



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“ESTUDIO GRAVIMÉTRICO DEL VALLE
DE SAN JOSE DE GUAYMAS”

TESIS

Para obtener el grado de:
Geólogo

Presenta:

ANAID FRAGOSO IRINEO



Hermosillo, Sonora, México

Febrero de 2011

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10

FAX 259 21 11

10 de febrero, 2011

M.C. SAUL HERRERA URBINA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
Presente.-

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**"ESTUDIO GRAVIMETRICO DEL VALLE DE
SAN JOSE DE GUAYMAS"**

Esto es con el fin de que la alumna: **Anaid Fragoso Irineo**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"

DRA. SILVIA MARTINEZ RETAMA
DIRECTOR DE TESIS



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

C.c.p. Interesada.
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10

FAX 259 21 11

11 de febrero, 2011

DRA. SILVIA MARTINEZ RETAMA
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E .-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

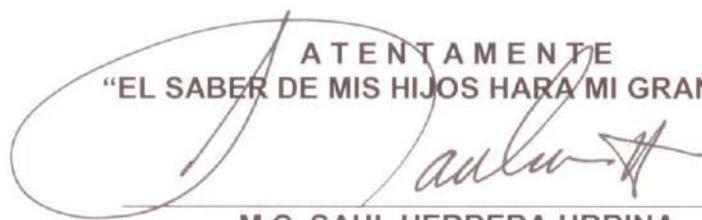
**"ESTUDIO GRAVIMETRICO DEL VALLE DE
SAN JOSE DE GUAYMAS"**

Esto es con el fin de que la alumna **ANAID FRAGOSO IRINEO** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

M.I. EVA LOURDES VEGA GRANILLO
GEOL. MARIANO MORALES MONTAÑO
DRA. SILVIA MARTINEZ RETAMA

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL

Sin otro en particular, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

M.C. SAUL HERRERA URBINA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

C.c.p. Archivo.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10

FAX 259 21 11

NOMBRE DE LA TESIS:

"ESTUDIO GRAVIMETRICO DEL VALLE DE SAN JOSE DE GUAYMAS"

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

ANAID FRAGOSO IRINEO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

M.I. EVA LOURDES VEGA GRANILLO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

GEOL. MARIANO MORALES MONTAÑO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

DRA. SILVIA MARTINEZ RETAMA

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"

M.C. SAUL HERRERA URBINA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA.

C.c.p. Archivo.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

**A mi nana Mague
y a mi abuela Coyito
por su gran amor cariño.**

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis es un esfuerzo donde participaron varias personas directa o indirectamente, acompañándome en todo momento, fundamental para la realización de este proyecto.

Quiero agradecer a la Universidad de Sonora, por la formación recibida, en especial al Departamento de Geología por su aceptación, apoyo y educación brindada durante mi carrera y elaboración de la presente.

Agradezco a la Dra. Silvia Martínez Retama por haber confiado en mi persona, por la paciencia, ánimo y por la dirección de este trabajo. A la M.I. Lourdes Vega Granillo por los consejos y el apoyo que me brindó en el trascurso de mi formación profesional y tesis. Al Geol. Mariano Morales, por su colaboración y atención.

Al M.C. Juan Manuel Espinoza Cardeña y al Dr. Juan García Abdeslem del CICESE por sus consejos, y correcciones que fueron de gran ayuda en la elaboración de esta tesis.

Por su gran colaboración desinteresada en la elaboración de esta Tesis al Ing. Guillermo Ohlmaier y por haberme acompañado en mis salidas a campo. A la Ing. Santa Barrera por todo el tiempo que me ha dado, por sus sugerencias e ideas de gran provecho, sobre todo por su respaldo y amistad. Al igual a Abisaid Villalobos y Marcos Salguero por su cooperación en la elaboración de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de carrera: Cinndy, Erika, Ivonne, Ramón, Tadeo, Fabián, Bruno y Ramsés, por todos los momentos que pasamos, su apoyo que siempre me brindaron y su amistad.

A mi Familia, especialmente a mis padres, Fausto Fragoso y Verónica Irineo por su amor, confianza y sacrificios, esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional. A mi hermana, Verónica por la alegría que siempre me brinda.

Ana María Izaguirre por su amistad, cariño de siempre y su optimismo brindado en todo momento. A Edgardo León por su comprensión, amor y complicidad, pero sobre todo por compartir conmigo los mejores recuerdos.

ÍNDICE

	Página
Resumen	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Localización	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivo	3
1.5. Metodología	3
2. GEOLOGÍA	5
2.1. Marco Tectónico	5
2.1.1. Batolito Laramídico	6
2.1.2. Volcanismo Eoceno-Oligoceno e Interrupción de la Subducción.	6
2.1.3. Basin and Range	7
2.1.4. Proto-golfo y Apertura del Golfo de California	7
2.2. Geología Superficial	9
2.2.1. Mesozoico	11
2.2.1.1. Unidad Metasedimentaria	11
2.2.1.2. Unidad Granodiorítica	12
2.2.2. Terciario	12
2.2.2.1. Unidad Volcánica Básica-Intermedia	13
2.2.2.2. Domos Dacíticos	13
2.2.2.3. Unidad Volcano-Félsica	14
2.2.2.4. Intrusivo Hipabísal	16
2.2.2.5. Unidad Volcano-Sedimentaria de Lahares	17
2.2.2.6. Unidad Volcánica Basáltica	17
2.2.2.7. Conglomerado Báucarit	18
2.2.3. Cuaternario	18
2.2.3.1. Sedimentos	18
2.3. Geohidrología	19

ÍNDICE

	Página
3. MÉTODO GRAVIMÉTRICO	21
3.1. Fundamentos (Ley de Newton y unidades)	21
3.2. Campo Gravitacional de la Tierra	22
3.3. Medición de la Gravedad	22
3.4. Reducción de Datos	24
3.4.1. Corrección por Latitud	24
3.4.2. Corrección por Altitud	25
3.4.3. Corrección por Tiempo	29
3.4.4. Anomalía de Bouguer	29
3.5. Separación de Regional y Residual	30
3.6. Estimación de Profundidad	31
3.6.1. Estimación de Profundidad con Losa de Bouguer	31
3.6.2. Método de Talwani	32
4. GRAVIMETRÍA DEL VALLE DE GUAYMAS	34
4.1. Adquisición de Datos	34
4.2. Reducción de Datos	38
4.3. Anomalía de Bouguer	41
4.4. Separación de Regional y Residual	42
4.4.1. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Primer Grado	44
4.4.2. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Segundo Grado	45
4.4.3. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Tercer Grado	46
5. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA – GEOFÍSICA	47
5.1. Método de Losa de Bouguer	47
5.1.1. Perfiles	47
5.2. Modelación	52
5.2.1. Método de Talwani	53
5.3. Configuración del Basamento	58
6. CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	63
APENDICES	70

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
Fig. 1.1	Localización del área de estudio en el Valle de San José de Guaymas.	2
Fig. 2.1	a) Subducción de la Placa Oceánica del Pacífico en la Placa de Norteamérica (Formación Batolito Laramide), b) Volcanismo Eoceno-Mioceno, c) Interrupción de la subducción e inicio del evento Basin and Range, d) Protogolfo, y e) Apertura del Golfo de California. (Dibujo de <i>Brad Riney</i>).	5
Fig. 2.2	Geología del área sur y occidental del Valle de San José de Guaymas (Vega <i>et al.</i> , 2004).	9
Fig. 2.3	Geología del área de estudio (SGM, 2000).	10
Fig. 2.4	Ubicación e hidrografía de la Subcuenca del Arroyo Guaymas (Vega <i>et al.</i> , 2005).	20
Fig. 3.1	Fuerza de atracción de la Tierra sobre la Luna.	22
Fig. 3.2	Medición de caída libre de un cuerpo (Boyd).	23
Fig. 3.3	Gravímetro de resorte o torsión (Boyd).	23
Fig. 3.4	Variaciones de la dirección de la fuerza de: a) Fuerza de Gravedad, b) Fuerza centrífuga producida por la rotación de la Tierra. Fuerza centrífuga producida por la rotación de la Tierra (Boyd).	25
Fig. 3.5	Esquema de Geoide y Elipsoide, tomado de (INEGI).	25
Fig. 3.6	Figura para explicar las diferentes correcciones de Altitud (modificado de Cantos, 1974).	26
Fig. 3.7	Losa infinita usada para corregir el exceso de masa bajo el punto <i>B</i> (Burger, 1992).	27
Fig. 3.8	Un ejemplo de corrección de terreno requiere un región <i>x</i> y <i>y</i> debido a la natural simplicidad de la corrección de Bouguer aplicada en el punto <i>B</i> (Burger, 1992).	28

LISTA DE FIGURAS

(Continuación)

Figura		Página
Fig. 3.9	Plantilla de Hammer (Burger, 1992).	28
Fig. 3.10	Ejemplo de Anomalías Regional y Residual (modificado de Kearey, 2002).	30
Fig. 3.11	Paraboloide.	31
Fig. 3.12	Sección con polígono de n-lados (Telford, 1976).	33
Fig. 4. 1	Localización de perfiles gravimétricos, de las estaciones geofísicas y de algunos pozos sobre un mapa topográfico de (INEGI).	34
Fig. 4. 2	Estación Base ubicada en el área de descanso El Valiente.	35
Fig. 4. 3	Gravímetro Scintrex CG-5.	36
Fig. 4. 4	Gráficas de la Gravedad Observada en los perfiles realizados en el Valle de San José de Guaymas.	37
Fig. 4. 5	Mapa de Gravedad Observada del Valle de San José de Guaymas.	38
Fig. 4. 6	Gráficas de Anomalía de Bouguer de los perfiles realizados en el Valle de San José de Guaymas.	41
Fig. 4. 7	Mapa de Anomalía de Bouguer.	42
Fig. 4. 8	Gráficas de la Anomalía de Bouguer, regional y residual.	43
Fig. 4. 9	Separación del regional – residual por ajuste polinomial de primer grado. a) Regional, b) Residual resultante.	44
Fig. 4. 10	Separación del regional – residual por ajuste polinomial de segundo grado. a) Regional, b) Residual resultante.	45
Fig. 4. 11	Separación del regional – residual por ajuste polinomial de tercer grado. a) Regional, b) Residual resultante.	46
Fig. 5.1	Mapa Geológico donde se muestra los perfiles realizados.	47

LISTA DE FIGURAS

(Continuación)

Figura		Página
Fig. 5.2	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 1.	48
Fig. 5.3	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 2.	49
Fig. 5.4	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 3.	50
Fig. 5.5	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 4.	51
Fig. 5.6	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 6.	51
Fig. 5.7	Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 7.	52
Fig. 5.8	Mapa de la anomalía residual y ubicación de los perfiles.	53
Fig. 5.9	Perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido.	55
Fig. 5.10	Perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido.	55
Fig. 5.11	Perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido.	56
Fig. 5.12	Perfil 4. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido.	57
Fig. 5.13	Perfil 6. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido.	58
Fig. 5.14	Mapa de profundidad del basamento del Valle de San José de Guaymas (m).	59
Fig. 5.15	Configuración en 3D de la profundidad del basamento del Valle de San José de Guaymas (m).	60

RESUMEN

El Valle de San José de Guaymas se ubica dentro del municipio de Guaymas, en el estado de Sonora, México y comprende un área de 1214.27 km². Pertenece a la Cuenca del Río Mátape y tiene como afluentes a los ríos San José y Las Tinajas, los cuales desembocan en el estero El Rancho. El valle se encuentra dentro de una región con condiciones climáticas hostiles; es semiárido, con altas temperaturas y escasa precipitación, por lo cual, en las últimas décadas, se han tenido problemas de abastecimiento de agua.

Este trabajo es parte de un estudio geohidrológico, en donde se pretende definir el modelo conceptual del acuífero y obtener su caracterización geoelectrica. Para tal efecto se realizó un estudio gravimétrico y un estudio de transitorio electromagnético. El objetivo de este estudio gravimétrico es determinar la morfología y profundidad del basamento, así como el espesor de las capas sedimentarias y de relleno.

El Valle de San José de Guaymas se encuentra delimitado al Norte por la sierra La Tinaja del Carmen, al Este por la sierra Santa Úrsula, al Oeste por la sierra El Aguaje y al Sur por el cerro del Vigía y el estero del Soldado. El valle tiene una orientación NW-SE, correlacionada a la dirección de apertura del Golfo de California. La morfología del valle se debe principalmente a derrames ocurridos durante la fase tectónica del “Basin and Range”, iniciando con derrames basálticos y andesíticos, que posteriormente evolucionaron a un volcanismo félsico (riolitas y tobas). Después se produce la fase tectónica de la apertura del Golfo de California, dando origen con esto al Valle de San José de Guaymas, el cual consiste de un relleno sedimentario conformado por gravas, arenas y arcillas. También se encuentran algunos afloramientos de granodioritas con colgantes de metasedimentarias.

El levantamiento gravimétrico consistió en la elaboración de 6 perfiles sobre la cuenca, 4 en dirección E-W, uno N-S y otro NW-SE. Se utilizó un Gravímetro CG-5 marca SCINTREX, con el cual se registraron 173 estaciones con separación entre ellas de 500 m. aproximadamente. La separación media entre los perfiles fue de 6 km.

Los perfiles de gravedad observada fueron corregidos por elevación, Bouguer, latitud, deriva y topografía y se procesaron en el programa Excel. Con estos datos se elaboró una malla que corresponde a la anomalía de Bouguer, la cual tiene un rango de -6.26 a 28.76 mGal. Los datos se importaron al programa WinG Link, donde se determinó el regional mediante un ajuste polinomial de segundo grado. A partir del residual obtenido, se modelaron distintos perfiles utilizando el mismo programa. En el proceso de modelación se consideraron dos medios, el basamento representado con una densidad de 2.67 gr/cm^3 y el relleno sedimentario con 2.2 gr/cm^3 . Finalmente se realizó la configuración de las profundidades al basamento. Esta configuración muestra la presencia de un graben formado por dos cuencas orientadas NW-SE, similar a las cuencas pull apart en una zona de rift distensional, con una profundidad máxima promedio de 850 m.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Valle de San José de Guaymas, localizado al Norte de la cabecera municipal del Puerto de Guaymas, tiene como actividades económicas la agrícola y ganadera, de las cuales, la actividad agrícola es la que presenta mayor gasto de agua. En las últimas décadas, esta región ha venido presentando un problema de abastecimiento de agua, a consecuencia de su sobreexplotación y su lenta recarga debido al clima hostil (temperatura alta y escasa lluvia). En busca de una solución a estos problemas se han venido realizando diversos estudios geológicos, geofísicos y geohidrológicos en el área, desde las décadas pasadas.

Uno de los estudios más completos lo realizó TM1 (1975). En él se expone que desde estudios realizados en 1968, se apreciaba una sobreexplotación de agua, ya que el nivel del agua en los pozos estaba bajo el nivel del mar y para el año de 1975, ya se encontraba a 3 m bajo el nivel del mar. Se menciona también la presencia de intrusión salina, principalmente en la parte sur del área. Ahí se observaron 4,000 ppm de sólidos totales disueltos, en espesores de 25 a 30 m. A mayor profundidad se observó una mejor calidad de agua. Respecto al balance, estimaron una extracción del orden de 15 millones $m^3/año$, y una recarga anual de 7 millones de $m^3/año$, con un descenso progresivo en el nivel del agua potable en los pozos y un aumento de la intrusión salina.

Vega *et al.* (2004), realizaron un estudio de geología urbana, donde se definen los rasgos geológicos, hidrológicos, procesos costeros y riesgos costeros de la región de Guaymas y San Carlos. También realizaron un estudio Piezométrico donde determinaron un fuerte abatimiento en la región de San José de Guaymas.

Martínez (2007) aplicó el método geofísico de sondeos electromagnéticos transitorios (TEM) en una parte del Valle de Guaymas para estimar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. La zona estudiada comprendió una franja costera que cubre un área de 17 x 36 km. El modelo de unidades hidrogeológicas propuesto en su trabajo y basado en la interpretación de los sondeos TEM, indica la presencia de una capa

arcillosa denominada “Arcilla Azul” (con espesor máximo de 260 m) que se para al acuífero superior (espesor promedio de 100 m) del inferior. La capa arcillosa se adelgaza hacia el Norte hasta desaparecer. Sin embargo, al parecer, este comportamiento es diferente en el acuífero de San José de Guaymas, ya que según reportó TMI (1975), esta capa arcillosa es delgada, con un espesor medio de 20 m.

1.2. Localización

El Valle de San José de Guaymas se encuentra dentro del municipio de Guaymas, en el estado de Sonora, México. Está ubicado en las coordenadas 27.95° a 28.25° Norte y 110.8° a 111.125° Este, con un área aproximada de 1,214.27 km², correspondiente a la Cuenca del Río Mátape. Sus afluentes son los ríos San José y Las Tinajas, desembocando en el estero El Rancho (Figura 1.1).

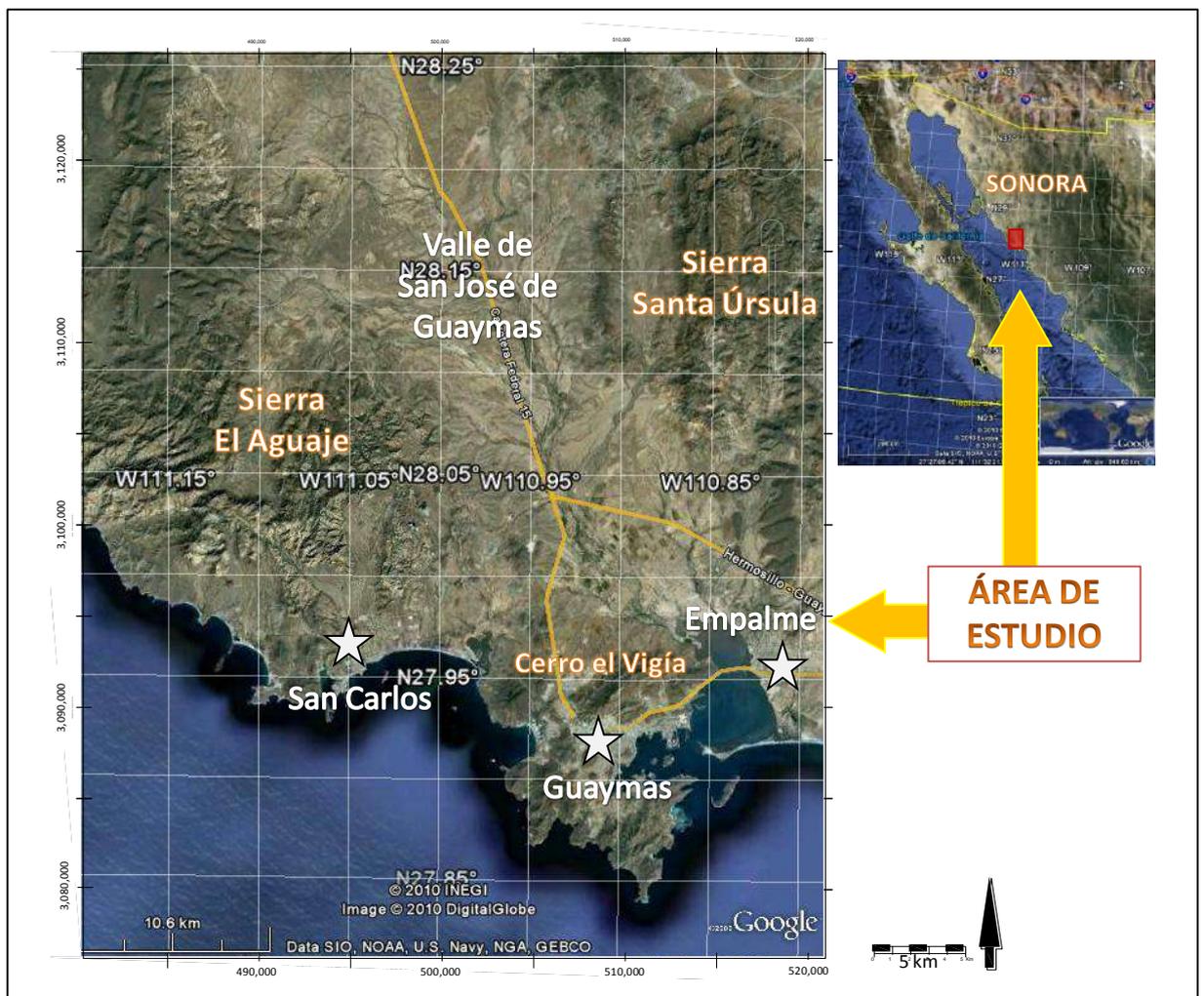


Fig.1. 1 Localización del área de estudio en el Valle de San José de Guaymas

El valle está ubicado en la Provincia Fisiográfica “Llanura Sonorense”, en la subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses (INEGI). La subcuenca del arroyo de San José de Guaymas, se encuentra limitada al Norte, por la Sierra Tinaja del Carmen; al Oeste, por la Sierra El Aguaje, al Este por la Sierra Santa Úrsula y al Sur por el Cerro El Vigía y por el Estero El Rancho (Golfo de California).

