 2012 using 12 days of data.

X =	-2296231.064 m	latitude	=	32 41 24.16722 N
Y =	-4857729.667 m	longitude	=	115 17 59.74908 W
Z =	3425068.248 m	ellipsoid height	=	-20.583 m

IGS08 VELOCITY

Predicted with HTDP_3.1.2 Apr 2012.

VX =	-0.0172 m/yr	northward	=	-0.0009 m/yr
VY =	0.0076 m/yr	eastward	=	-0.0188 m/yr
VZ =	-0.0008 m/yr	upward	=	-0.0000 m/yr

NAD_83 (2011) POSITION (EPOCH 2010.0)

Transformed from IGS08 (epoch 2005.0) position in Apr 2012.

X =	-2296230.398 m	latitude	=	32 41 24.15390 N
Y =	-4857730.975 m	longitude	=	115 17 59.70449 W
Z =	3425068.337 m	ellipsoid height	=	-19.779 m

7.2.Tablas de Vectores de Fiabilidad Externa

Tabla 7-1. Vectores de fiabilidad externa de la red gravimétrica 2015. Subrayados en gris corresponden a los vectores que presentaron mayor impacto en las observaciones.

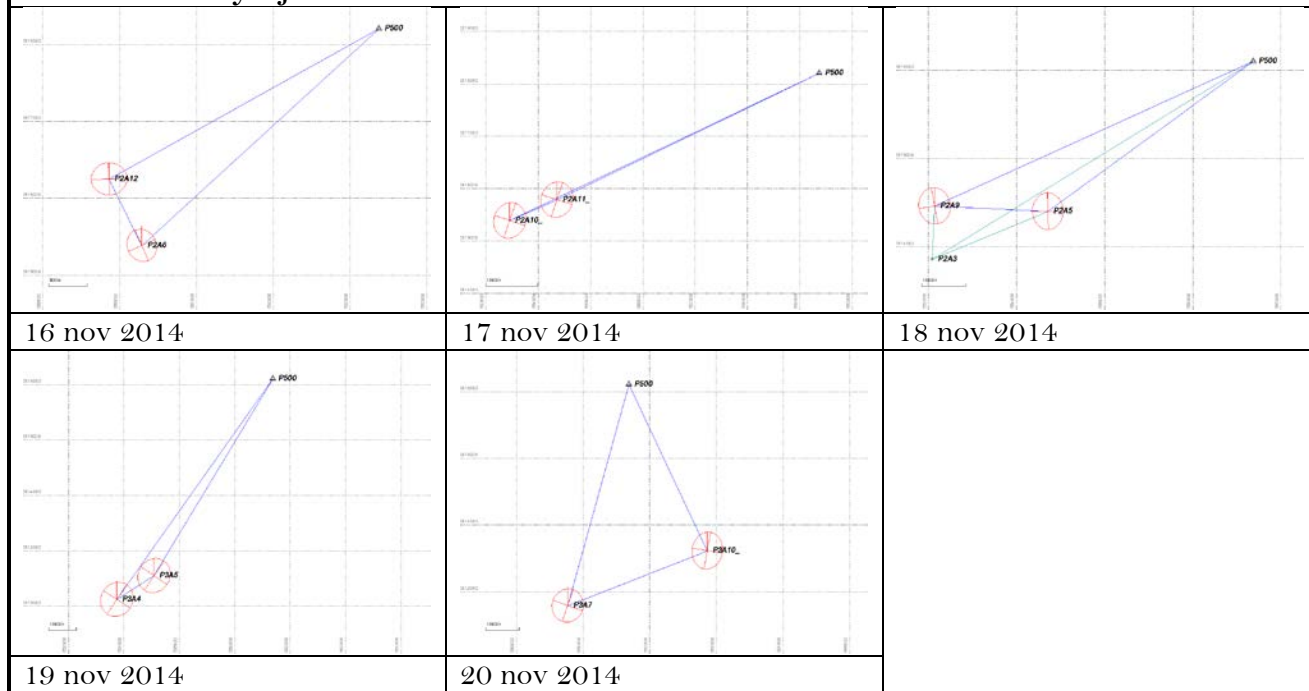
Observable	P2A5	P2A11	P2A12	P2A6	P2A8	P3A7	P3A10	P3A4	P2A4	P2A9	P3A2	P3A3	P4A5	P4A2	P4A1	P5A6	P4A10	P5A9
1	-0.007	0.017	0.004	0	0	0	0	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
2	-0.001	-0.02	0.02	0.01	0.011	0.01	0.011	0.007	0.002	0.001	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
3	0	-0.004	-0.009	0.002	0	0.002	0.001	0.001	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4	0.006	0.001	-0.006	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.004	0	0	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005
5	0	0.003	0.008	-0.002	0	-0.001	-0.001	-0.001	0	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
6	-0.001	-0.005	-0.011	0.002	0.006	0.003	0.005	0.002	0	0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
7	0	0	0	0.001	-0.003	0	-0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.004	0.005	0.008	0.005	0.014	-0.006	0.025	-0.004	0	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
9	0.004	0.005	0.008	0.005	0.015	-0.006	-0.02	-0.004	0	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
10	0.002	0	-0.002	0.004	-0.014	-0.002	-0.008	-0.001	0	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
11	-0.006	-0.006	-0.007	-0.009	-0.004	0.008	0.001	0.005	0.001	0	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
12	-0.005	-0.005	-0.007	-0.007	-0.008	-0.008	-0.008	0.006	0	0	0.001	0.003	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001
13	-0.006	-0.007	-0.009	-0.01	-0.01	-0.011	-0.011	-0.016	0.001	0	-0.012	-0.014	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012
14	0.017	0.013	0.012	0.012	0.011	0.01	0.011	0.006	-0.001	-0.001	0.006	0.006	0.007	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
15	-0.006	-0.001	0.006	0.008	0.008	0.007	0.008	0.005	0	0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
16	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.001	0.002	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
17	0.003	-0.007	-0.001	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	-0.01	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.003	0.001	0	-0.003	-0.003	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
19	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003
20	0.012	0.018	0.013	0.011	0.011	0.01	0.011	0.008	0.005	0.002	0.008	0.008	0.009	0.009	0.008	0.009	0.009	0.009
21	0.024	0.021	0.024	0.024	0.024	0.025	0.024	0.026	0.027	0.012	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
22	-0.016	-0.014	-0.015	-0.016	-0.016	-0.016	-0.016	-0.017	-0.018	0.019	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
23	-0.017	-0.015	-0.016	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.018	<u>-0.041</u>	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
24	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	-0.002	0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
25	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	-0.003	-0.004	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
26	-0.004	-0.005	-0.007	-0.007	-0.007	-0.008	-0.008	-0.011	0	0	-0.008	-0.01	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
27	0.005	0.005	0.007	0.007	0.008	0.009	0.008	0.009	0	0	0.017	0.013	0.015	0.016	0.016	0.016	0.015	0.015
28	-0.005	-0.006	-0.008	-0.008	-0.009	-0.01	-0.009	0.001	0.001	0	0.017	0.009	0.027	0.023	0.021	0.024	0.026	0.025
29	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	0	0	0.007	0.004	-0.016	0.011	0.009	-0.006	-0.013	-0.01
30	-0.002	-0.003	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	0	0	0.008	0.004	-0.017	-0.021	0.009	-0.006	-0.014	-0.011
31	-0.007	-0.008	-0.01	-0.011	-0.011	-0.013	-0.012	0.001	0.001	0	0.022	0.012	<u>-0.051</u>	<u>-0.055</u>	<u>-0.058</u>	<u>-0.054</u>	<u>-0.052</u>	<u>-0.053</u>
32	0	0	0	0	0	0	0	0.008	0	0	-0.022	0.018	-0.017	-0.018	-0.019	-0.018	-0.017	-0.017
33	0	0	0	0	0	0	0	0.008	0	0	-0.02	-0.029	-0.016	-0.017	-0.018	-0.017	-0.016	-0.016
34	0.005	0.005	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	-0.006	0	0	-0.001	-0.003	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001
35	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	0	0.002	0.001	-0.004	0	0.002	-0.022	-0.008	-0.015
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	-0.001	0	0.001	0.001
37	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	-0.001	0	0.002	-0.001	-0.001	0.001	0.002	0.001
38	0	0	0	0	-0.001	-0.001	-0.001	0	0	0	0.001	0.001	-0.002	0	0.001	0.018	0.003	0.01
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.001	0	0	0.006	<u>-0.034</u>	<u>0.055</u>
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.001	0	0	0.006	<u>-0.033</u>	<u>-0.078</u>
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	-0.006	-0.001	-0.003
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.001	0	0	0.006	<u>0.109</u>	<u>0.059</u>