La Morfología de la cuenca se representa en relieves topográficos de pendientes fuertes sin llegar a abruptas, como la cuenca del Valle de Guaymas. El drenaje del Arroyo de San José de Guaymas es dendrítico, siendo su principal afluente el Arroyo del Tigre, el cual confluye al de San José de Guaymas, a la altura del rancho “El Valiente”, donde se unen para formar un solo arroyo hasta desembocar en el Estero el Soldado.

1.3. Justificación

Varios trabajos se han realizado en la región, principalmente en el Valle de Guaymas (al Este de la Sierra Santa Úrsula), sin embargo, en el Valle de San José de Guaymas (al Oeste de dicha sierra) son escasos y los que existen, no están actualizados. De los estudios geofísicos anteriores, solamente se han realizado sondeos geoelectrónicos en el área de estudio. Por lo tanto, el estudio gravimétrico aportará información muy valiosa para determinar la morfología del basamento, y ayudará a conocer las capas y composición del relleno sedimentario.

1.4. Objetivo

El objetivo de este estudio gravimétrico es determinar la morfología y profundidad del basamento, así como el espesor de las capas sedimentarias y de relleno.

1.5. Metodología

Las distintas etapas utilizadas en la elaboración de esta tesis consistieron en recopilación bibliográfica, levantamiento gravimétrico (adquisición de datos), procesamiento, modelación e interpretación de datos.

En el capítulo 2 se presenta un resumen de la geología y geohidrología del área. En el capítulo 3 se describen los fundamentos teóricos del método gravimétrico así como los procedimientos de reducción y procesamiento de datos. El capítulo 4 describe la metodología utilizada en este estudio para realizar el levantamiento gravimétrico, la reducción y procesamiento de datos. La interpretación y las conclusiones se presentan en los capítulos 5 y 6. Al final se presentan la bibliografía y los anexos del trabajo.

2. GEOLOGÍA

2.1. Marco Tectónico

En el Noroeste de México (Sonora y Baja California) han ocurrido distintos eventos tectónicos a lo largo de su evolución geológica, tales como subducción y extensión, que finalmente son los responsables de la gran diversidad volcánica y geomorfológica de la región de estudio. En general se puede hablar de distintas etapas tectónicas como se presenta a continuación en la figura 2.1.

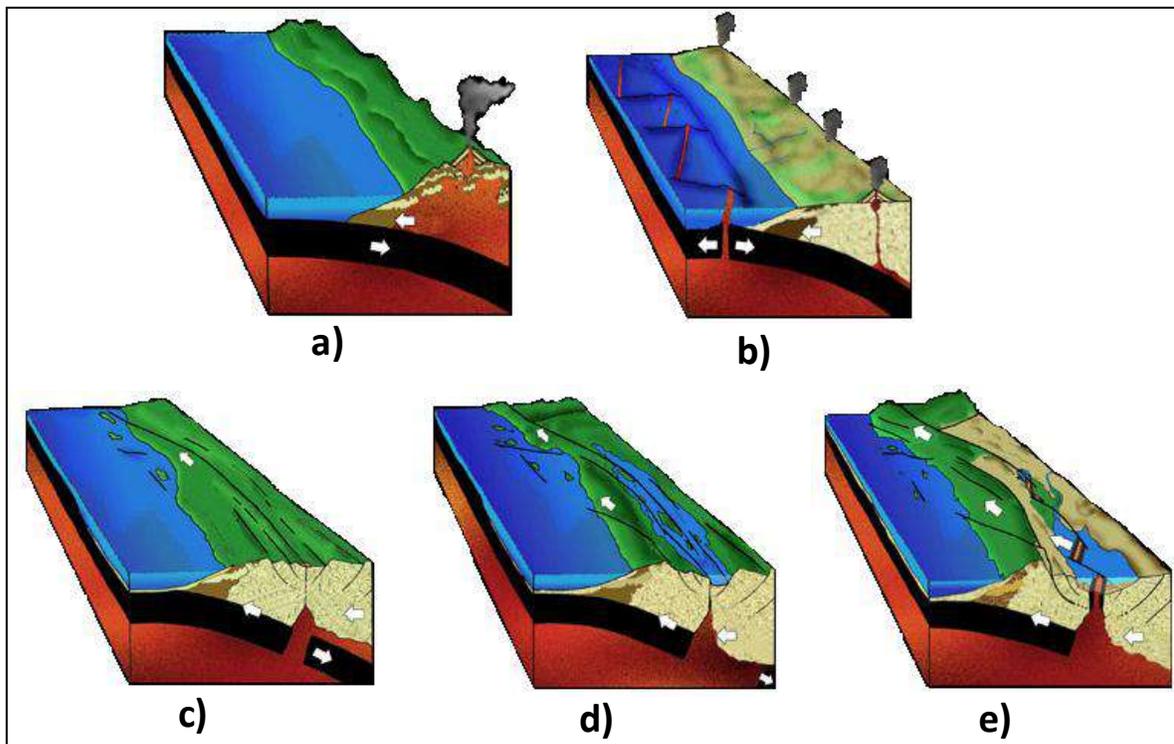


Fig. 2. 1 a) Subducción de la Placa Oceánica del Pacífico en la Placa de Norteamérica (Formación Batolito Laramide), b) Volcanismo Eoceno-Mioceno, c) Interrupción de la subducción e inicio del evento Basin and Range, d) Proto-golfo, y e) Apertura del Golfo de California. (Dibujo de Brad Riney).

2.1.1. Batolito Laramídico

La primera fase ocurrió entre 90 y 40 Ma en el estado de Sonora con el emplazamiento del Batolito Laramide (Damon, 1978; Damon *et al.*, 1981; Cochemé, 1985). Esta intrusión magmática se asocia a la subducción de la placa oceánica Farallón respecto a la de Norteamérica (Hamilton, 1969; Dickinson 1979). Durante este evento se emitieron otras rocas volcánicas, que afloran en las inmediaciones de la Sierra Madre Occidental, definidas como Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1946), Complejo Volcánico Inferior (McDowell y Claubauh, 1979) o Complejo Base (Cochemé, 1985). Esta unidad se compone de andesitas, con algunas intercalaciones de rocas ácidas; presenta plegamientos y metamorfismo dentro de la facies albita-epidota. En el estado de Sonora se encuentra en la parte central con espesores de hasta 300 m (Amaya *et al.*, 1994).

2.1.2. Volcanismo Eoceno-Oligoceno e Interrupción de la Subducción.

Después de esta etapa se tiene un gran periodo de volcanismo en Sonora (Eoceno-Oligoceno), que se representa en Chihuahua, con el depósito del Conglomerado Novosaigame (Bockhoven, 1980; Cochemé, 1985; Cochemé and Demant, 1991), seguido de una secuencia andesítica y posteriormente de manera discordante varias coladas de riolita con presencia de ignimbritas. A esta unidad McDowell y Clabaugh (1979) la definieron como Complejo Volcánico Superior con una edad de 34 y 27 Ma, dentro de los límites de Durango y Sinaloa. Cochemé (1985), describe a esta unidad en Tecoripa en el estado de Sonora, con un espesor de 300 m, como parte del cinturón continuo más grande de ignimbritas en el mundo, en la Sierra Madre Occidental.

El fin de la subducción ocurrió hace aproximadamente 25 Ma (Oligoceno-Mioceno), debido al encuentro del rift del Este del Pacífico y la Placa de Norteamérica. Según modelos, al interrumpirse la subducción se produjo el hundimiento de la litósfera (Dickinson, 1989; Spencer y Reynolds, 1989) causando un influjo térmico a lo largo de Sonora y California. Proceso que provocó el movimiento de fallas de bajo ángulo asociado a fallas lístricas secundarias, dando lugar a un cinturón de domos que afloran en una zona

de cizalla dúctil, conocidos como Núcleos Metamórficos Complejos, reconocidos en las zonas de Mazatán y Magdalena (Nourse *et al.*, 1994; Vega, 1996).

Hacia los 20 Ma se formó el episodio magmático Miocénico de la región de la Sierra Madre Occidental, causado por el influjo térmico que produjo un adelgazamiento en la corteza (Cochemé, 1985). Este evento se caracteriza por un volcanismo bimodal representado por intercalaciones de andesitas y tobas pumíceas ácidas, que pueden alcanzar hasta los 800 m de espesor en la región de San Carlos-Guaymas y Santa Úrsula, correspondientes a los principales relieves que se encuentran en el área de estudio de este trabajo.

2.1.3. Basin and Range

Posterior a esto continuó una fase tectónica distensiva denominada “Basin and Range”, que se distingue por la formación de sierras y Valles paralelos orientados normalmente con una dirección de NW 20° con Valles más estrechos hacia la Sierra Madre Occidental y más gruesos hacia el Golfo de California. Según Elston (1976) esta distensión inició hace 18 ± 3 Ma en Arizona, mientras que para Cochemé (1985) inició hace unos 17 Ma (Mioceno inferior) en Yécora, también la fecha con edades de ± 10 Ma (Zoback *et al.*, 1981, en Radelli, 2005).

2.1.4. Proto-golfo y apertura del Golfo de California

Durante esta fase ocurrieron fallas que causaron la ruptura e inclinación de las unidades volcánicas del Mioceno, presentando fallas con rumbo NE 20° y NW 20°. En esta etapa, Baja California y Sonora se encontraban unidas, sin embargo, se infiere que entre 15 y 5 Ma existió una depresión nombrada como Proto-golfo de California. Esto se define a partir de la existencia de sedimentos marinos en varias localidades, asociados al desarrollo de un rift de tipo continental (Ingle, 1973).

Recientemente se han realizado diversos trabajos que involucran el establecimiento de un evento volcánico de gran magnitud durante el Mioceno medio en el NW de México. Este

evento se asocia con el rift del Proto-golfo de California, el cual ha sido atribuido a la ruptura continental y al adelgazamiento litosférico de un rift hacia los 12 Ma. En este tiempo, ya había cesado el volcanismo del arco continental, dando origen a un gran depósito ignimbrítico hiperalcalino reconocido en Sonora y Baja California (Vidal-Solano, 2005; Stock *et al.*, 1999; Oskinet *al.*, 2001; Olguín-Villa, 2010). Los vestigios de este evento volcánico han sido identificados y estudiados en la región de estudio, específicamente en la Sierra San Antonio, Lista Blanca, El Bacatete y Cerro El Sarpullido (Vidal-Solano, 2005), así como en la Sierra Libre donde es posible apreciar un gran volumen de estas rocas hiperalcalinas conformado por varias manifestaciones riolíticas e ignimbríticas (Barrera-Guerrero y Vidal-Solano, 2010).

Para algunos autores la apertura del Golfo de California ocurre cuando cesa la subducción, y la dorsal del Este del Pacífico alcanza de manera oblicua el borde continental de la Placa de Norteamérica, originando una transición hacia un sistema de deslizamiento lateral y rifting, con edades que varían de los 4.5 Ma (Radelli, 2005), 14 Ma (Lylle y Ness, 1991) o incluso 17 Ma (Humphreys y Weldon, 1986). Este proceso distensivo generó la formación del Sistema de Fallas de San Andrés, causante del desplazamiento continuo hacia el NW de la Península de Baja California y parte de California, E.E.U.U., mismo que se compone de un conjunto de fallas escalonadas de desplazamiento lateral de tipo dextral.

En la región de Guaymas y San Carlos se exhiben las rocas volcánicas producto de la apertura del Golfo de California como es el caso de basaltos de afinidad toleítica que regionalmente se localizan en los bordes de Sonora y Baja California, así como en algunas islas y en el interior del Golfo de California.

2.2. Geología Superficial

La estratigrafía de la zona de estudio se encuentra conformada por rocas cuyas edades varían del Mesozoico hasta el Reciente. Las rocas sedimentarias del Cuaternario son las que se encuentran en abundancia principalmente en el valle, seguidas por grandes afloramientos de rocas volcánicas mayormente del Mioceno. Más escasamente, afloran rocas intrusivas y metamórficas. La geología del área de estudio se presenta en las figuras 2.2 y 2.3.

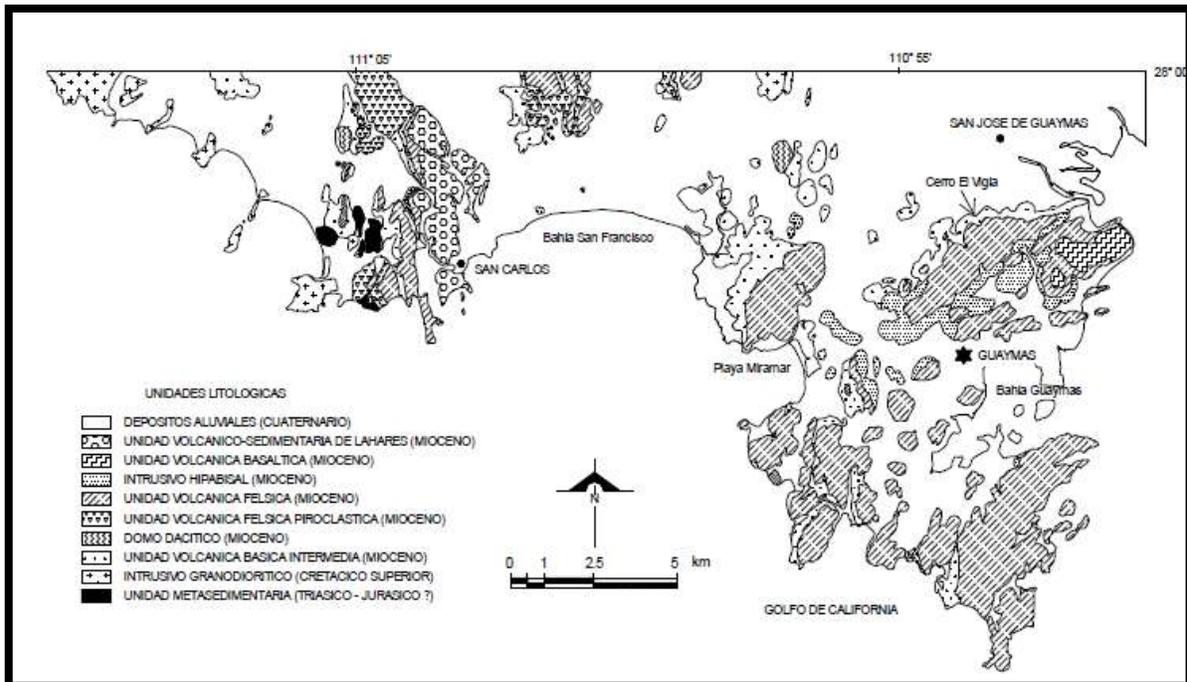


Fig. 2. 2 Geología del área sur y occidental del Valle de San José de Guaymas (Vega *et al.*, 2004).

VALLE DE SAN JOSÉ DE GUAYMAS

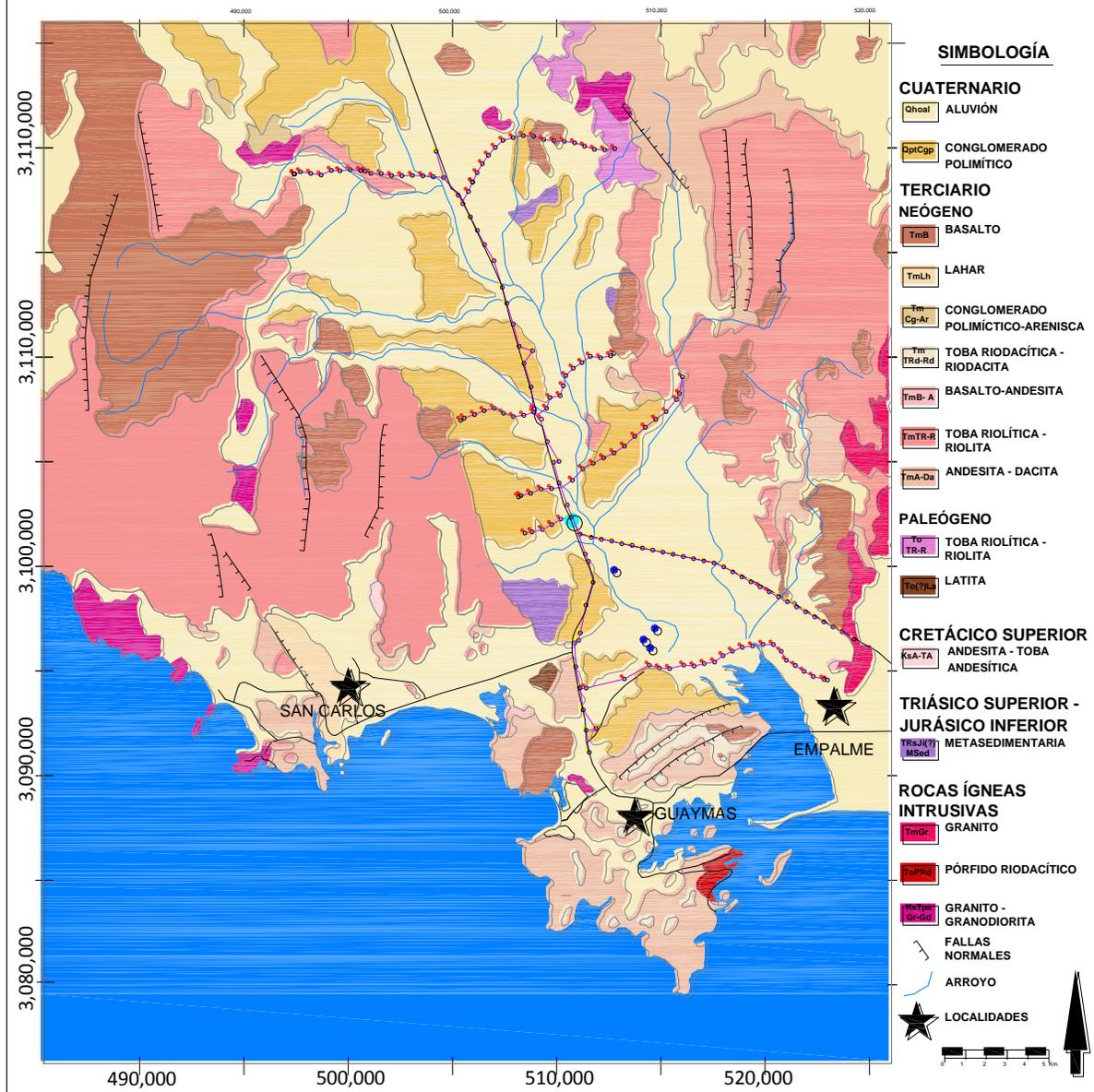


Fig. 2.3 Geología del área de estudio (SGM, 2000)

2.2.1. Mesozoico

Este periodo se representa predominantemente por rocas ígneas intrusivas, las cuales componen el basamento de la región al igual que algunas metamórficas dispuestas en techos colgantes.

2.2.1.1. Unidad Metasedimentaria

Las rocas metamórficas sólo afloran en los bordes de los cuerpos intrusivos en franjas no cartografiadas. Éstas fueron originadas por un metamorfismo de contacto, donde se pueden observar: metaconglomerados, cuarcitas, hornfels pelíticos, y hornfels calcosilicatados, a los cuales se les ha asignado una edad Triásico superior-Jurásico inferior (220-180 Ma) (Vega *et al.*, 2004). Se pueden apreciar al Norte del rancho Nápoles (Lomas Las Trincheras), al Oeste del Cerro La Espuela, y al Norte de la mina San Isidro.

Estas rocas se disponen sobre bloques de rocas graníticas limitadas por fallas, que exponen afloramientos de rocas metasedimentarias. Posteriormente, fueron erosionadas y cubiertas por secuencias volcánicas del Terciario y es posible observarlas en forma de lomeríos suaves con abundantes fallas y fracturas (Vega *et al.*, 2004).

Las edades de las rocas metasedimentarias son todavía inciertas, pues no se han encontrado fósiles que permitan una correlación estratigráfica. Se ha sugerido su correlación con sedimentos clásticos metamorfizados encontrados en la Isla del Tiburón (Sheridan *et al.*, 1979), cuya edad corresponde al Jurásico tardío (Gastil y Krummenacher, 1979). Debido a las características litológicas de esta unidad, se pueden correlacionar con sedimentos del Grupo Barranca (Mora, 1992). Esta unidad también ha sido asignada al Paleozoico tardío, entre el Ordovícico y el Pérmico. Se presenta con intercalaciones de calizas con arenisca y lentes de pedernal, que a su vez son correlacionadas con las que afloran en la Sierra Santa Teresa y en la región de Cobachi, donde se encuentran cubiertas discordantemente por rocas del Triásico Tardío (SGM, 2000).

2.2.1.2. Unidad Granodiorítica

Esta unidad está constituida por un intrusivo compuesto de granodiorita de hornblenda, y facies hipabisales porfídicas. La granodiorita es la causante del metamorfismo de contacto con la roca metasedimentaria, la cual es posible encontrarla como techo colgante. La granodiorita es cortada por diques andesíticos, aplíticos y pegmatíticos, los cuales también intrusionan a la roca metasedimentaria (Vega *et al.*, 2004).