Tabla 7-2. Vectores de fiabilidad externa de la red gravimétrica 2016. Subrayados en gris corresponden a los vectores que presentaron mayor impacto en las observaciones.

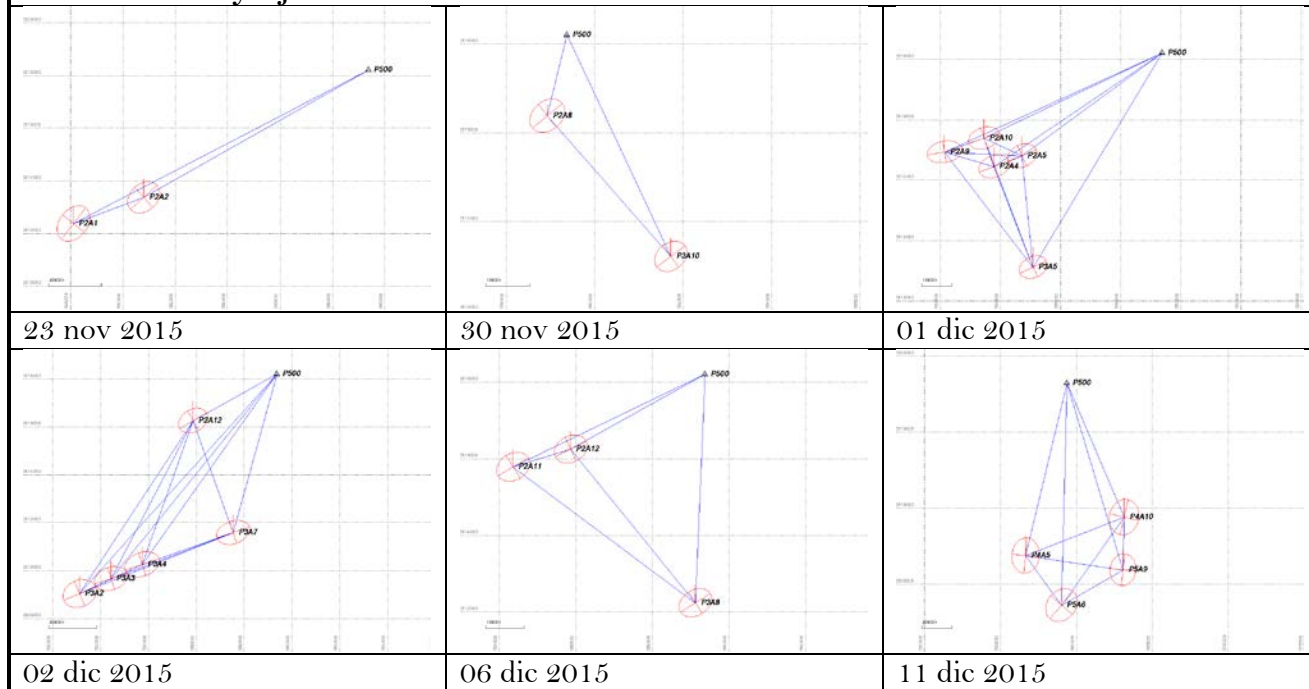
Observable	P2A5	P2A11	P2A12	P2A6	P2A8	P3A7	P3A10	P3A4	P2A4	P2A9	P3A2	P3A3	P4A5	P4A2	P4A1	P5A6	P4A10	P5A9
1	-0.014	0.014	0.003	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.003	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
2	0.001	-0.009	0.039	0.014	0.016	0.010	0.013	0.006	0.003	0.002	0.006	0.006	0.010	0.009	0.009	0.010	0.011	0.010
3	0.000	-0.003	-0.012	0.005	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003
4	0.004	0.001	-0.004	-0.008	-0.006	-0.005	-0.005	-0.002	0.000	0.000	-0.002	-0.002	-0.004	-0.004	-0.003	-0.004	-0.005	-0.004
5	0.000	0.002	0.008	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
6	0.000	-0.002	-0.008	0.002	0.008	0.003	0.005	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003
7	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.005	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
8	0.001	0.001	0.002	0.002	0.006	-0.003	0.016	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.007	0.005
9	0.003	0.004	0.007	0.007	0.020	-0.006	-0.026	-0.003	-0.001	-0.001	-0.004	-0.004	-0.011	-0.010	-0.008	-0.011	-0.015	-0.013
10	0.002	0.001	-0.002	0.006	-0.028	-0.002	-0.012	-0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.005	-0.004	-0.003	-0.004	-0.007	-0.006
11	-0.004	-0.003	-0.005	-0.008	-0.005	0.007	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.003	0.005	0.005	0.004	0.005	0.004	0.004
12	-0.003	-0.003	-0.005	-0.006	-0.007	-0.009	-0.008	0.003	0.001	0.001	0.000	0.002	-0.008	-0.006	-0.005	-0.007	-0.008	-0.007
13	-0.010	-0.010	-0.017	-0.022	-0.024	-0.033	-0.030	<u>-0.045</u>	0.003	0.002	-0.029	-0.039	-0.032	-0.031	-0.031	-0.031	-0.031	-0.031
14	0.015	0.010	0.009	0.008	0.007	0.004	0.005	-0.001	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	0.003	0.003	0.002	0.003	0.004	0.003
15	-0.006	-0.002	0.005	0.011	0.010	0.007	0.008	0.003	0.001	0.000	0.003	0.003	0.007	0.006	0.005	0.006	0.007	0.007
16	-0.003	-0.003	-0.005	-0.007	-0.004	0.006	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
17	0.004	-0.004	-0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
18	-0.007	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	-0.002	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001
19	-0.004	-0.003	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.003	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
20	0.026	<u>0.036</u>	0.029	0.023	0.023	0.018	0.020	0.014	0.011	0.006	0.014	0.014	0.018	0.017	0.017	0.018	0.019	0.018
21	0.017	0.013	0.016	0.018	0.018	0.020	0.019	0.021	0.022	0.013	0.021	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
22	-0.011	-0.009	-0.010	-0.012	-0.012	-0.013	-0.013	-0.014	-0.015	0.031	-0.014	-0.014	-0.013	-0.013	-0.014	-0.013	-0.013	-0.013
23	-0.010	-0.008	-0.010	-0.011	-0.011	-0.012	-0.012	-0.013	-0.014	<u>-0.035</u>	-0.013	-0.013	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.002	0.000	0.000	-0.020	0.009	-0.003	-0.007	-0.010	-0.005	-0.003	-0.004
25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.010	-0.016	-0.002	-0.003	-0.005	-0.003	-0.001	-0.002
26	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	0.000	0.000	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
27	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.000	0.000	0.024	0.011	0.007	0.010	0.013	0.008	0.006	0.007
28	0.001	0.001	0.002	0.001	0.004	-0.002	0.011	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.005	0.003
29	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.005	0.000	-0.012	0.001	0.000	0.000	0.005	0.002	0.021	0.018	0.015	0.021	0.040	<u>0.031</u>
30	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.007	0.005	0.004	0.003	-0.016	-0.007
31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	-0.002	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.002	-0.024	-0.020	-0.016	-0.021	-0.017	-0.019
32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.016	0.013	0.011	0.014	0.011	0.012
33	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	-0.003	0.018	0.010	0.001	-0.002	-0.001
34	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001	-0.004	-0.013	0.012	0.001	-0.003	-0.001
35	-0.003	-0.002	-0.004	-0.005	-0.005	-0.006	-0.008	0.000	0.001	0.000	0.022	0.009	-0.003	<u>-0.062</u>	-0.029	-0.009	-0.017	-0.023
36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.015	0.006	-0.002	-0.005	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003
37	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	-0.023	<u>-0.085</u>	0.014	0.017	0.011	-0.006	-0.003	-0.004
38	0.005	0.005	0.009	0.012	0.013	0.018	0.016	-0.005	-0.002	-0.001	0.000	-0.003	0.015	0.002	0.009	0.013	0.015	0.014
39	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.007	0.003	-0.006	0.009	0.024	-0.029	-0.007	-0.017
40	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	-0.005	-0.002	0.005	0.017	-0.016	-0.001	0.003	0.001
41	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.002	0.006	<u>-0.032</u>	-0.019	-0.002	0.004	0.001
42	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	-0.003	0.002	0.007	0.023	0.000	0.010
43	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.004	0.007	0.019	-0.009	<u>0.089</u>
44	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.004	0.007	0.018	-0.008	<u>-0.066</u>
45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.001	0.003	-0.002	-0.007	-0.025	0.000	-0.012
46	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007	-0.005	-0.004	-0.004	0.017	0.007