La granodiorita de hornblenda ha sido fechada por análisis de K-Ar, dando una edad de 83 ± 2 y 81 ± 3 Ma correspondiente al Cretácico superior (K-Ar, McDowell y otros, en Mora, 1992). Esta edad permite correlacionarla al Batolito Laramide de Sonora, el cual se formó entre 90 y 40 Ma, del Cretácico superior al Eoceno (Cochemé, 1985; Damon *et al.*, 1983).

Los afloramientos de granodiorita se encuentran sobre la carretera internacional Hermosillo-Guaymas. Se distribuyen principalmente en las Lomas Trincheras, al Occidente de la carretera internacional, antes del entronque que va hacia San Carlos, y también los podemos encontrar al Norte del Cerro El Vigía y al Norte de la Sierra Santa Úrsula.

Al igual que las rocas metasedimentarias, estas rocas se encuentran intensamente falladas y divididas en bloques, que después fueron erosionados y cubiertos por rocas extrusivas, proceso que actualmente permite apreciar a los afloramientos de forma muy dispersa y cubriendo superficies reducidas.

2.2.2. Terciario

Este periodo se representa principalmente por rocas ígneas y sedimentarias localizadas en el área de estudio. Por lo que respecta a las rocas ígneas, son principalmente de tipo extrusivas, correspondientes a un evento volcánico que formó importantes sierras y cordilleras en la provincia de la Sierra Madre Occidental. Estas grandes estructuras están formadas de lavas ácidas y básicas con sus correspondientes emisiones de piroclásticos que cubren extensas superficies (TMI, 1975). Las rocas sedimentarias de este periodo, son

conglomerados de origen continental producto de la erosión de las rocas volcánicas preexistentes.

2.2.2.1. Unidad Volcánica Básica-Intermedia

Esta unidad extrusiva está representada por rocas que varían de basaltos a andesitas. Se encuentra aflorando en pequeñas aéreas dentro de la cuenca, principalmente en las faldas de pendiente baja a intermedia de los principales relieves de la región, como en el Cerro El Vigía, Sierra Santa Úrsula y al Norte de Empalme.

Las rocas andesíticas se componen de hornblenda y augita y se presentan de forma masiva con un gran contenido de fracturas. Estratigráficamente esta unidad volcánica se encuentra cubriendo en discordancia al basamento granítico y metamórfico ya mencionado, tal como se observa en los cerros Los Algodones en el área de San Carlos. En la parte basal de este conjunto, se encuentran coladas basálticas, dispuestas en delgados flujos de lava, de espesores métricos y en la parte media y alta cambian a basaltos andesíticos.

A esta unidad se le asigna una edad de 17 Ma (Mioceno inferior) y fue datada por Mora (1992). En la Sierra Santa Úrsula, al Norte de Empalme, se les asignó a las unidades La Espuela (22.7 ± 0.5 Ma) y El Mesquite, cinco diferentes edades comprendidas entre 18.8 ± 3.7 y 15.3 ± 2.4 Ma.

2.2.2.2. Domos Dacíticos

Estos cuerpos dómicos los podemos encontrar cortando la unidad anterior en el Cerro Los Pajaritos (Carta Guaymas, G 12-2). Cuando se ven en planta se observan como cuerpos esferoides con un diámetro aproximado de 500 m, con una morfología de pendiente suave de forma ovalada. Además se caracterizan por presentar xenolitos de granodiorita dentro de la matriz.

La edad de los domos dacíticos se desconoce, sólo se sabe que intrusionan a las rocas volcánicas básicas-intermedias, por lo tanto, estratigráficamente se consideran contemporáneos o ligeramente posteriores a los últimos flujos andesíticos (Vega *et al.*, 2004).

2.2.2.3. Unidad Volcano-Félsica

Las rocas volcánicas que podemos observar dentro de esta unidad son andesitas, riolitas con alternancia de tobas, y derrames basáltico-andesíticos. Las rocas de este grupo se encuentran cubriendo una gran superficie dentro de la cuenca, ubicadas principalmente en la cima, y están distribuidas de la siguiente manera: al Oriente en la Sierra Santa Úrsula, al Poniente en la Sierra El Aguaje y al Sur en el Cerro El Vigía.

Las rocas pertenecientes a este grupo muestran un sistema de fallas y fracturas, cuyo rumbo preferencial es Norte-Sur. Los planos de pseudoestratificación de los derrames están inclinados hacia el Valle de San José de Guaymas.

Las rocas que forman la base de la unidad corresponden a tobas con fragmentos de rocas volcánicas (andesitas, riolitas e ignimbritas). Hacia la cima del paquete de tobas, empiezan a intercalarse coladas de vidrio perlítico de color oscuro, a veces laminadas, que por recristalización pasan a riolitas laminadas con fuerte plegamiento de flujo (Vega *et al.*, 2004).

El espesor más considerable de las rocas piroclásticas se encuentra al Norte de la región de San Carlos, donde alcanzan aproximadamente 180 m y se adelgaza progresivamente hacia el Oriente y hacia el Sur. La roca piroclástica cubre en discordancia angular a las andesitas y basaltos de la unidad volcánica intermedia. Este paquete de tobas se encuentra siempre basculando hacia el oriente por una serie de fallas que normalmente producen semigrabens escalonados.

Al Occidente de la ciudad de Guaymas, en el Cerro de Bacochibampo, esta unidad está representada por flujos vítreos o vitrófidos sobre las andesitas de la Unidad Volcánica Básica Intermedia, la cual Johnpeer (1977) clasificó como riodacita. La textura y los xenolitos indican un proceso de contaminación del magma al llegar a la superficie, lo cual puede explicar la composición química en el rango de riodacita, cuando debería ser dacita o andesita (Johnpeer, 1977).

En los cerros que se encuentran alrededor la ciudad de Guaymas, como El Vigía, Lomas de Cortés y El Potrerito, se depositaron derrames dacíticos sobre los basaltos y andesita, con textura porfídica, que presentan laminaciones y pliegues de flujo. Sobre estos derrames hay tobas con fragmentos de diferentes rocas volcánicas, y sobre estas tobas hay un grueso derrame de vitrófidos con fenocristales de plagioclasas. Hacia arriba el vitrófido gradúa a una roca de la misma composición mineralógica, pero con la matriz recrystalizada y contiene numerosos microlitos de forma nebulosa, posiblemente de plagioclasas, feldespatos y cuarzo. Esta unidad contiene fragmentos de dacita con plagioclasas y clinopiroxenos, así como rocas más félsicas de origen intrusivo. La textura en criba de las plagioclasas y la presencia de feldespatos indican de igual manera un proceso de contaminación magmática durante su ascenso a través de las rocas basales correspondientes a dacitas y granófidos (Vega *et al.*, 2004).

El paquete superior es muy similar al paquete inferior, contiene partes vítreas en la base de los flujos y zonas con laminaciones. Este paquete es cortado por brechas explosivas que tienen el aspecto de tobas arenosas con alteraciones y que poseen clastos de las rocas encajonantes de más de un metro de longitud. Esta unidad es resistente a la erosión y forma los crestones más prominentes de los cerros que rodean y se sitúan dentro de la ciudad de Guaymas, como El Vigía, El Cabezón y San Rafael, entre otros. Las rocas descritas previamente fueron definidas por Johnpeer (1977) como Riodacitas Bacochibampo y como Toba Soldada del Cerro El Vigía.

Debido a su entorno regional, la edad de la unidad de rocas félsicas descritas anteriormente, se correlaciona con la unidad La Ventana y Santa Úrsula (Mora, 1992), las cuales están

conformadas por voluminosos flujos félsicos (perlíticos en la base), domo y tobas de flujo de cenizas. En esta unidad se obtuvieron cinco edades con el método isotópico K-Ar en plagioclasas, las cuales se ubican entre 12.3 ± 0.3 Ma y 11.4 ± 0.3 Ma, correspondiente al Mioceno Medio (Mora, 1992).

Este periodo volcánico félsico tuvo manifestaciones en distintas regiones, después de un periodo de quietud volcánica. En Guaymas fue principalmente fluidal con intrusiones hipabisales en la parte final. Debido a su génesis, estos depósitos presentan variantes en los espesores y sus relaciones estratigráficas no son constantes.

2.2.2.4. Intrusivo Hipabisal

Esta unidad está relacionada al volcanismo félsico de la región de Guaymas, que produjo la introducción de un cuerpo ígneo hipabisal. Aflora en el flanco sur del Cerro El Vigía, en los cerros ubicados al Noroeste de Lomas de Cortés y en el Cerro El Gandareño. En estas localidades descansa sobre las coladas basales de la unidad félsica, debajo de coladas rojizas y en el Cerro El Vigía presenta un espesor de al menos 160 m (Vega *et al.*, 2004).

En afloramiento, la roca presenta un color blanco característico, que varía a rosa en las partes más oxidadas y contiene numerosos enclaves de rocas volcánicas (andesitas). Presenta fracturas de enfriamiento subhorizontales y algunas verticales. Esta unidad se adelgaza hacia el Norte y sugiere que el emplazamiento de este cuerpo se da en espacios provocados por el colapso de unidades inferiores, a lo largo de una estructura semicircular que se puede observar en el Cerro El Vigía y hacia el Suroeste de éste, así como en Lomas de Cortés y en el Cerro El Potrerito. Esta estructura fue sugerida por Johnpeer (1976) como una posible caldera (Vega *et al.*, 2004).

También se observa un intrusivo hipabisal, reconocido como Granófido Ortiz, por Roldán *et al.* (2004), que aflora desde la costa del Golfo de California en las cercanías de Empalme hasta el Norte de Ortiz. El Granófido es correlacionado con el Granitoide El Papalote (Cochemé, 1981, 1985; Mora, 1992). En la región de Empalme el intrusivo sigue un rumbo

lineal y es probable que se emplace a favor de fallas normales con rumbo Norte-Sur (Mora 1992);intrusiona a la secuencia de dacitas y andesitas de la Sierra Santa Úrsula y se encuentra cubierto por tobas riolíticas intercaladas con basaltos. A esta unidad se le ha asignado una edad de 14 ± 2.5 Ma, según Mora-Kleipes *et al.* (1997).

2.2.2.5. Unidad Volcano-Sedimentaria de Lahares

Aflora solamente al Norte de San Carlos, desde Punta Paredones hasta Cerro El Bobiso. Tiene una morfología principalmente suave, con pendientes fuertes, que son cortadas por arroyos o por erosión marina. Presenta también una erosión particular que forma cuevas y pilares. Esta unidad está conformada mayormente por brechas laháricas, tiene una estratificación de gruesa a fina y presenta clastos angulosos a subredondeados de varias rocas volcánicas (andesita, riolita e ignimbrita).

Sherindan *et al.* (1979) consideran que estas rocas son lahares formadas por muchos flujos de lodo, intercalados con depósitos de caída y flujos de cenizas, sugiriendo así un origen volcano-clástico. La formación de esta unidad se asocia a sedimentos que se acumularon en cuencas provocadas por inclinación de bloques relacionados a movimiento a lo largo de fallas normales (Vega *et al.*, 2004).

2.2.2.6. Unidad Volcánica Basáltica

Esta unidad se puede observar al Oriente del Cerro El Vigía, donde afloran coladas basálticas delgadas que sobreyacen en discordancia a los derrames de la Unidad Volcánica Félsica. Localmente existen algunos conglomerados arenosos en la base y algunas areniscas intercaladas entre las coladas, hacia la cima de los flujos se presentan vesículas rellenas de calcita (Vega *et al.*, 2004).

Las coladas basálticas afloran también al Norte de Empalme. Han sido clasificadas como toleítas con olivino y agrupadas bajo el término de Basaltos de Empalme por Johnpeer,

(1977) y Mora (1992). Además fueron reconocidas como flujo; Mora, (1992) obtuvo cuatro edades con un rango de 10.3 ± 0.3 Ma a 8.5 ± 1.5 Ma, correspondientes al Mioceno superior.

2.2.2.7. Conglomerado Báucarit

Este conglomerado consiste principalmente de clastos volcánicos y alternancias de limos y arcillas con capas delgadas de caliche depositadas en un ambiente de paleocuenca. Estas rocas sólo se encuentran en un pequeño afloramiento en el borde noroccidental del Valle de San José de Guaymas, formando parte de la Sierra Ranchería cerca del arroyo Noche Buena.

El Conglomerado Báucarit es parte de la Formación Báucarit y es relacionado a un proceso distensivo. Algunos autores lo fechan con edades asociadas a la fase Basin and Range, como depósitos correlacionados a este evento. Otros, a una etapa distensiva anterior con edades de ± 20 y 12.5 Ma (Radelli, 2005). Esta formación está compuesta por la acumulación de rocas pre-existentes, conglomerados, areniscas con flujos intercalados de andesitas basálticas, ocupando los grandes valles desarrollados durante este episodio.

2.2.3. Cuaternario

2.2.3.1. Sedimentos

Los sedimentos son derivados de las formaciones geológicas anteriores, los cuales fueron erosionados y transportados por corrientes fluviales, rellenando las depresiones del Valle de San José de Guaymas. El depósito de estos materiales inició en el Plioceno y continuó hasta el Reciente.

La planicie aluvial y fluvial de la cuenca es una zona importante para el estudio geohidrológico de la región, ya que en ella se aloja el principal sistema acuífero de la cuenca. Los sedimentos clásticos que se pueden encontrar son: boleas, gravas, arenas, limos

y arcillas, en ocasiones consolidados, así como en algunas aéreas se presentan conglomerados polimíticos (TMI, 1975).

2.3. Geohidrología

El Valle de San José de Guaymas se encuentra en la Región Hidrológica Sonora Sur (RH-9), en la Cuenca del Río Mátape (C), en la Subcuenca del Arroyo Guaymas (Fig. 2.4). Es parte del Río Mátape, pero cuenta con un drenaje independiente y vierte sus aguas directamente al Golfo de Baja California o Mar de Cortés. Recibe aguas de las corrientes intermitentes Nochebuena, San Vicente, El Tigre, La Tinaja, El Guajare, San José y El Toro, los cuales llevan agua sólo cuando llueve. El resto del año sus cauces permanecen secos. Al Sur se encuentran los cuerpos de agua del Estero El Rancho y de la Bahía de Empalme.

Debido a efectos del clima y geología de la cuenca, el tipo de drenaje es dendrítico, y está caracterizado por una red de cauces y drenajes determinada por las pendientes del terreno y resistencia de la roca. El agua subterránea de la zona se usa para actividades agrícolas, domésticas, pecuarias y público-urbanas (Arvizu y González, 2009).

La cuenca hidrológica comprende a los arroyos San José y El Toro, los cuales desembocan en el Estero El Rancho (Fig. 2.4). Esta cuenca es de orden 6, lo que significa que está muy ramificada y que en caso de lluvia, podría tener un rápido desfogue del volumen de agua y constituir un gran peligro para los habitantes del poblado de San José de Guaymas y sus alrededores (Martínez, 2000). Desafortunadamente este problema ya se presentó, ya que el ciclón Jimena del año 2009, causó grandes daños a estos poblados y dejó sin vivienda a muchos habitantes.

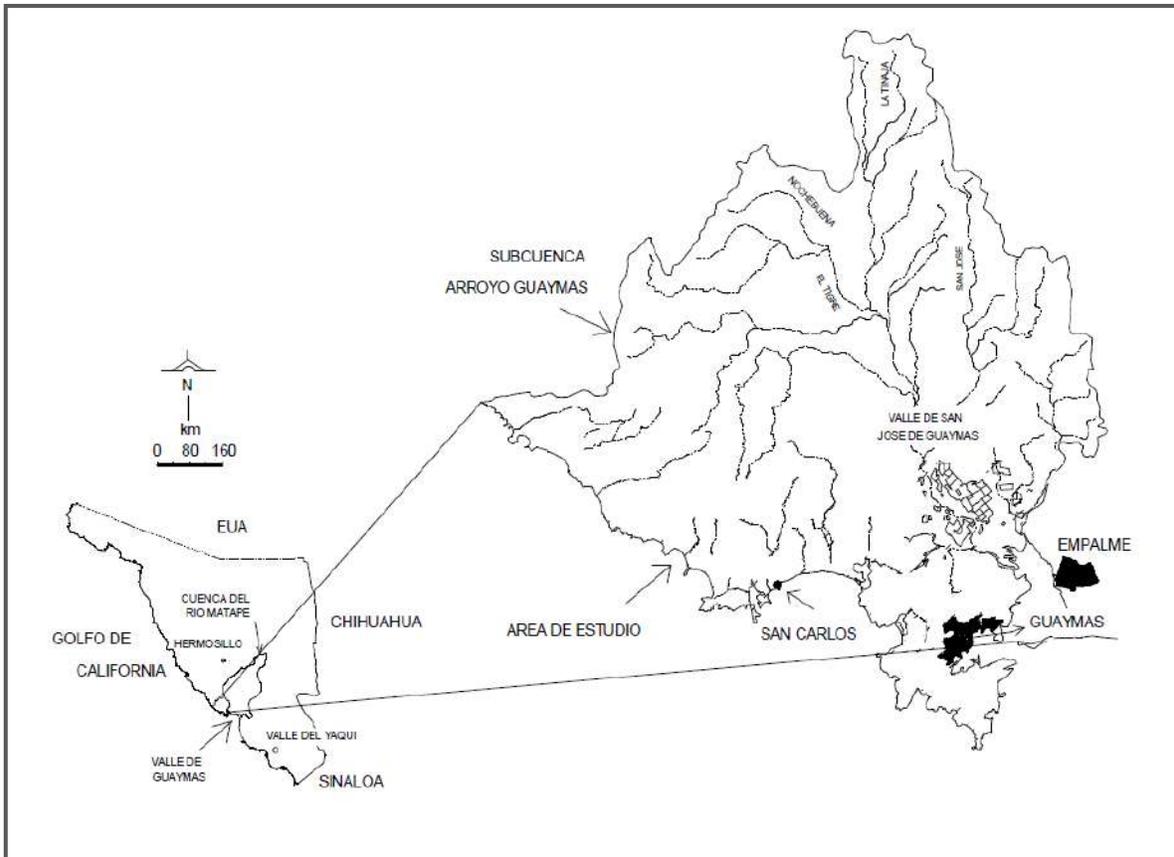


Fig. 2. 4 Ubicación e hidrografía de la Subcuenca del Arroyo Guaymas (Vega *et al.*, 2005).

El acuífero del Valle de San José de Guaymas se encuentra conformado por fronteras laterales e inferiores, principalmente de rocas ígneas, que afloran en las sierras colindantes con el valle. Presenta un medio granular, el cual está dividido por una arcilla marina semiconfinada, conocida como Arcilla Azul, la cual es muy delgada en comparación con una similar encontrada en el Valle de Guaymas. Tiene una transmisividad de 0.005 a 0.15 m^2/s decreciendo del borde superior del valle hacia el litoral (TMI, 1975).

3. MÉTODO GRAVIMÉTRICO

3.1. Fundamentos (Ley de Newton y Unidades)

Este método consiste en la medición de valores de la gravedad terrestre para determinar las desviaciones o anomalías del comportamiento normal del campo gravitacional, ocasionado por los cambios de densidad en los materiales del subsuelo.

El fundamento fisicomatemático del método descansa en la “Ley de la Gravitación Universal de Newton”, la cual establece que la fuerza (F) de atracción mutua entre dos partículas de masa m_1 y m_2 es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) entre ellas.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.1)$$

Donde G es la constante de Gravitación Universal:

$$G = 6.670 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 / \text{gr s}^2 \quad (3.2)$$

La aceleración o atracción gravitacional es la fuerza de gravitación que actúa sobre una unidad de masa, y corresponde a la medición del campo gravitacional actuando en cualquier punto:

$$a = g = \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2} \quad (3.3)$$

En el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS), la gravedad se mide en unidades de longitud sobre tiempo al cuadrado (cm/s^2) que equivale a un “gal” (en honor a Galileo). Dado que la aceleración gravitatoria en la superficie terrestre es de $980 \text{ cm}/\text{s}^2$ o 980 gales, y como las anomalías de una diezmillonésima de este valor tienen importancia científica o económica, la unidad estándar en geofísica para gravimetría es el “miligals” (mGal) que es igual a 10^{-3} gales.

3.2. Campo Gravitacional de la Tierra

La gravedad varía de un punto a otro en la Tierra, por lo tanto, el potencial del campo gravitacional se define en dos partes fundamentales: la primera es la atracción de la Tierra debido a su masa de acuerdo con la Ley gravitacional de Newton, la segunda se define por la aceleración centrífuga debido a la rotación de la Tierra; también hay una atracción más, generada por otros astros, pero es muy pequeña (Fig. 3.1).

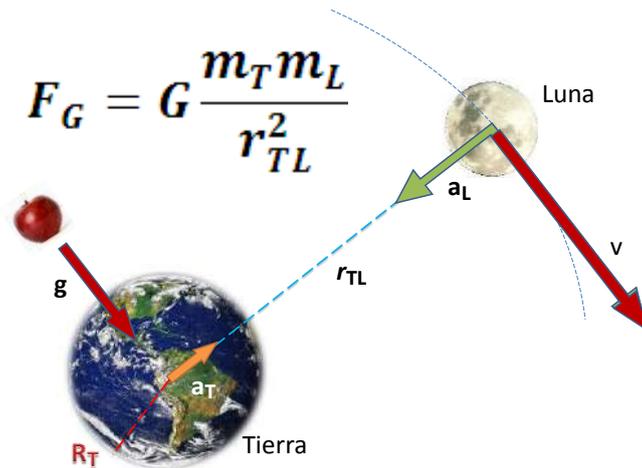


Fig. 3.1 Fuerza de atracción de la Tierra sobre la Luna

La aceleración centrífuga producida por el movimiento de rotación de la Tierra, hace disminuir el efecto gravitatorio, ésta es más fuerte en el Ecuador y nula en los Polos. Debido a esta aceleración se tiene la forma de la Tierra, achatada de los polos y de mayor grosor en el ecuador, afectando la distancia hacia el centro de la Tierra, por lo tanto, al tener un radio más pequeño en los Polos se tiene mayor gravedad (9.83 m/s^2), y en el Ecuador por tener un radio más grande se tiene menor gravedad (9.78 m/s^2).

3.3. Medición de la Gravedad

Se pueden encontrar tres distintas formas para medir las anomalías de la gravedad: mediciones de la caída libre de un cuerpo, la cual consiste en tirar un objeto y calcular directamente la aceleración que el cuerpo toma, midiendo cuidadosamente la distancia recorrida y el tiempo al caer el objeto (Fig. 3.2); mediciones con el péndulo, en donde se estima la aceleración gravitacional midiendo la oscilación periódica de un péndulo; y mediciones en donde una masa se suspende de un resorte o fibras de torsión, y se

observa que tanto se deforma el resorte bajo la fuerza de gravedad, y así se estima la aceleración gravitacional.

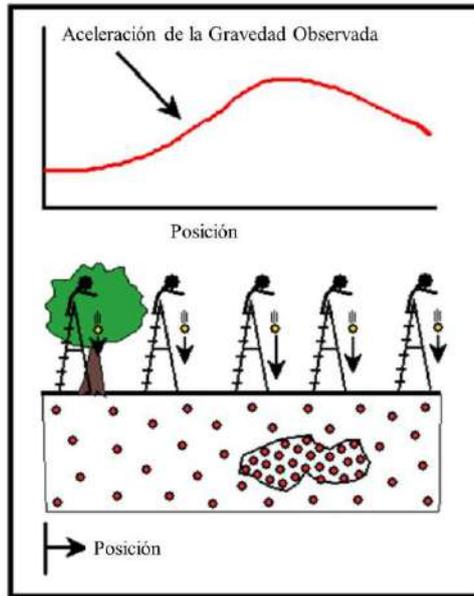


Fig. 3. 2 Medición de caída libre de un cuerpo, (Boyd)

El instrumento con el que se miden las anomalías de gravedad se le llama gravímetro; estas variaciones que son prácticamente despreciables, se miden con una masa suspendida un resorte sensible, el cual mide las variaciones verticales de atracción gravitatoria del suelo que están asociadas a cambios de densidad (Fig.3.3). Por ejemplo, los altos estructurales, o un depósito de mineral de alta densidad, harán aumentar localmente la fuerza de la gravedad en sus proximidades (siempre que su densidad media sea mayor que la circundante), mientras que los domos de sal, de densidad baja, la disminuirán.

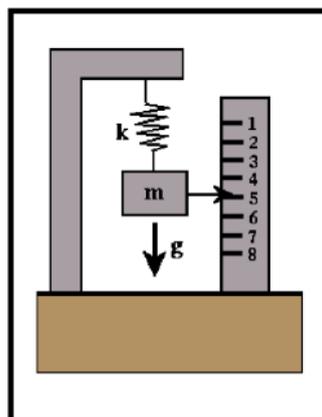


Fig. 3. 3 Gravímetro de resorte o torsión (Boyd).

3.4. Reducción de Datos

Al tomar las medidas de gravedad nos podemos encontrar con diferentes variaciones en los datos tomados, con respecto a la estación base, debido a que la gravedad varía dependiendo de su latitud, altitud y tiempo, por lo cual, se tienen que realizar las siguientes correcciones.

3.4.1. Corrección por Latitud

La Corrección por Latitud (C_{Lat}), se realiza debido a la variación de la aceleración de la gravedad, que depende de la latitud, ya que la aceleración es mayor conforme nos acercamos a los Polos, y es menor en el Ecuador, y también es afectada, pero en menor proporción, por la fuerza centrífuga por efecto de rotación, que es menor en los Polos y mayor en el Ecuador, y tiene un sentido contrario a la fuerza de gravedad (Fig.3.4). Debido a esta variación, se han propuesto una serie de fórmulas para calcular la gravedad teórica o “normal” sobre la superficie, considerando a la Tierra como un elipsoide de revolución o esferoide. La siguiente expresión corresponde a la Fórmula Internacional de la Gravedad de 1984 del Sistema Internacional Geodésico Mundial:

$$g_{esf} = g_e (1 + 0.0052855077 \text{sen}^2\varphi - 0.0000016166 \text{sen}^2 2\varphi) \quad (3.4)$$

Donde φ es la latitud de la estación base en coordenadas geográficas, g_e es la gravedad en el Ecuador igual a 978,032.6714 mGal. Reduciendo llegamos a:

$$C_{Lat} = 0.81 \text{sen} 2\varphi \text{mgal/km} \quad (3.5)$$

Si la estación medida con respecto a la estación base, se acerca más al Ecuador, la corrección se debe sumar y se restará entre más se acerque a los Polos.

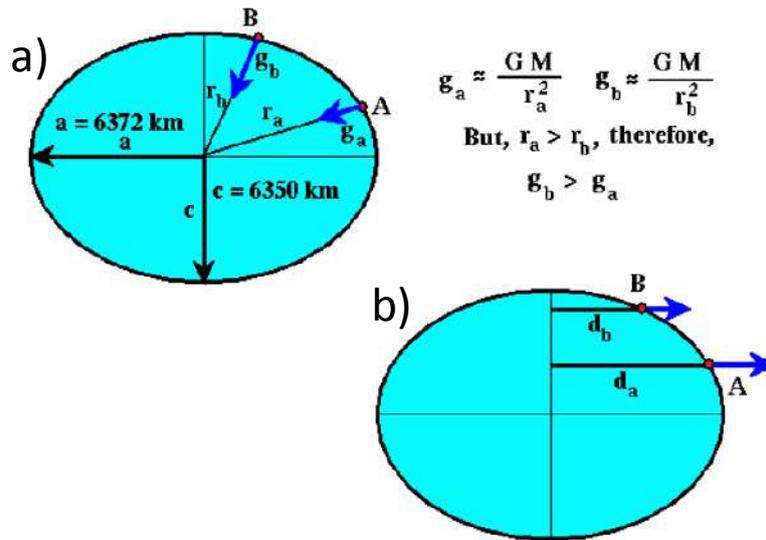


Fig. 3. 4 Variaciones de la dirección de la fuerza de: a) Fuerza de Gravedad, b) Fuerza centrífuga producida por la rotación de la Tierra (Boyd).

En los estudios geodésicos (no locales) se toma en cuenta la forma del geoide. El geoide es una superficie de equilibrio de los océanos y los continentes que representa el nivel medio del mar, la cual se prolonga por debajo de los continentes; está encima del esferoide en los continentes y por debajo en los océanos (Fig. 3.5).

$$H = h - N$$

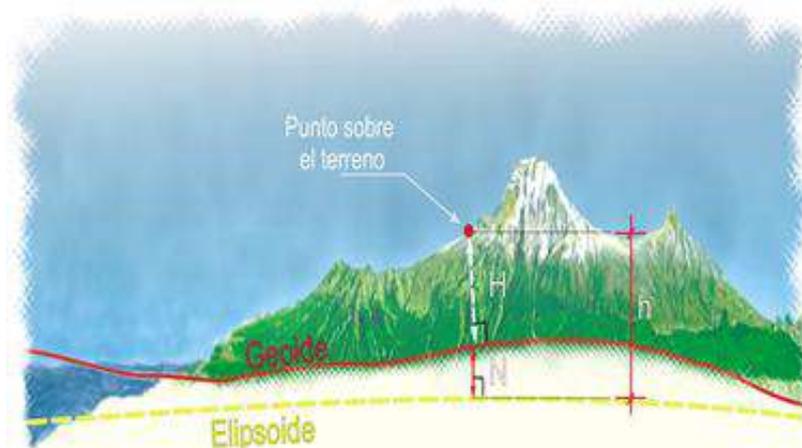


Fig. 3. 5 Esquema de Geoide y Elipsoide, tomado de INEGI.

3.4.2. Corrección por Altitud

La Corrección por Altitud está dada por la variación de elevación sobre el nivel del mar, por la densidad del material sobre la elevación, y por las elevaciones o cerros

que se encuentren a su alrededor (Cantos, 1974). Dado esto, se tienen 3 diferentes tipos de correcciones:

- **Corrección de Aire Libre (C_{AL}).** Esta corrección se refiere a la intensidad de la gravedad que varía de acuerdo a la distancia del punto de medición con respecto al centro de la Tierra, es decir, cómo varía la fuerza de gravedad con la elevación (z) de la estación base a la estación medida. Para ello, se considera la elevación de la estación base como referencia, y se le resta a la obtenida en la estación en la cual se quiera hacer la corrección, obteniendo así la altura h de separación entre ellas (Fig. 3.6). Esta corrección se obtiene de la siguiente fórmula :

$$g = G \frac{m \cdot 1}{r^2} ; \frac{\partial g}{\partial r} = -2G \frac{m}{r^3} = -\frac{2g}{r} = -0.3086 \text{ mgal/m} \quad \bullet \quad (3.6)$$

$$C_{AL} = (0.3086 * \Delta h) \quad \bullet \quad (3.7)$$

La corrección es positiva si el punto de medición está sobre el nivel de la estación base, en caso contrario es negativa.

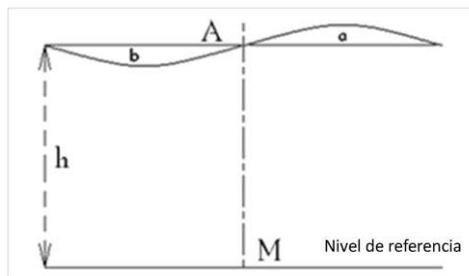


Fig. 3. 6 Figura para explicar las diferentes correcciones de Altitud (modificado de Cantos, 1974)

- **Corrección de Bouguer (C_B).** Es similar a la corrección por elevación, sólo que toma en cuenta el material entre la estación base y la estación medida, aproximando todas las masas arriba o abajo del plano de referencia con una base homogénea de extensión lateral infinita y de espesor igual a la altura h de la estación respecto al plano de referencia (estación base) (Fig. 3.7). Esto quiere

decir que se calcula hallando el efecto gravitatorio del terreno comprendido entre el nivel de la estación (plano de la cota h) y el nivel de referencia, suponiendo que la estación se ha hecho en un plano topográfico horizontal (Fig. 3.6), el efecto gravitatorio sobre la unidad de masa es:

$$C_B = -2\pi K\delta h = -0.0419 \delta \Delta h \quad (3.8)$$

Donde δ es la densidad de la corteza terrestre (en promedio es de 2.67 gr/cm^3) y K es la constante de la gravitación universal. La corrección es negativa si la estación medida está por encima del nivel de referencia, ya que la densidad del cuerpo aumenta la atracción, entre mayor sea la altura mayor será.

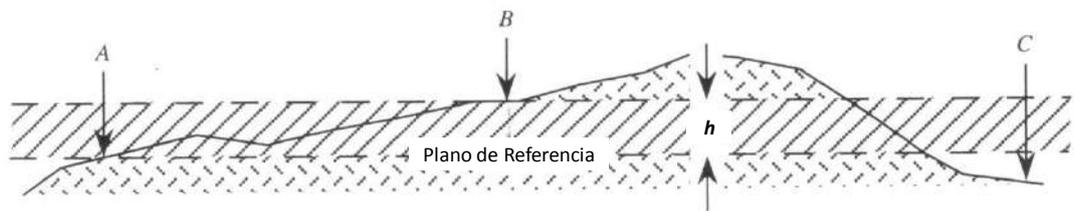


Fig.3. 7 Losa infinita usada para corregir el exceso de masa bajo el punto B (Burger, 1992).

- **Corrección Combinada (C_C).**Ésta se obtiene con la suma de la corrección de Bouguer y la corrección de aire libre; si se supone una densidad de 2.67 gr/cm^3 :

$$\begin{aligned} C_C &= C_{AL} + C_B \\ C_C &= 0.3086h + (-0.0419\delta h) = 0.3086h - 0.119h \\ C_C &= 0.1967h \end{aligned} \quad (3.9)$$

Por lo tanto, la corrección de aire libre es positiva y la de Bouguer es negativa para estaciones medidas por encima del nivel de referencia, y los signos se invierten para estaciones por debajo del nivel de referencia. Entonces las correcciones de aire libre y Bouguer tienen signos contrarios.

- **Corrección Topográfica(C_T).**Se considera el efecto de atracción de masa dado por la topografía (valles y montañas) de alrededor de la estación, tanto las situadas por encima de la estación como las depresiones situadas debajo de la estación, pero como este material en realidad no existe, debemos sumar su atracción para compensar (Fig.3.8).

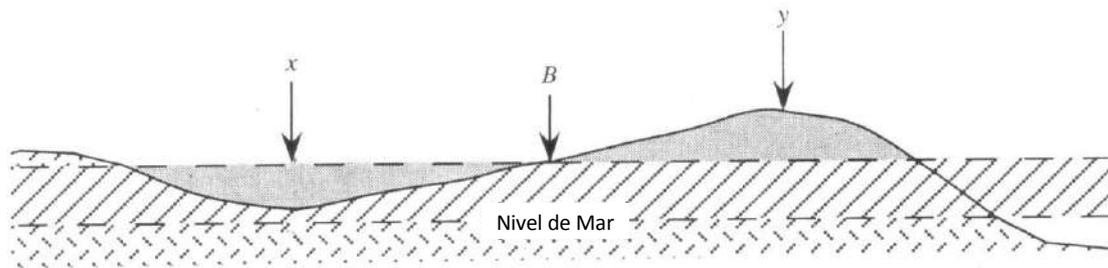


Fig.3. 8 Un ejemplo de corrección de terreno requiere un región x y y debido a la natural simplicidad de la corrección de Bouguer aplicada en el punto B (Burger, 1992).

Por lo tanto, la corrección topográfica se suma siempre, ya se trate de un valle o de una montaña, ya que éstos generan cierta atracción a la estación tomada. Esta corrección se obtiene usando unos gráficos que consisten en una serie de círculos concéntricos alrededor de la estación dividida en sectores, como indica la figura 3.9. Estos gráficos se superponen al mapa topográfico, de donde se deduce dicha altura media y con ayuda de unas tablas ya calculadas por Hammer (1939) se hallan los efectos gravimétricos debido a cada uno de los prismas que tienen de base estos sectores y altura.

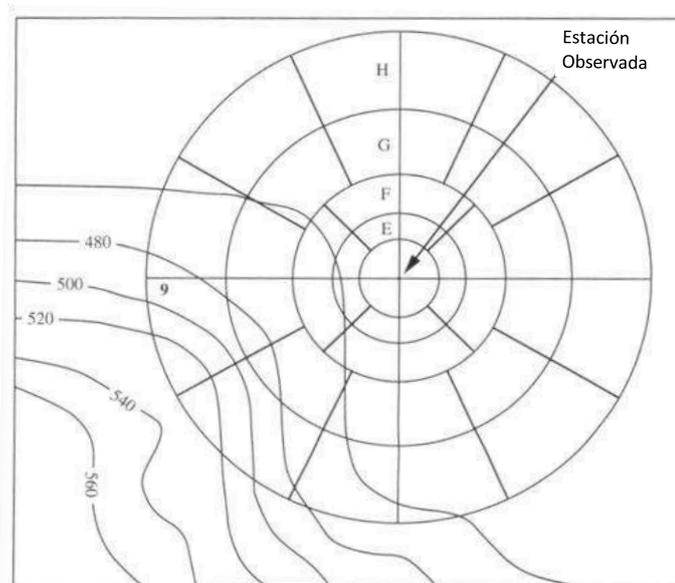


Fig. 3. 9 Plantilla de Hammer (Burger, 1992).

3.4.3 Corrección por el Tiempo

Corrección por tiempo o de deriva (C_d). Se realiza principalmente debido a que las mediciones tomadas varían en intervalos de tiempo, y estas variaciones pueden ser ocasionadas por deriva instrumental o efectos luni-solar. Las variaciones se pueden observar cuando se repite una medida en un mismo sitio después de que haya pasado un tiempo, por lo tanto, se recomienda al momento de hacer un levantamiento tomar la primera y la última lectura en la estación base, o estar tomando datos en la estación base cada hora.

El efecto luni-solar se refiere al efecto causado por las atracciones gravíticas del Sol y la Luna, que es el mismo que causa los cambios de marea; también distorsiona un poco la forma de la Tierra, esto hace que cambie levemente su elevación (centímetros) y puede llegar a variar como máximo solamente 0.05 mGal/hr.

La deriva instrumental, son variaciones que se dan debido a las características del gravímetro, éstas pueden ser ocasionadas por la fatiga del sistema de muelles (resorte), variaciones en temperatura o también existen otras incontroladas.

3.4.4 Anomalía de Bouguer

A la reducción de la gravedad observada al nivel de la estación base, la cual incluye todas las correcciones mencionadas anteriormente y comparándola con la gravedad teórica, es lo que comúnmente se conoce como Anomalía de Bouguer, que se representa de la siguiente manera:

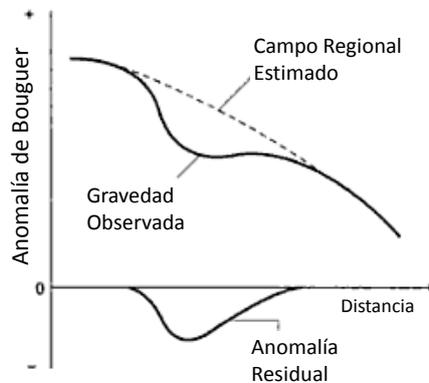
$$\Delta g = g_{obs} \pm C_d \pm C_{Lat} \pm C_{AL} \pm C_B + C_T - g_o \quad (3.10)$$

Donde g_o es la gravedad teórica o gravedad de estación base.

El método gravimétrico se emplea como método de reconocimiento general, mientras que en la minería se puede emplear generalmente como método de comprobación complementario.

3.5. Separación de Anomalías Regional y Residual

Para poder hacer una interpretación del basamento, se separa la anomalía de gravedad de interés. Esto se hace considerando que la Anomalía de Bouguer es la suma de dos componentes: efecto regional, que corresponde a las masas profundas y lejanas (generalmente el basamento), y efecto residual debido a las masas superficiales (estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes) (Fig. 3.10). Hay que recordar que como cualquier otra técnica geofísica, el factor más importante en la interpretación es el conocimiento de la geología local.



**Fig.3. 10 Ejemplo de Anomalías Regional y Residual
(modificado de Kearey, 2002)**

Dado que lo que interesa hacer resaltar es el efecto debido a la masa superficial, se elimina o reduce el correspondiente a la masa profunda. Por esto se define como Anomalía Regional al efecto de todo aquello que no interesa prospectar (Cantos, 1974).

La Anomalía Residual se define como:

$$\begin{aligned} \textit{AnomalíaResidual} &= \textit{AnomalíadeBouguer} - \textit{AnomalíaRegional} \\ A_{Res} &= A_B - A_{Reg} \end{aligned} \tag{3.11}$$

Los métodos utilizados para obtener la Anomalía Residual o “el residual”, son numerosos, por lo que el valor de éste en una determinada región depende del método empleado para calcularlo.

Una manera de obtener la Anomalía Regional o “el regional”, es generando superficies matemáticas que mejor ajusten a los datos distribuidos en un sistema de coordenadas xyz . Estas son definidas por funciones polinomiales y el ajuste a los datos se realiza por el Método de Mínimos Cuadrados. Se acostumbra calcular polinomios de varios órdenes para ver cuál (plano, paraboloides, etc.) representa el mejor ajuste regional, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\hat{z} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \dots \quad (3.12)$$

En la ecuación se considerarán tantos términos como se requiera, dependiendo del orden que se necesite para representar: planos, paraboloides (Fig. 3.11) o polinomios de grado n .

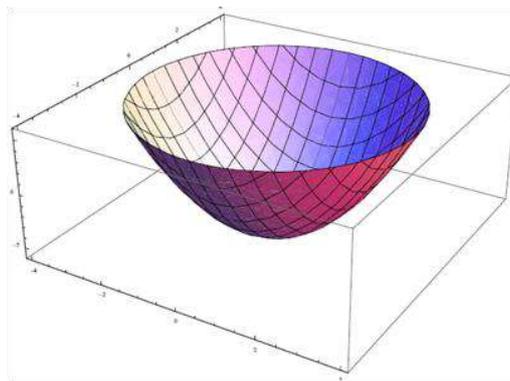


Fig.3. 11 Paraboloides

La mayor deficiencia de este método es que es meramente matemático y no toma en cuenta los datos geológicos (Burger, 1992).