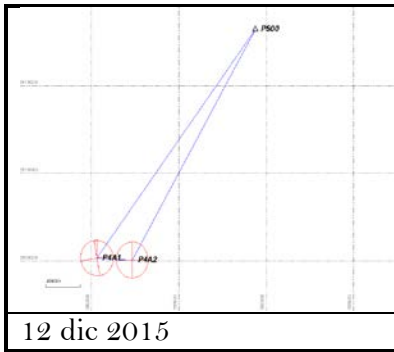
7.3.Anexo (Figuras de Ajuste GPS de Campañas 2014, 2015 y 2016)

• Calculo y Ajuste de Procesos 2014



• Calculo y Ajuste de Procesos 2015





• Calculo y Ajuste de Procesos 2016		
25 jun 2016	26 jun 2016	27 jun 2016
28 jun 2016	29 jun 2016	30 jun 2016
01 jul 2016		

7.4. *Script* para Matlab

Referente al proceso de ajuste de observaciones gravimétricas.

7.4.1. Script 1 (Startup.m)

```
clear all;  
clc;  
run Excel.m;  
run Matriz_C_pesos;  
run DesvEst.m;  
run Print.m;  
clear vars;
```

7.4.2. Script 2 (Excel.m)

```
% Leer matriz de diseño A  
clc;  
clearvars;  
prompt = 'Cual es el nombre del archivo excel? '  
filename = input(prompt,'s');  
%filename = '2015.xlsx';  
sheet = 1;  
sheet2=2;  
xlR1 = 'C3:T48';  
a = xlsread(filename,sheet,xlR1);  
[m,n]=size(a);  
gl=m-n;  
%Leer matriz de diseño L  
xlR2 = 'C2:C47';  
L = xlsread(filename,sheet2,xlR2);  
%Leer datos de pesos del sistema  
xlR3 = 'e2:e47';  
pe = xlsread(filename,sheet2,xlR3);  
%Variables para imprimir  
xlR4 = 'b2:b47';  
obs = xlsread(filename,sheet2,xlR4);  
%Matriz de Pesos normalizada 1/DE  
xlR5 = 'e2:e47';  
pe = xlsread(filename,sheet2,xlR5);  
%Nombre de parametros de incognitas  
[num,txt,row] = xlsread(filename,sheet,'c2:z200');  
%Concatenar datos de terminos independientes  
T1=[obs,L,pe];
```