3.6. Estimación de la Profundidad

3.6.1. Estimación de la Profundidad con Losa de Bouguer

Una forma directa de llegar a una interpretación cuantitativa del objetivo es con el residual de la Anomalía de Bouguer (cuando los modelos específicos no son utilizados para representar estructuras geológicas). Éste se basa en el concepto de un estrato equivalente, el cual se utiliza sólo cuando se tiene una interfase entre dos materiales que

presentan diferentes densidades (Grant y West, 1965). De esta manera se simula una losa infinita de espesor h (Parasnis, 1962). La expresión para llegar al objetivo está dada por:

$$A_{Res} = 2 \pi G \Delta \delta h \quad (3.13)$$

A_{Res} : Anomalía residual.

G : Constante de Gravitación Universal. ($6.670 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$)

$\Delta \delta$: Contraste de densidad (gr/cm^3)

h : Profundidad (m)

A partir de esta fórmula se despeja h y se tiene:

$$h = \frac{2 \pi G \Delta \delta}{A_{Res}} \quad (3.14)$$

3.6.2. Método de Talwani

Este método analítico, conocido como Método de Talwani se utiliza para definir el basamento o diferentes cuerpos, usando un polígono de n -lados para aproximarse al contorno de la sección vertical de un cuerpo de dos dimensiones. Uno puede calcular el efecto de la gravedad a mano o digitalmente en computadora (Talwani *et al.*, 1959). Una sección simple se presenta a continuación (Fig. 3.12), donde se puede mostrar que el efecto de la gravedad de esta sección es igual a la integral de línea alrededor del perímetro (Hubbert, 1948). La relación es:

$$g = 2 G \delta \oint z d\theta \quad (3.15)$$

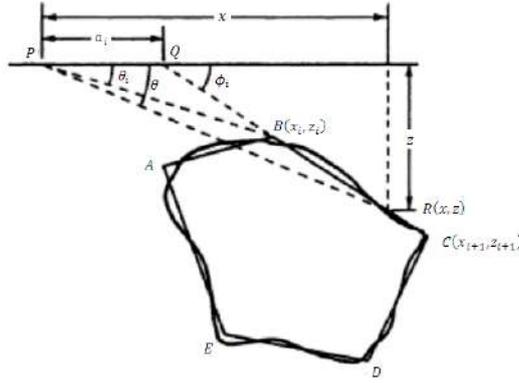


Fig.3. 12 Sección con polígono de n -lados, (Telford, 1976)

De la geometría de la figura 3.12, tenemos la siguiente relación:

$$z = x \tan \theta = (x - a_i) \tan \theta \phi_i \quad (3.16)$$

o

$$z = \frac{a_i \tan \theta \tan \theta \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} \quad (3.17)$$

La integral de línea para BC es:

$$\int_{BC} z d\theta = \int_B^C \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} d\theta = Z_i \quad (3.18)$$

Por lo tanto:

$$g = 2 G \delta \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3.19)$$

En la mayoría de los casos, Z_i esta dada por:

$$Z_i = a_i \sin \phi_i \cos \phi_i \left[(\theta_i - \theta_{i+1}) + \tan \phi_i \cdot \log \left\{ \frac{\cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i)}{\cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i)} \right\} \right] \quad (3.20)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{z_i}{x_i} \right), \quad \phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right), \quad (3.21)$$

$$a_i = x_{i+1} - z_{i+1} \cot \phi_i = x_{i+1} + z_{i+1} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{z_{i+1} - z_i} \right) \quad (3.22)$$

Esta técnica también ha sido usada para cuerpos de tres dimensiones, reemplazando el contorno en el plano horizontal con un polígono de n -lados. La solución para las integrales de los polígonos, es una versión más complicada de lo visto anteriormente. También este método se puede utilizar para hacer la corrección topográfica (Talwani & Ewing, 1960).

4. GRAVIMETRÍA DEL VALLE DE SAN JOSÉ DE GUAYMAS

4.1. Adquisición de Datos

Para poder realizar las mediciones gravimétricas, se utilizaron cartas topográficas de INEGI, a escala 1:250 000 (Sierra Libre H12-11 y Guaymas G12-2), y a escala 1:50 000 (Guaymas G12B11 y José María Morelos y Pavón H12D81) con el fin de reconocer el área, así como para definir las diferentes rutas de acceso como carreteras, caminos o rutas alternas, éstas nos sirvieron de guía para ubicar los perfiles gravimétricos (Fig. 4.1).

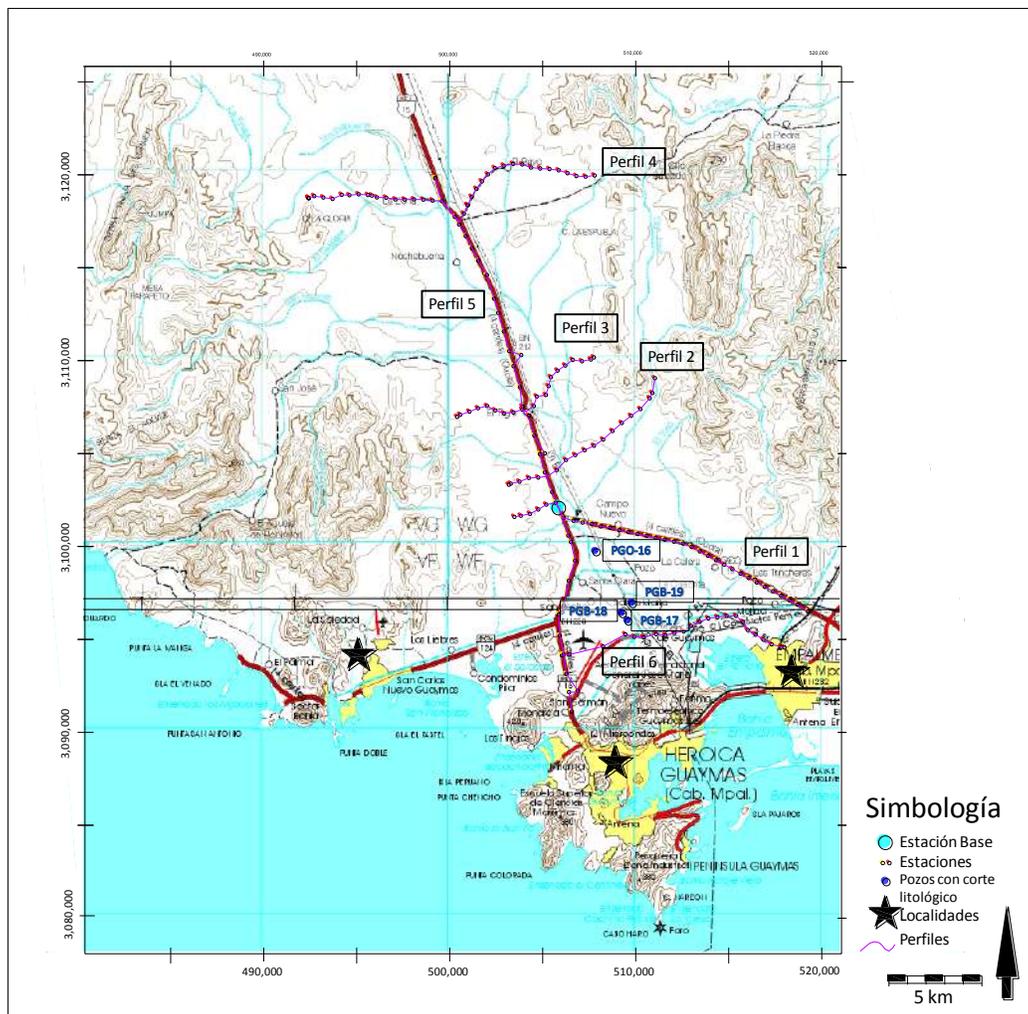


Fig. 4. 1 Localización de perfiles gravimétricos, de las estaciones geofísicas y de algunos pozos sobre un mapa topográfico de INEGI.

En total se realizaron seis perfiles, cinco en dirección NE-SW, transversales al valle, y uno longitudinal en dirección NW-SE. Los perfiles tienen una separación promedio de 6 km entre ellos, con longitudes que van de 9 a 32 km. Se registraron un total de 173 estaciones con un espaciamiento entre ellas de aproximadamente 500 m.

La estación base se ubicó en la parte central del área, para tener un acceso más fácil a ella, la cual quedó ubicada en el área de descanso El Valiente, con coordenadas 505,863 m E y 3'10,2064 m N en UTM (Fig. 4.2). La estación base se utilizó para observar la deriva instrumental del gravímetro, para lo cual se realizaron lecturas al inicio y al final de los perfiles. La mayoría de las estaciones se tomaron sobre la carretera y caminos rurales, y en algunos perfiles se tomaron aunque no hubiera ni camino ni brecha debido a problemas de accesibilidad por prohibiciones políticas o de los propietarios. Se logró que los perfiles terminaran sobre afloramientos de roca en los cerros (con excepción del perfil 5), para determinar la respuesta gravimétrica del basamento y determinar el regional.



Fig. 4. 2 Estación Base ubicada en el área de descanso El Valiente.

Para realizar la lectura de la gravedad se utilizó un Gravímetro marca Scintrex CG-5 (Fig. 4.3), el cual cuenta con una resolución de 0.001 mGal y un rango máximo de operación de 8,000 mGal.



Fig. 4. 3 Gravímetro Scintrex CG-5

Este gravímetro puede llegar a hacer una lectura de la gravedad cada segundo. En este estudio se programó para que tomara lecturas durante un minuto, haciendo así un total de sesenta lecturas por minuto. Con estos valores, el gravímetro determina la media y la desviación estándar, así como el tiempo en el que se hizo la medición. El gravímetro tiene una deriva muy baja, debido al ambiente de funcionamiento del sistema elástico de cuarzo que es muy estable y al programa de corrección incorporado que reduce la deriva a 0.02 mGal por día (Scintrex, 2006). Para tomar las coordenadas de la estación se utilizó un geoposicionador (GPS) portátil marca Garmin Etrex, donde se manejaron coordenadas UTM, con un *datum* en WGS84 (World Geodetic System).

Los valores de gravedad observados fueron capturados en un formato digital para facilitar su estudio, a partir del cual se obtuvieron perfiles (Fig. 4.4) y posteriormente se generó un mapa utilizando el programa WinGLink (Fig. 4.5).

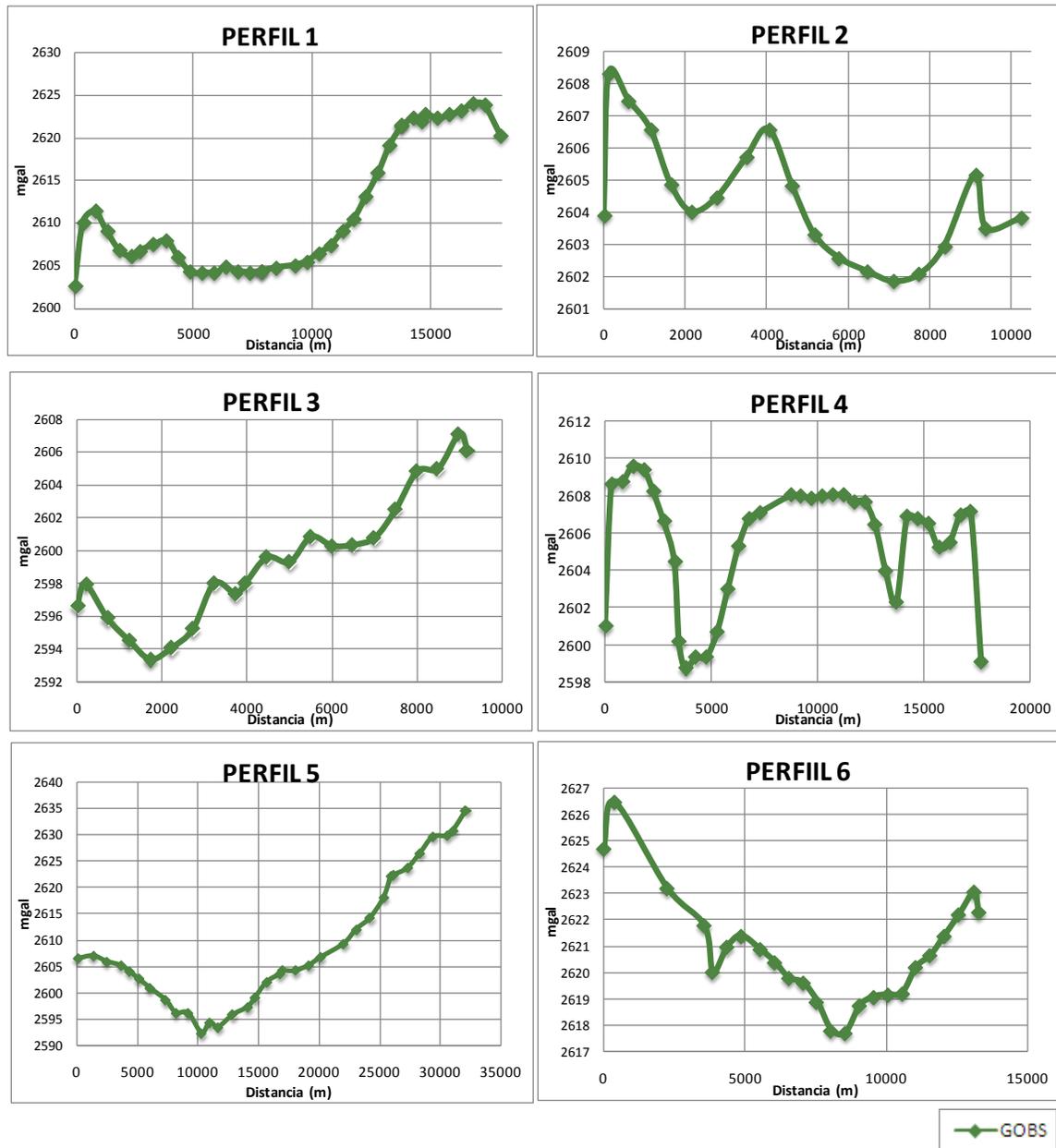


Fig. 4. 4 Gráficas de la Gravedad Observada en los perfiles realizados en el Valle de San José de Guaymas.

En el mapa de la figura 4.5, se pueden observar zonas coloreadas en azul que corresponden a bajos gravimétricos. Las tonalidades en color rojo representan altos gravimétricos, según se muestra en la escala de gravedad en miligales (mGal), colocada a la derecha del mapa. Se pueden ver los comportamientos máximos en la porción sur del área de estudio, así como una depresión hacia el centro, especialmente del lado oeste del área, teniendo una pequeña elevación en la parte noroeste.

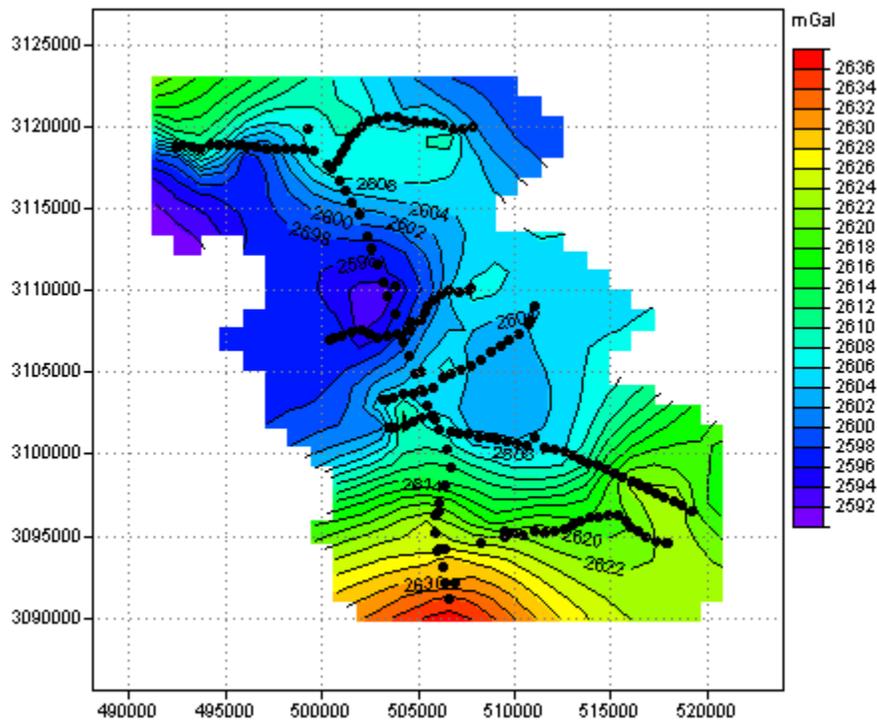


Fig. 4. 5 Mapa de Gravedad Observada del Valle de San José de Guaymas.

4.2. Reducción de Datos

Como ya se había visto en el capítulo anterior, la gravedad observada debe ser corregida, porque los datos registrados se encuentran influenciados por variaciones de gravedad a causa de la elevación del terreno, topografía y tiempo. Por tal motivo, se aplicaron correcciones por Aire Libre, Bouguer, Latitud, Topografía y Deriva, utilizando el programa Excel. Las tablas con las correcciones para cada perfil se muestran en el Apéndice A.

La Corrección por Aire Libre se realiza para corregir cambios de elevación de una estación comparada con la estación base, y consiste en reducir las lecturas a un solo nivel de referencia o *datum*. El valor de la corrección se obtiene considerando la altura h de cada estación (con respecto al nivel de referencia), y se calcula la diferencia Δh entre la elevación de la estación medida y la estación base. La diferencia de alturas Δh en m, se sustituyó en la expresión: $C_{AL} = (03086 * \Delta h)$ citada en el capítulo anterior (ec. 3.7). El valor de esta corrección se suma cuando la estación medida está sobre el nivel de referencia (estación base) y se resta cuando está por debajo.

La Corrección de Bouguer es similar a la corrección por Aire Libre. Es una corrección que depende de la elevación, pero además toma en cuenta la masa que hay arriba o debajo de la estación de referencia. Se obtiene a partir de la expresión $C_B = -2\pi K \delta h = -0.0419 \delta \Delta h$ (ec. 3.8 ver capítulo 3), donde Δh es la diferencia de elevación, tal como en la corrección de aire libre, y δ es la densidad de la roca. Esta corrección se resta cuando la estación medida está sobre el nivel de referencia y se suma cuando está debajo de la estación base. Para calcularla se consideró una densidad para el material de relleno de $\delta = 2.2 \text{ gr/cm}^3$ (Telford, 1976), tomando en cuenta que el material de relleno está constituido principalmente por aluvión (gravas, arenas y arcillas) en diferentes espesores.

La Corrección por Latitud se realiza por la forma elipsoidal y la rotación de la Tierra, ya que es más ancha en el Ecuador y esta achatada en los Polos. Ésta se realiza con la fórmula $C_{Lat} = 0.81 \text{ sen} 2\varphi \text{ mgal/km}$ (ec.3.5), donde φ es la latitud de la estación base, en coordenadas geográficas. Esta corrección indica el error que se tiene por cada kilómetro, en dirección N-S, entre la estación base y la estación medida. La corrección se resta si nos acercamos a los Polos al registrar el perfil, y se suma si nos acercamos al Ecuador. Para obtener esta distancia se calculó la diferencia entre la estación base y la estación medida, considerando sólo la componente N-S (coordenadas y en UTM).

Para realizar la Corrección por Topografía acudimos al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), ya que nos interesaba calcularla de una

manera más exacta. Ahí nos recibió el Dr. Juan García Abdeslem, quien nos proporcionó un programa diseñado por él y elaborado en Fortran. Los datos de entrada a este programa son el número de estaciones, sus coordenadas y un mapa vectorial. El mapa vectorial abarcó 100 km más alrededor del área de estudio, con esto el programa da una corrección topográfica para cada estación.

La Corrección por Deriva se aplicó solamente al perfil 4, ya que en la estación SJ4E18 se registraron valores de gravedad observada de 2,606.06 mGal (12:47 horas) y 2,707.982 mGal (17:42 horas) al inicio y al final del perfil. A partir de estas dos mediciones se obtuvo un ajuste lineal y después se determinó la corrección para cada estación por interpolación para distribuir proporcionalmente el error. El valor de la corrección se restó a cada estación, ya que el segundo valor medido fue mayor que el primero. Los cálculos se realizaron en Excel.

4.3. Anomalía De Bouguer

Después de calcular las correcciones, se obtiene la Anomalía de Bouguer para cada perfil de acuerdo a la siguiente fórmula (ec. 3.10). La figura 4.6 muestra la Anomalía de Bouguer para cada perfil.

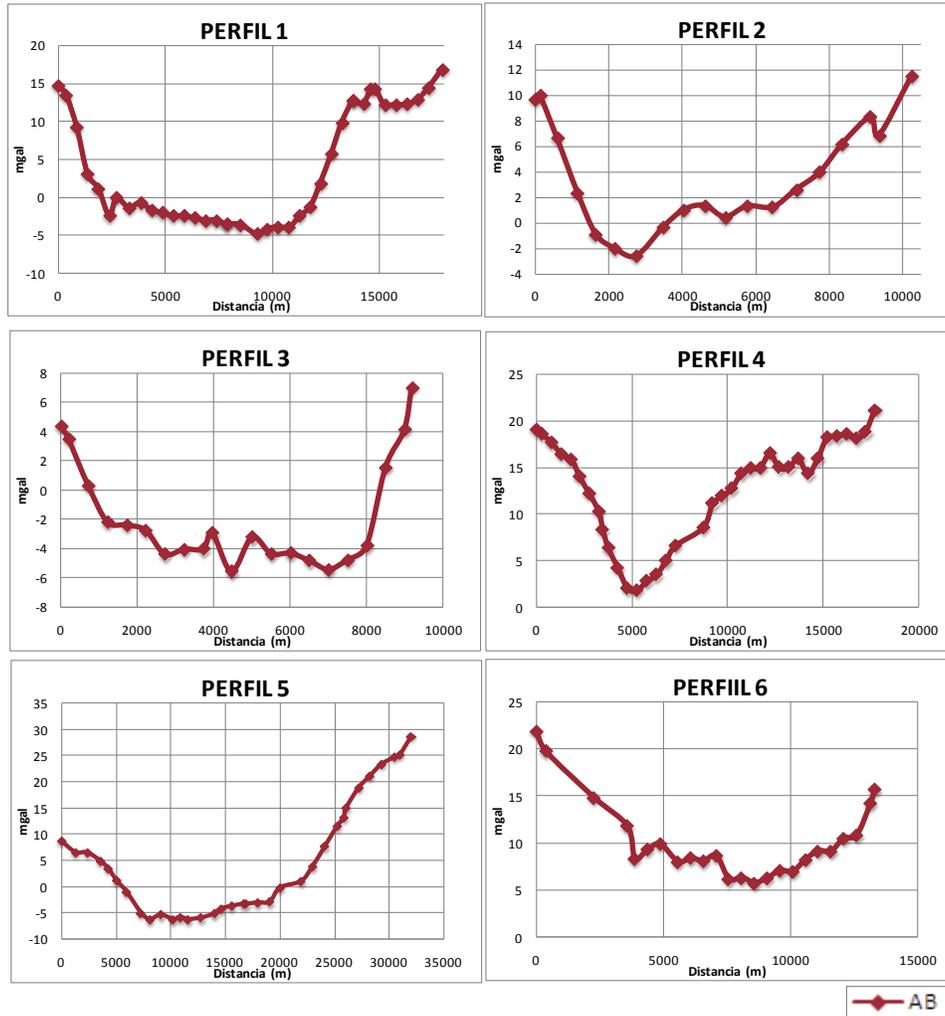


Fig. 4. 6 Gráficas de Anomalía de Bouguer de los perfiles realizados en el Valle de San José de Guaymas.

A partir de los perfiles de Anomalía de Bouguer se generó una malla en WinGlink, utilizando el método de cuadrícula (gridding) de mínima curvatura (Fig. 4.7).

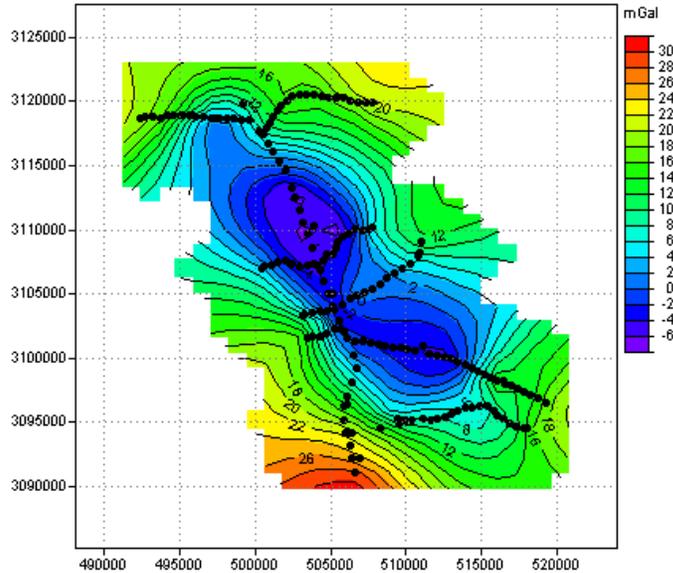


Fig. 4. 7 Mapa de Anomalía de Bouguer

En el mapa de Anomalía de Bouguer se puede observar una área de mínimos al centro de forma ovalar alargada con orientación NW-SE, donde se observan los mínimos más pronunciados principalmente en la parte norte de esta depresión, con valores mínimos de -4 mGal y máximos de 20 mGal en la orillas del área.

4.4. Separación de Regional y Residual

La determinación del regional y residual se manejó de dos maneras, la primera en perfiles (dos dimensiones) en forma individual, donde se obtuvo el regional por ajuste lineal (Fig. 4.8); y la segunda utilizando ajuste polinomial de primer, segundo y tercer grado (Fig. 4.9).

La figura 4.8 muestra el ajuste lineal realizado sobre los perfiles. En cada gráfica se trazó una línea recta, calculada con la ecuación de una recta que pasa por dos puntos, donde el primer dato de la gráfica de Anomalía de Bouguer es el punto (X_1, Y_1) y el último es el punto (X_2, Y_2) . Una vez determinado el regional en los seis perfiles, se realizó la separación del residual, restando a los valores de la Anomalía de Bouguer el regional recién calculado. Con el residual así obtenido, se calcularon valores de profundidad.

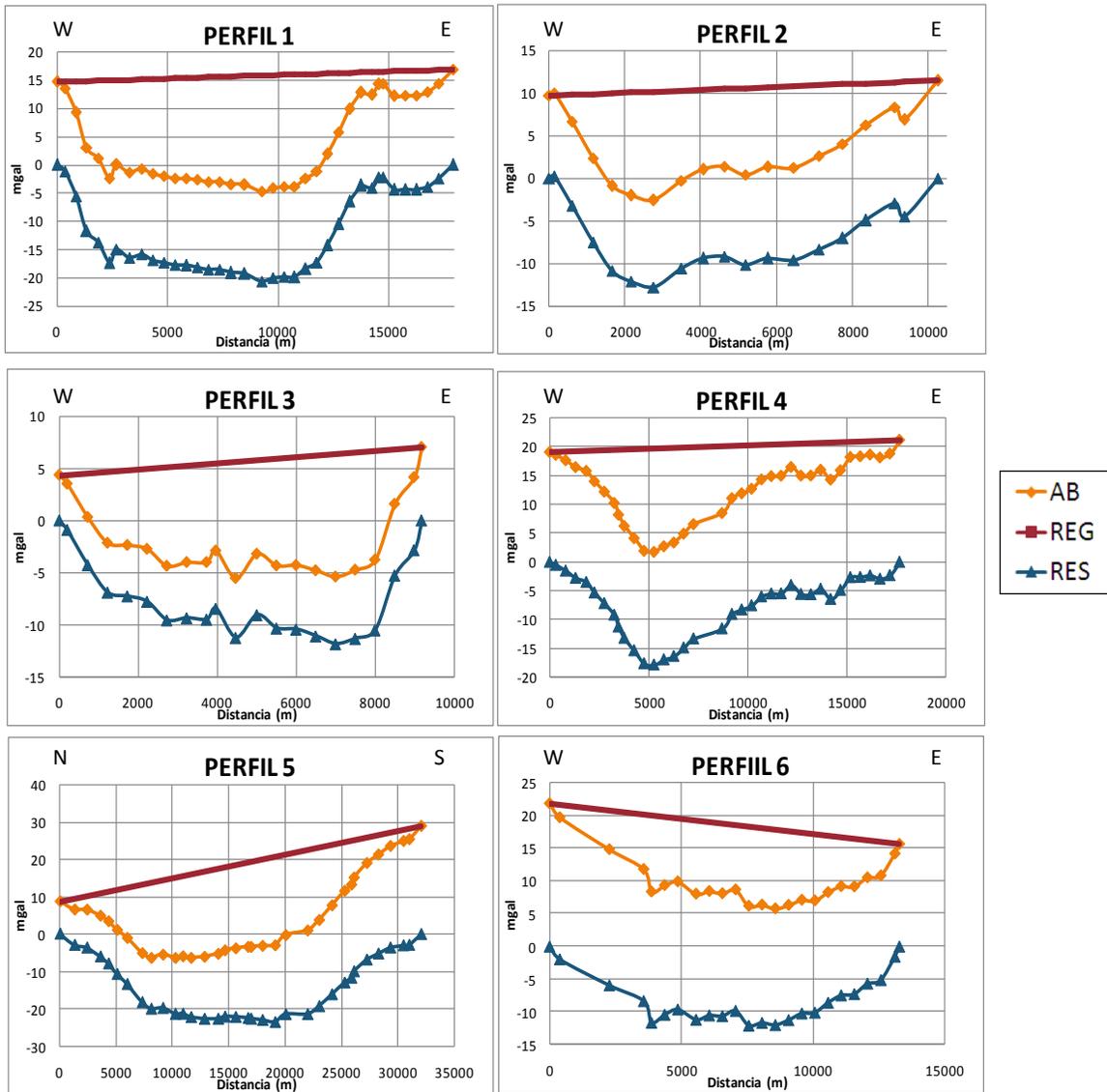


Fig. 4. 8 Gráficas de la Anomalia de Bouguer, regional y residual.

El comportamiento del residual en las gráficas es similar al de una cuenca, que en su mayoría presentan los valores mínimos hacia al centro, con elevaciones hacia los bordes y pendientes abruptas o en ocasiones suavizadas.

La segunda manera de obtener el regional fue integrando todos los perfiles de Anomalia de Bouguer para obtener una malla, generando a partir de ella superficies matemáticas que mejor se ajusten a los datos. Este proceso se realizó con el programa WinGLink,

desarrollado por GEOSYSTEM como un programa multidisciplinario de software para procesar, interpretar e integrar varias disciplinas geofísicas en un modelo único de interpretación. Con esto, se obtuvo el regional por ajuste polinomial de primero, segundo y tercer grado que se explican a continuación.

4.4.1. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Primer Grado

En el regional obtenido por ajuste de 1^{er} grado (Fig. 4.9a), podemos observar un plano inclinado hacia el NE del área de estudio, y el comportamiento de su anomalía tiene un rango que va de 10.0 a 14.4 mGal, según se observa en la escala. Después de separarlo de la Anomalía de Bouguer, obtuvimos el residual (Fig. 4.9b), el cual tiene un comportamiento similar a la Anomalía de Bouguer (Fig. 4.7), donde se observan los dos mínimos en el centro del área, característico de una cuenca, teniendo un aumento en los bordes del área pero con mayor pendiente entre las isólinas, comparado con la Anomalía de Bouguer, y un rango de anomalía residual de -18 a 16 mGal.

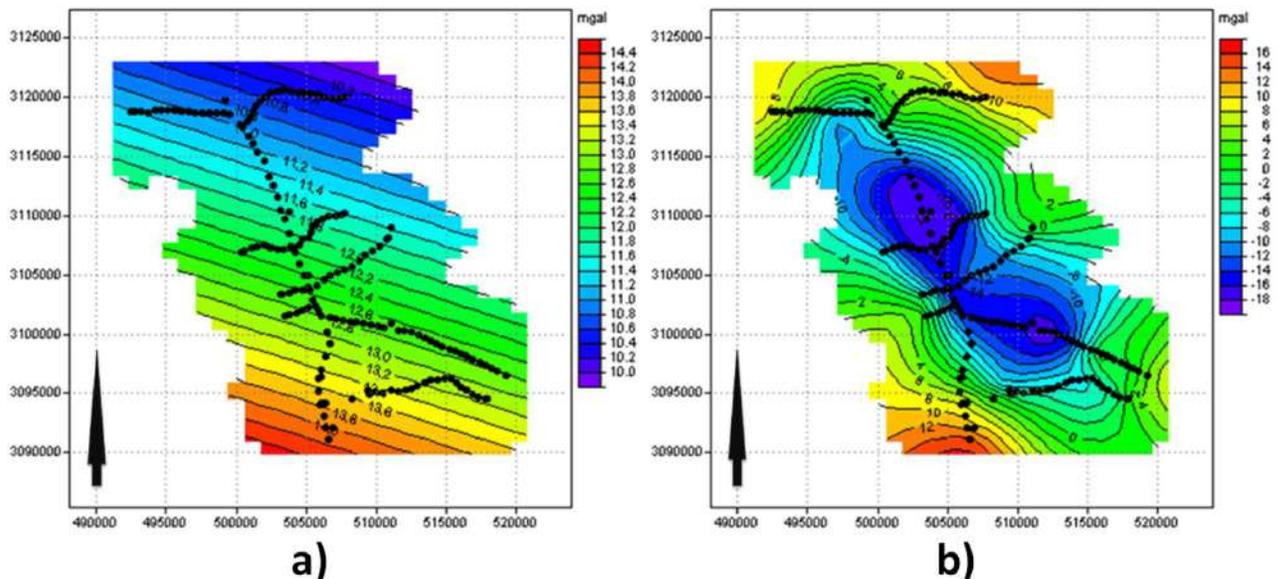


Fig. 4. 9 Separación del regional – residual por ajuste polinomial de primer grado.
a) Regional, b) Residual resultante.

4.4.2. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Segundo Grado

El ajuste polinomial de 2^{do} grado es un ajuste de la Anomalía de Bouguer a un paraboloides. En este caso, es un paraboloides elíptico (Fig. 4.10a), donde la elipse tiene una orientación de su eje mayor hacia el NW, presentando los mínimos en la parte central del área con valores menores a 4 mGal, los cuales van aumentando hacia los bordes hasta obtener valores mayores a 26 mGal. En la anomalía residual resultante (Fig. 4.10b) se observa un cambio en el área de mínimos comparada con la anterior; ésta se divide en dos cuencas y una pequeña subcuenca, con orientación NW-SE. En las cuencas observadas podemos encontrar mínimos de hasta -11 mGal, los valores máximos se hallan en los bordes este y oeste del área, encontrándose también en el lado oeste, un máximo de hasta 10 mGal.

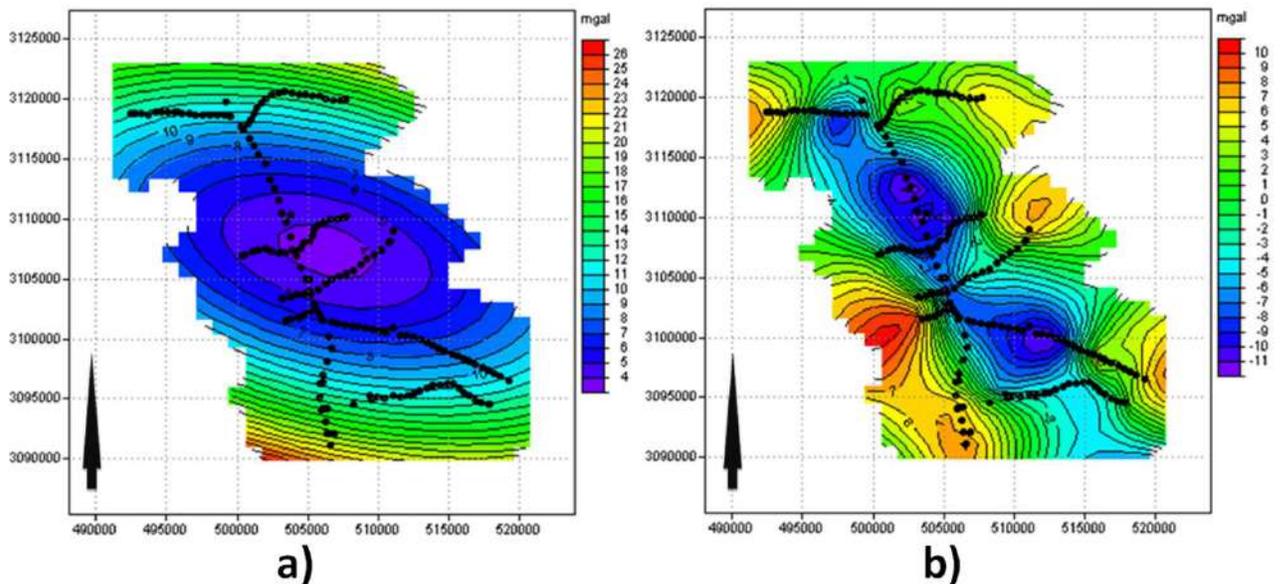
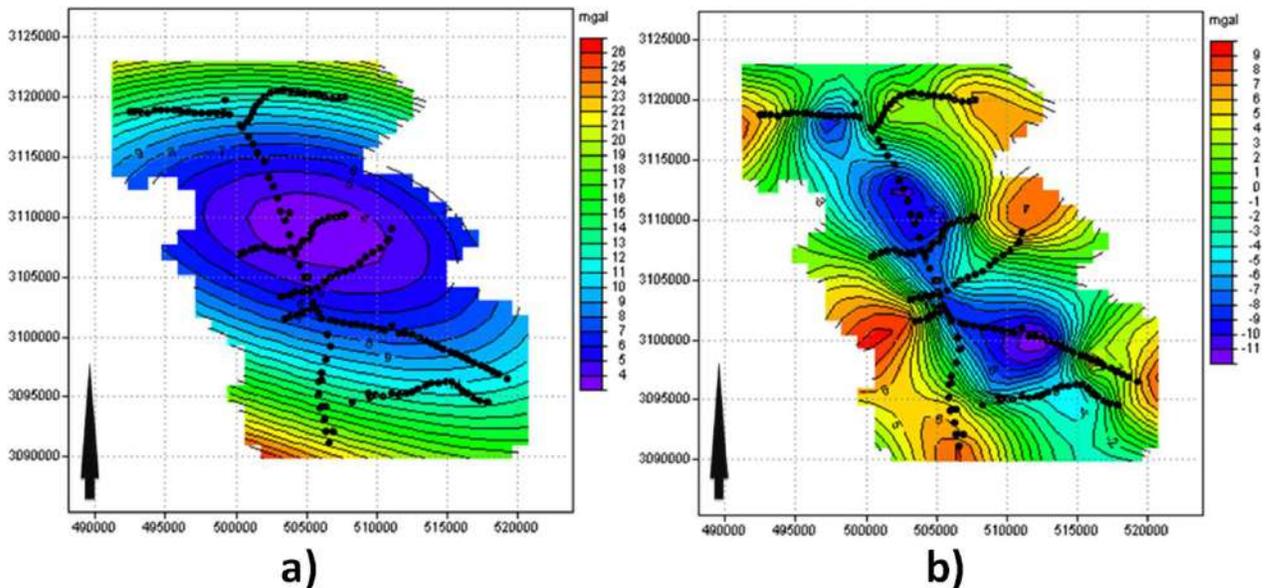


Fig. 4. 10 Separación del regional – residual por ajuste polinomial de segundo grado. a) Regional, b) Residual resultante.

4.4.3. Separación Regional-Residual por ajuste Polinomial de Tercer Grado

Se determinó el regional mediante el ajuste de una función polinomial de tercer grado (Fig. 4.11a), el cual se ve un poco similar al paraboloide de la figura 4.10a. Los mínimos en esta gráfica se presentan al centro y abarcan una mayor área comparada con el polinomio anterior, además ya no presenta una forma elíptica. También se observan valores mayores al Norte y Sur del área y sus isolíneas presentan una pendiente más suavizada comparada con la anterior, teniendo un rango de anomalía que va de 4 a 26 mGal. A diferencia del ajuste anterior, éste presenta un disminución del área abarcada por los mínimos, y comienza a suavizarse un poco más, esto quiere decir, que las isolíneas están menos abruptas que en la figura anterior.



**Fig. 4. 11 Separación del regional – residual por ajuste polinomial de tercer grado.
a) Regional, b) Residual resultante.**

5. INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA-GEOLÓGICA

La determinación de la profundidad al basamento se realizó de dos formas, primero se obtuvo la profundidad a partir de la expresión de la Losa de Bouguer. La segunda forma fue en base a la modelación de perfiles de la anomalía residual, utilizando el método de Talwani. A continuación se describen detalladamente estos procesos.

5.1. Determinación de la profundidad a partir de la Losa de Bouguer

Primero se determinó el regional por ajuste lineal en cada perfil. Después se eliminó el regional de la anomalía de Bouguer y con el residual resultante, se determinó la profundidad en cada perfil utilizando la expresión de la Losa de Bouguer (ec. 3.13). A continuación se describen las gráficas de profundidad así obtenidas para cada perfil.

5.1.1. Perfiles

A continuación se presenta la figura 5.1 en la cual se muestra el mapa geológico del área de estudio, así como la ubicación de los perfiles.