7.4.3. Script 3 (Matriz_C_pesos)

```
%Antes de iniciar el algoritmo se tiene que crear las variables de acuerdo
```

```

%a Wolf and Ghilani, 1995.
%de matriz de diseño "a"
%de terminos independientes "L"
%Matriz de pesos "pe" normalizados de (1/Dev.std).
%Nota: importante respetar minúsculas y mayúsculas para las variables.
%Calculos para redes por minimos cuadrados
%AX=L+V
clc
%Ecuaciones para la solución por minimos cuadrados
%Matriz de pesos convertida en diagonal
p=diag(pe);
% Calculo de la matriz de cofactor de X
Qx=inv(a'*p*a);
d2=(a'*p*L);
%Resultados
X=Qx*d2;
V=a*X-L;
VT_P_V=V'*p*V;
%Calculo de Cofactores%
Inv_p=inv(p);
Qv=Inv_p-(a*Qx*a');
%Desviación estandar a posteriori entre el numero de grados de libertad
sig2_post=VT_P_V/gl;
%Matriz de covarianza de los residuales
COVv=sig2_post*Qv;
COVv_sqrt=sqrt(diag(COVv,0));
%Redundancia parcial ri
R=(1/sig2_post)*(COVv*p);
ri=diag(R,0);
%Parametro de Baarda
%wi=inv(V2)*COVv_diag;
%fiabilidad interna
%Fiab_int=4.12/(sqrt(ri));
format long;
%Presentación de resultados
disp("PROGRAMA PARA AJUSTE DE REDES GRAVIMETRICAS");
disp("AUTOR: ING PEDRO SALAS CONTRERAS");
disp('_____')
disp('Los valores de gravedad para las incognitas X en la variable "X2");
%disp('Los valores de residuales es V'PV');
%disp(VT_P_V);
%disp('Los valores de sigma posteriori');
%disp(sig2_post);
%disp(bar(V2));%
bar(V);

```

```
%Resultados en graficos
%subplot(2,2,1),bar(V),title ('Residual');
%subplot(2,2,2),histogram(V),title ('Histograma del Residual');
%subplot(2,2,3),plot(ri),title ('Redundancias');
%subplot(2,2,4),bar(X),title ('Incognitas');
```

7.4.4. Script 4 (DesvEst.m)

```
%Estadisticos
%diagonal de la matriz cofactor Qx
Qx_diag=diag(Qx);
%Varianza a posteriori V_Post
V_Post=VT_P_V/gl;
%Display de resultados de varianza y desv STD
fs='La Varianza a Posteriori es: %1.9f\n';
fprintf(fs,V_Post);
D_E=sqrt(V_Post);
fs1='La Desviación Estandar es: %1.6f\n';
fprintf(fs1,D_E);
disp(' ');
disp('Los grados del libertad son');
disp(gl);
format longG
%Desviacion STD de cada variable
Sii=(sqrt(diag(Qx))*D_E);
disp(' ');
disp(' ');
%Resultados
n1=(1:n)';
T2=[n1,X,Sii];
```

7.4.5. Script 5 (Print.m)

```
%Datos de Salida
fi= fopen('Result-Ajuste.txt','w');
%Encabezados
fprintf(fi,'%1s\r\n','Programa realizado por Ing. Pedro Salas Contreras');
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____RESULTADOS_____');
fprintf(fi,'%1s\r\n','El archivo procesado es', filename);
%Matriz a (Diseño)
%Encabezados de matriz de diseño
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____');
fprintf(fi,'%1s\r\n','Matriz A');
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____');
fprintf(fi,[_repmat('%2.0f\t', 1, size(a, 2)) '\n'], a);
```

```

%Matriz observable, L y pesos
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____');
fprintf(fi,'%7s %7s %12s\n','obs','L','Pesos');
fprintf(fi,'%1s\r\n','.....');
fprintf(fi,['repmat('%8.3f\t', 1, size(T1, 2)) '\n'], T1');
%fprintf(fi,'%2.0c %4.3f\r\n',X);
fprintf(fi,'%1s\r\n','.....');
fprintf(fi,'%1s\r\n','');
fprintf(fi,'%1s\r\n','');
fprintf(fi,'%1s\r\n','Resultados del Ajuste');
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____');
fprintf(fi,'%1s\r\n','_____');
fprintf(fi,'%1s %7s %13s\n','Estación','X','Desv-Std');
fprintf(fi,['repmat('%#8.5f\t', 1, size(T2, 2)) '\n'], T2');
%Variables estadisticas
fprintf(fi,'%1s\r\n','.....');
format longG
fprintf(fi,'La varianza a posteriori es: %8.6f\n',V_Post);
fprintf(fi,'La desviacion estandard es: %9.6f\n',D_E);
fclose(fi);

```