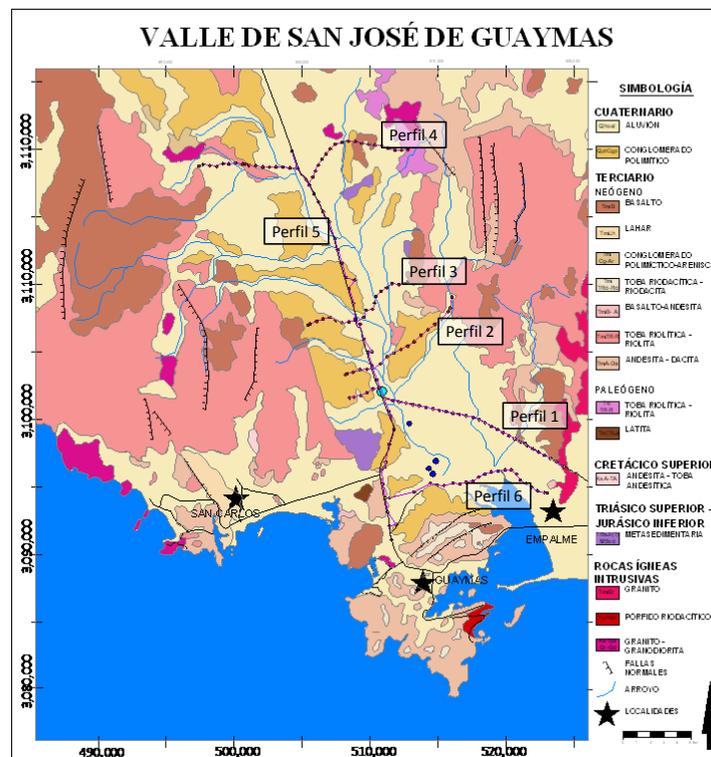


Fig.5. 1 Mapa Geológico donde se muestra los perfiles realizados.

En la figura 5.2 se muestra la gráfica de la Anomalía de Bouguer, el regional, el residual y la profundidad calculada para el Perfil 1. En el eje horizontal se presenta la distancia en m, en el eje vertical de la izquierda la gravedad en mGal, y en el eje vertical de la derecha la profundidad en m.

Este perfil tiene una orientación NW-SE y se encuentra ubicado entre la Sierra El Aguaje al Oeste y la Sierra Santa Úrsula al Este. Inicia sobre una elevación conformada por rocas riolíticas ubicada aproximadamente a 3 km de la estación base en el área de descanso El Valiente, pasando por éste. El perfil está trazado en su mayoría sobre la carretera del libramiento a Empalme, finalizando sobre el granófido que corta la carretera, al Norte afloran los Basaltos Empalme. La geología superficial en la parte central del perfil corresponde a aluvión y conglomerado (Fig. 5.1).

En la figura 5.2 (la profundidad se presenta en color rojo) podemos observar claramente las dimensiones de una cuenca mayor, en sus bordes presenta una pendiente muy marcada, y del lado sureste se observa además otra pequeña cuenca, debido a que se tocaron dos contactos. El perfil tiene una longitud de 17.95 km y se observan profundidades máximas de 1,000 m en la parte central del perfil.

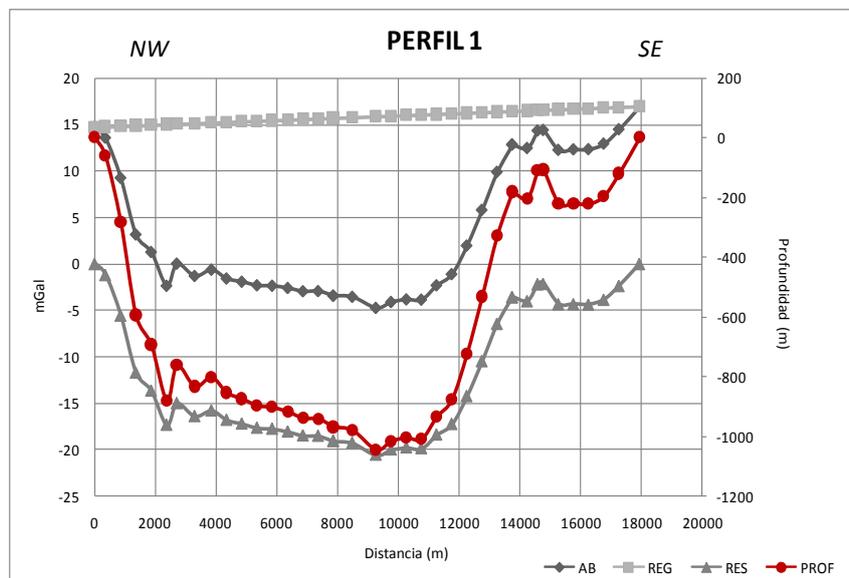


Fig.5. 2 Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 1.

La figura 5.3 corresponde a las gráficas obtenidas para el Perfil 2. Este perfil tiene una orientación NE-SW; hacia el Oeste, inicia en una elevación de roca riolítica y hacia el Este finaliza en la Sierra Santa Úrsula, dentro de un cañón del arroyo San José. El perfil corta en superficie materiales sedimentarios tales como aluvi3n y conglomerados; tiene una longitud de 10.25 km y la profundidad m3xima de la cuenca (en color rojo en la Fig. 5.3) se encuentra en la parte oeste, alcanzando 650 m. Hacia la parte este, la profundidad disminuye debido a que en esa direcci3n se encuentra un afloramiento de derrames de tobas riol3ticas correspondientes a la Sierra de Santa Úrsula.

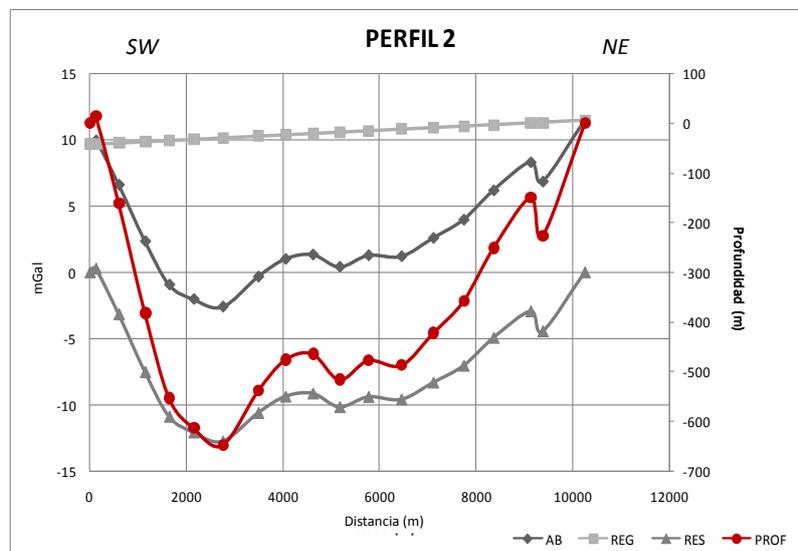


Fig.5. 3 Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 2.

La figura 5.4 muestra el Perfil 3, ubicado en la parte central del área. Tiene una orientación NE-SW y es casi paralelo al Perfil 2. Inicia al SW en la Sierra El Aguaje, donde se tiene un afloramiento de rocas basálticas, después atraviesa conglomerados y aluvi3n, y finaliza en el extremo NE en un afloramiento de rocas basálticas sobre la Sierra Santa Úrsula. En su parte central pasa por el ejido El Tigre así como por un arroyo con su mismo nombre, el cual es el drenaje principal del valle.

Como en los casos anteriores, el perfil muestra la forma de una cuenca, con pendientes marcadas en ambos lados, y en la parte central una morfología abrupta. Este perfil tiene una longitud de 9.17 km y es el que registra menor profundidad en el Valle de San José de Guaymas, llegando hasta 600 m.

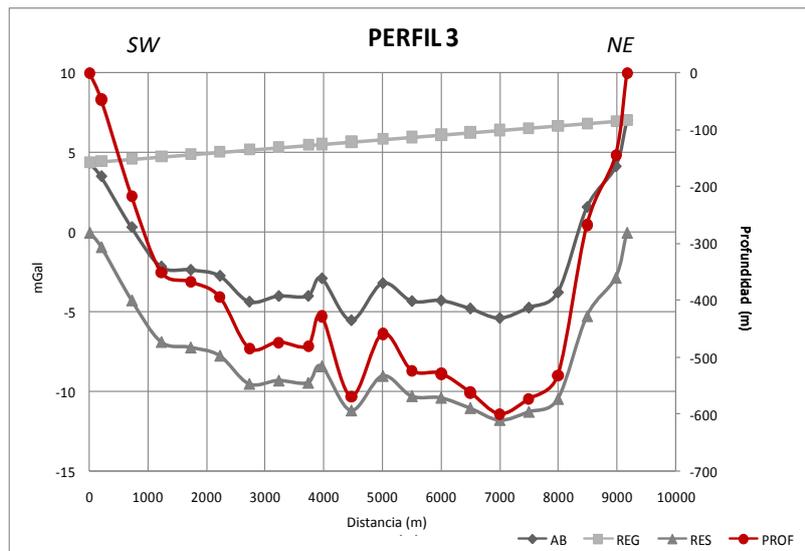


Fig.5. 4 Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 3.

La figura 5.5 corresponde al Perfil 4, ubicado al Norte del área de estudio, el cual tiene una orientación NE-SW girando casi E-W y una longitud de 17.68 km. Inicia al Oeste en el Cerro La Gloria, que es parte de la Sierra El Aguaje, donde afloran riolitas y tobas riolíticas. Después pasa por aluvión, el cual abarca casi toda el área excepto por pequeños derrames. El primer derrame se encuentra a aproximadamente 4 km del inicio del perfil, consta de riolitas y mide alrededor de 1.5 km. Posteriormente, pasa por la localidad La Zorra y por la carretera federal No. 15. Una localidad llamada San Isidro se halla a 5 km de la carretera y a poca distancia se encuentra un pequeño derrame basáltico, seguido nuevamente de aluvión. Al final del perfil se encuentra la Sierra Santa Úrsula donde afloran riolitas y tobas riolíticas.

En la gráfica se observa una cuenca profunda pero más angosta, en relación a los demás perfiles, la cual está rellena por aluvión. En el borde oeste se distingue una pendiente muy inclinada, característica que se ha presentado en el lado oeste del valle. Hacia el lado este, la profundidad del basamento disminuye debido al afloramiento de la Sierra Santa Úrsula. Este perfil presenta una de las partes más profundas del valle, ya que el relleno sedimentario llega a alcanzar espesores de 900 m.

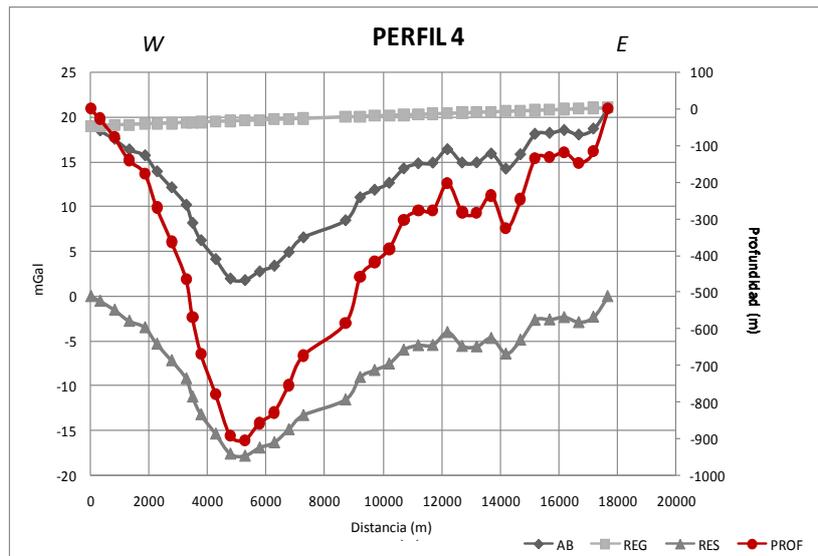


Fig.5. 5 Gráfica de la Anomalia de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 4.

El Perfil 5 se muestra en la figura 5.6. Tiene una orientación NW-SE con una longitud de 32 km, siendo el perfil más largo. Este perfil que atraviesa en forma longitudinal el Valle de San José, inicia en la parte norte del valle a 2 km de la localidad La Zorra y termina en la entrada a Guaymas. La mayor parte del perfil corta en superficie aluvión, y cerca de la ciudad de Guaymas pasa por andesita en un tramo menor a 3 km. Corta en su mayoría las zonas más profundas del área llegando a medir hasta 1,150 m en las cercanías de la localidad Nochebuena.

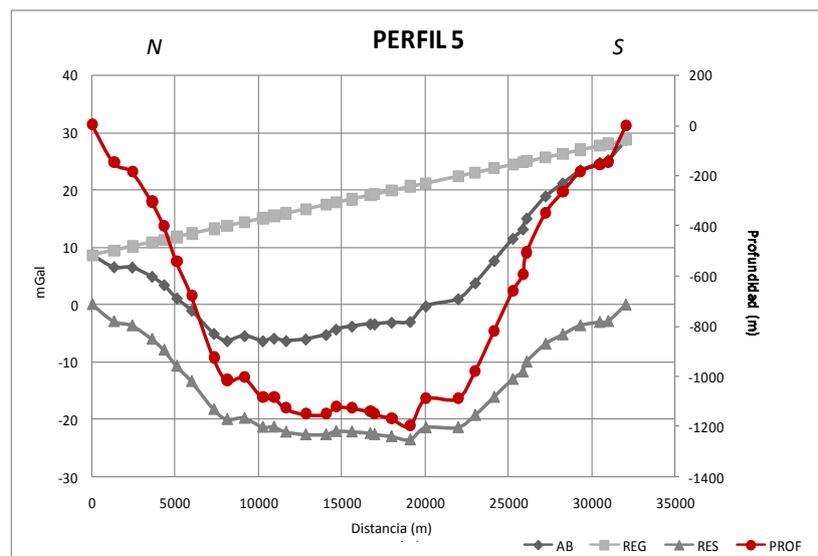


Fig.5. 6 Gráfica de la Anomalia de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 5.

El Perfil 6 se encuentra en la porción sur del área de estudio, con una orientación E-W (Fig. 5.7). Hacia el Oeste inicia en un afloramiento de andesitas, pasando cerca del Aeropuerto Internacional General José María Yáñez. Después el perfil corta aluvión, conglomerado, arenas y arcillas. Además pasa por el poblado de San José de Guaymas y cerca del Estero El Rancho. En la gráfica, se observa la profundidad (en rojo) correspondiente al basamento, bastante abrupta en la parte central, llegando a alcanzar profundidades de hasta 620 m.

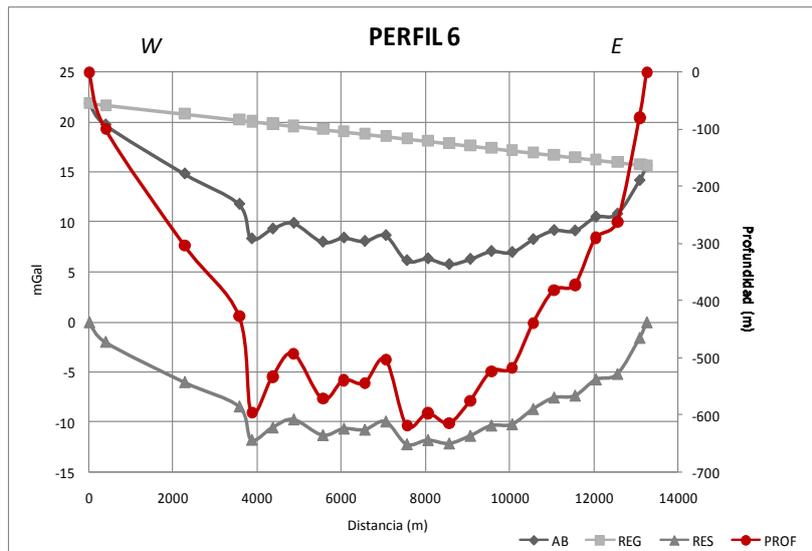


Fig.5. 7 Gráfica de la Anomalía de Bouguer, Regional y Residual en mGal y de la profundidad en m en el Perfil 6.

5.2. Modelación

Otra manera de determinar la profundidad al basamento fue la siguiente. Primero se generó una malla con todos los perfiles de Anomalía de Bouguer, utilizando el programa WinGLink, y el regional se obtuvo por ajuste polinomial de primero, segundo y tercer grado. Posteriormente se separó el regional de la Anomalía de Bouguer. Después de analizar el residual resultante en cada caso, se seleccionó el de segundo grado, debido a que éste se aproximaba mejor a las características del valle, ya que simula un paraboloides.

Es importante resaltar que al momento de ir aumentando el grado de ajuste, el regional se va pareciendo más a su Anomalía de Bouguer; al parecerse más, hace que el residual

cada vez sea menor y tienda a ser imperceptible. Por eso, se recomienda que superficies de grados mayores a cuatro no se usen para definir un regional (Burger, 1992).

Finalmente se trazaron los perfiles sobre el residual seleccionado (ajuste de segundo grado), y se procedió a modelar los perfiles utilizando el método de Talwani. El mapa de anomalía residual y la ubicación de los perfiles se muestran en la figura 5.8.

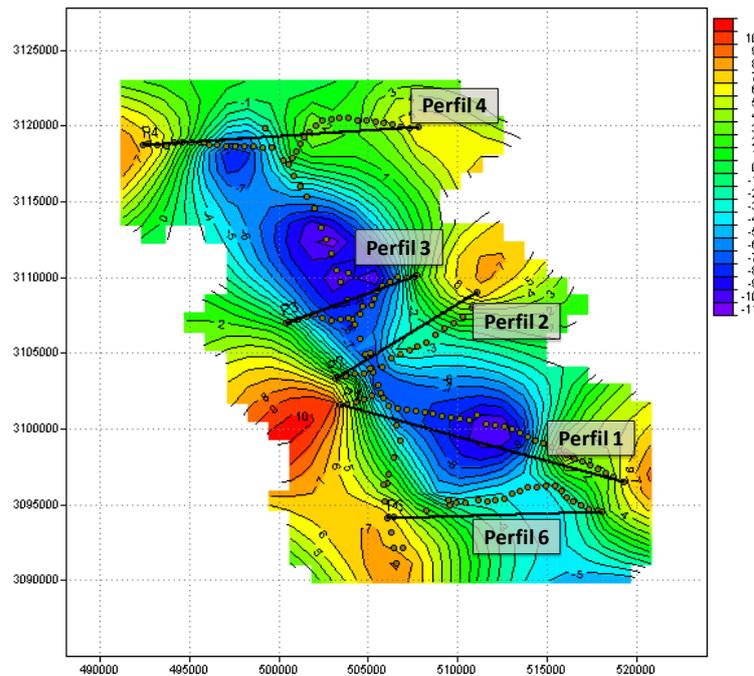


Fig. 5. 8 Mapa de la anomalía residual y ubicación de los perfiles.

5.2.1. Método de Talwani

En el mapa de anomalía residual, se trazaron 5 perfiles transversales al valle, de tal forma que coincidieran con la ubicación de las estaciones, y después se modelaron. Para la modelación es necesario definir el número de capas del modelo, así como las densidades para cada capa. Para este estudio se consideraron dos capas con densidades diferentes, la del basamento (2.67 gr/cm^3) y la del relleno sedimentario de la cuenca (2.2 gr/cm^3).

El Método de Talwani aproxima un cuerpo 2D irregular, reemplazando la sección transversal del cuerpo por un polígono. Para utilizar este programa, se propone un

modelo geológico (número de capas, espesores y densidades) y se calcula su respuesta (gravedad calculada). Esta respuesta se compara con el perfil de la anomalía residual (datos), y el modelo geológico se modifica hasta que se logre el mejor ajuste entre ellos. La figura 5.9 muestra dos gráficas, en la parte superior se presenta el perfil de anomalía residual (en mGal) y la respuesta calculada para el modelo. En la gráfica inferior se presenta el modelo geológico propuesto.

Los perfiles modelados se trazaron sobre los perfiles medidos para obtener un modelo más real, por lo cual se describen con el mismo nombre. Se hace también una descripción de la correlación del perfil con la geología del área basándose en los mapas geológicos de las figuras 2.1 y 2.2.

La figura 5.9 muestra el Perfil 1, en la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada. En la gráfica inferior se presenta el modelo geológico propuesto, donde se observa la morfología del basamento. En el extremo este se ve una pequeña subcuenca. Las profundidades máximas que se registraron son de 1,100 m en el fondo de la cuenca. Hacia el lado este del perfil, en las cercanías de la Sierra Santa Úrsula, podemos encontrar afloramientos de rocas basálticas del Terciario y granofido donde se hizo el amarre final de este perfil. Esto se puede relacionar con la disminución de profundidades obtenidas hacia la parte este del perfil.

Si comparamos los dos residuales obtenidos para el Perfil 1 (Figs. 5.2 y 5.9), observamos que en general tienen la misma forma, pero el obtenido con el ajuste polinomial de segundo grado es más suave (Fig. 5.9, gráfica superior).

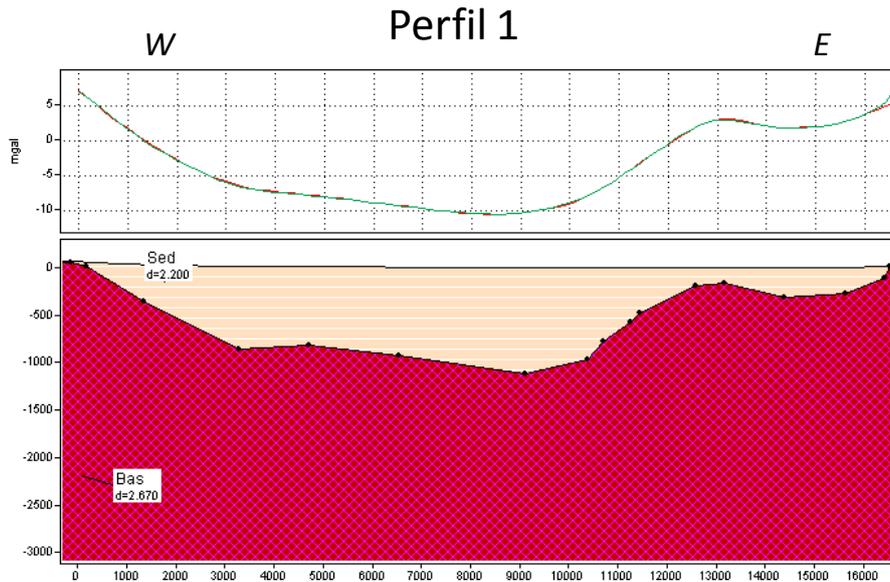


Fig. 5. 9 Perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido

La figura 5.10 muestra el modelo geológico para el Perfil 2. En el lado oeste del perfil se observa la cuenca bien definida, con profundidades máximas de 1,000 m. Hacia el lado este el basamento disminuye su profundidad debido a un afloramiento de rocas riolíticas que se encuentra al final del perfil.

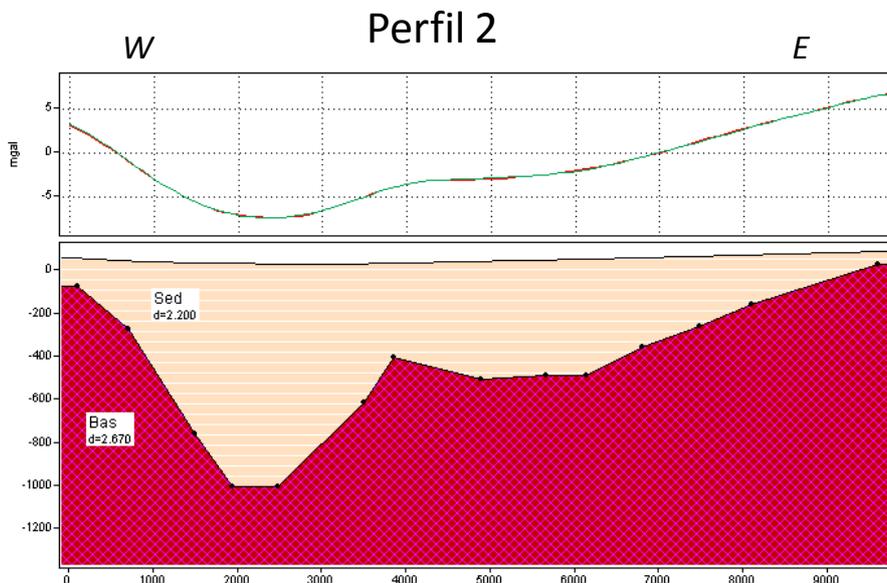


Fig.5. 10 Perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido

El modelo geológico para el Perfil 3 se muestra en la figura 5.11. Este perfil está ubicado en la parte central del área, y es aquí donde se registró la porción más somera de la cuenca, ya que el basamento tiene una profundidad de 600 m. Este perfil se comporta un poco simétrico, con pendientes menos abruptas que las anteriores. En los extremos este y oeste donde se hicieron los amarres, se encuentran afloramientos de roca basáltica. Además, del lado este se tiene muy próximo un afloramiento de rocas metasedimentarias en la Sierra Santa Úrsula, que se considera como parte del basamento cristalino, y se relaciona con la disminución de la profundidad del basamento observada en la parte este del perfil.

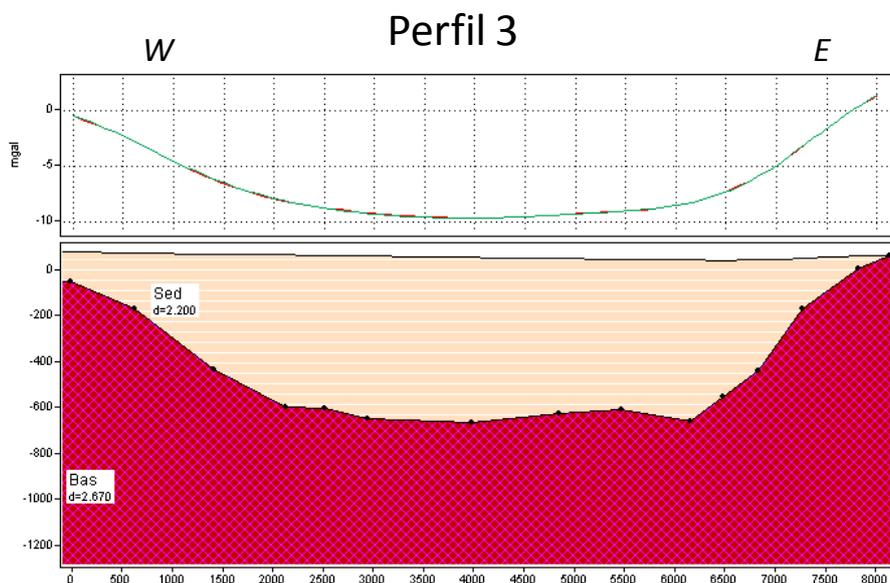


Fig.5. 11 Perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido

En la figura 5.12 se muestra el modelo geológico para el Perfil 4, donde se observa una cuenca mayor y una subcuenca. La cuenca mayor está limitada por fuertes pendientes y podemos encontrar profundidades de hasta 1,000 m. La subcuenca presenta bordes suaves y una profundidad de 430 m aproximadamente y se encuentra curiosamente bajo un flujo riolítico tobáceo. En el lado este del perfil podemos encontrar en sus cercanías algunos afloramientos de rocas que forman parte del basamento, conformado por granito y rocas metasedimentarias, dando como resultado la zona de menor profundidad. El extremo oeste se amarró en un pequeño afloramiento de granito, el cual se asocia a la disminución de profundidad en ese extremo.

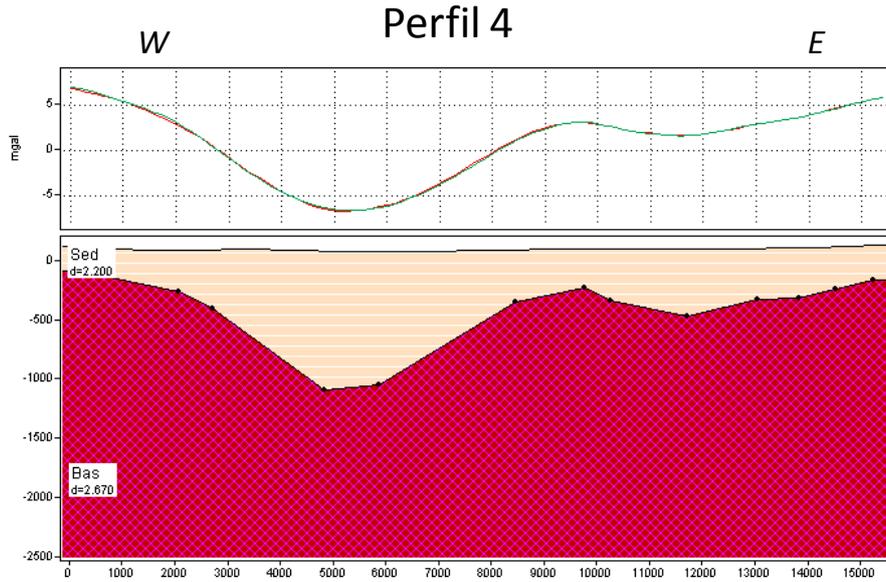


Fig.5. 12 Perfil 4. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido

En la figura 5.13 se presenta el Perfil 6 localizado en la porción sur del área de estudio. A diferencia de los otros perfiles, la mayor profundidad se encuentra hacia el lado este, llegando a medir hasta 700 m. La disminución de profundidad del basamento en sus extremos este y oeste se relaciona con afloramientos cercanos al perfil. En el lado oeste podemos encontrar el afloramiento más grande de rocas metasedimentarias del área de estudio y del lado este se hizo el amarre sobre rocas basálticas que cubren en su parte al granófido. La parte central en donde se encuentra la parte más profunda de este perfil se puede relacionar con el Estero El Rancho, ya que se encuentra muy cerca de esta área.

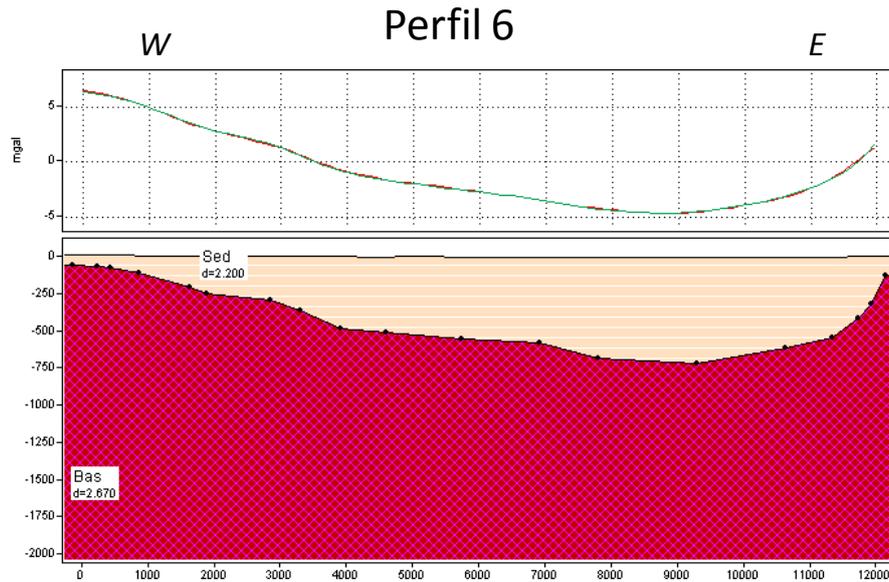


Fig.5. 13 Perfil 6. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta del modelo geológico. En la gráfica inferior se muestra el modelo geológico obtenido

5.3. Configuración del Basamento

Como se mencionó anteriormente, se generaron en WinGLink las cuadrículas de la Anomalía de Bouguer, el Regional y el Residual. La malla de la anomalía residual (obtenida por ajuste del regional de segundo grado) se importó al programa Surfer, donde se calculó la profundidad utilizando la expresión de la Losa de Bouguer. Esto se realizó con una herramienta matemática de este programa, la cual procesa operaciones básicas con las cuadrículas. Después se configuraron las profundidades al basamento obtenidas que se presentan la figura 5.14. Finalmente, se generó en Surfer una configuración en 3 dimensiones (3D), la cual se muestra en la figura 5.15.

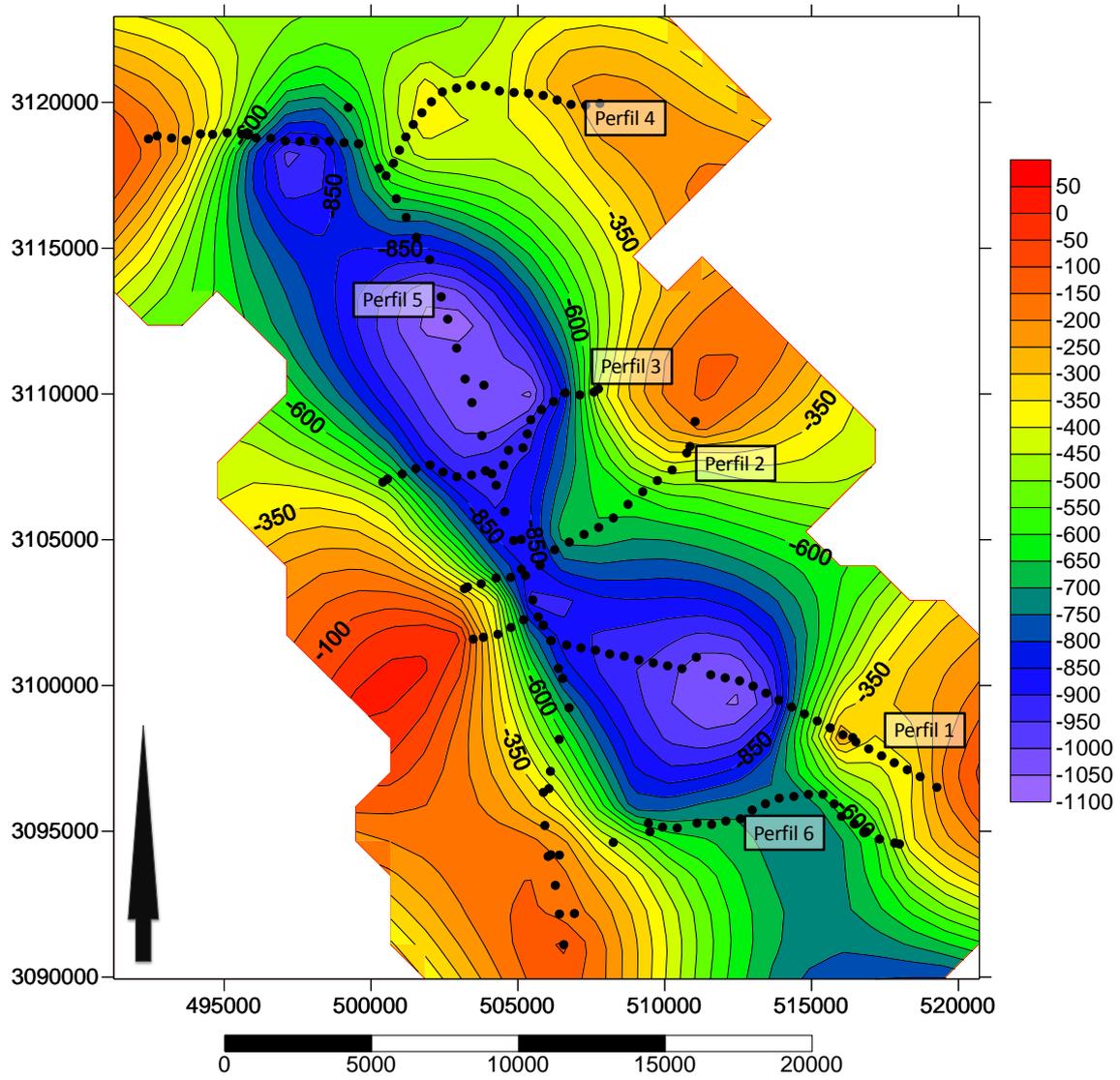


Fig. 5. 14 Mapa de profundidad del basamento del Valle de San José de Guaymas (m).

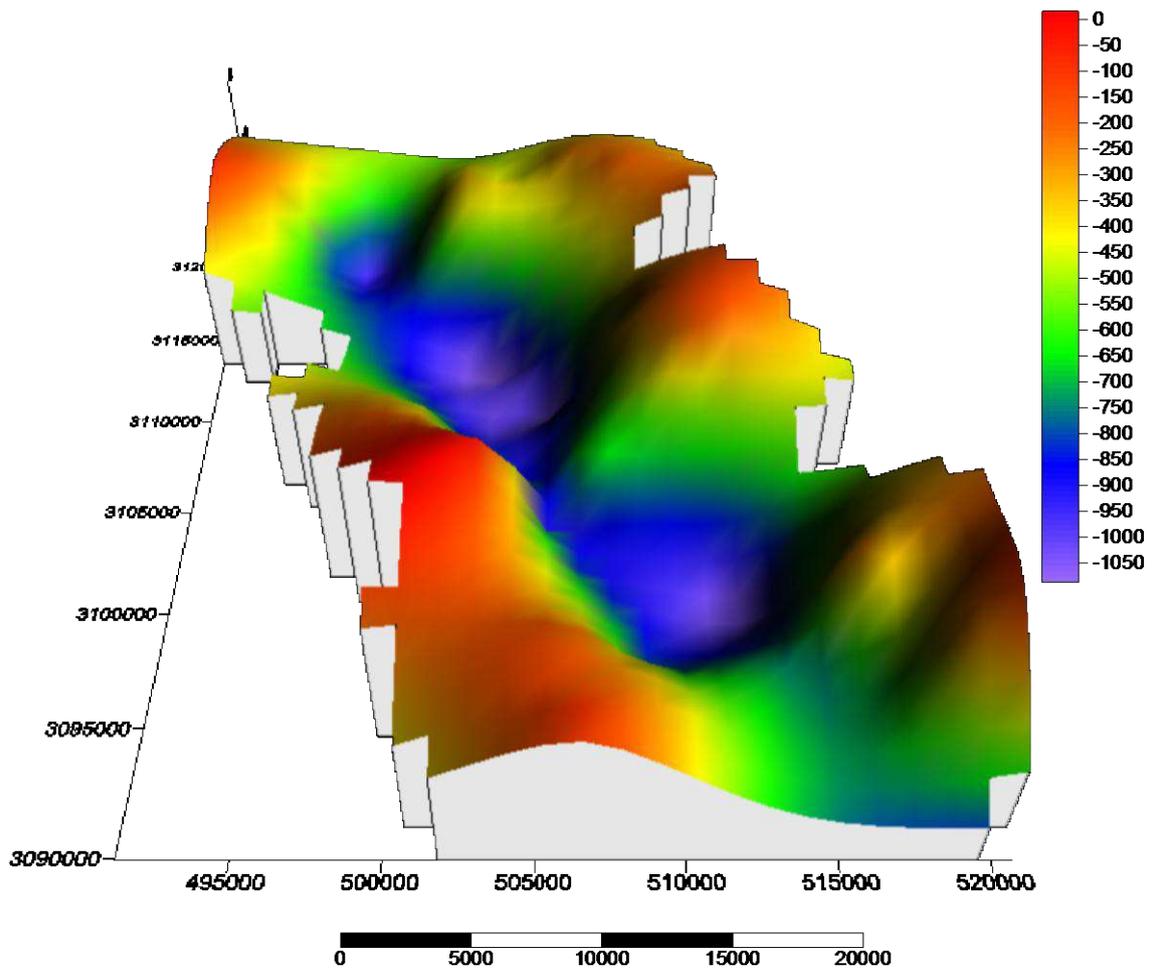


Fig. 5. 15 Configuración en 3D de la profundidad del basamento del Valle de San José de Guaymas (m).

6. CONCLUSIONES

Dentro del Valle de San José de Guaymas, la morfología del basamento es controlada por dos cuencas principales, con orientación NW-SE, similar a las cuencas pullapart en una zona de rift distensional.

En base a la configuración del basamento así como a su geología superficial, se puede inferir que hay dos fallas con orientación NW-SE, delimitando a la cuenca.

La profundidad máxima promedio determinada para el basamento fue de 850 m. La cuenca más profunda se encuentra en la porción norte, con profundidades máximas de 1,100 m, en las cercanías del poblado Nochebuena.

El basamento cristalino a nivel regional está representado por Rocas Intrusivas y Metamórficas (metasedimentarias, granodioritas, y granitos) con edades del Triásico al Mioceno. El relleno sedimentario está conformado principalmente por aluvión, conglomerado, gravas, arenas y lentes arcillosos, según se describe en las columnas litológicas de los pozos dentro del área de estudio.

La profundidad del basamento nos indica la existencia de un relleno sedimentario potente, con buenas posibilidades para contener un acuífero. Para definir la estratigrafía de la zona, se recomienda utilizar métodos eléctricos o electromagnéticos

Con lo que respecta al procesamiento de datos, los perfiles de profundidades obtenidos a partir de la Losa de Bouguer y a partir del modelo de Talwani son similares, ya que ambos presentan los rasgos más importantes, sin embargo, los modelos obtenidos con el método de Talwani son mucho más suaves. Esto se debe principalmente al ajuste polinomial aplicado a toda la malla (formada con todos los perfiles). Considero que estos modelos son más confiables.

Para tener una interpretación más completa del comportamiento del basamento, se recomienda trazar un perfil orientado E-W, a la altura de la localidad Nochebuena. Este perfil no se realizó porque no se consiguió permiso del dueño del predio. También recomiendo correlacionar y calibrar estos resultados con otros métodos geofísicos.

Considero que la realización de este estudio es de gran importancia, ya que en esta área se han tenido problemas de sobreexplotación del acuífero desde mediados de la década de los sesenta (1968), los estudios realizados son escasos y algunos no están actualizados. Por lo tanto, desde el punto de vista geohidrológico, estos estudios son muy útiles, ya que nos ayudan a definir la geometría del acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- AMAYA, M.R., ROLDAN, Q.J., McDOWELL, F.W., 1994. Sobre la edad de la Formación Tarahumara en la Región del río Yaqui, Sonora. XX aniversario del departamento de Geología, Hermosillo, Sonora.
- ARIVIZU N.J; GONZALES, E.R. 2009. Modelo conceptual de la intrusión salina del Acuífero de San José de Guaymas, VII Congreso Nacional Aguas Subterráneas, Asoc. Geoh. Mex., San Carlos, Nuevo Guaymas, Sonora.
- BARRERA-GUERRERO S. y VIDAL-SOLANO J. R., 2010, Nuevas evidencias del volcanismo anorogénico del Mioceno medio en el NW de México: Diversidad volcánica del evento hiperalcalino en La Sierra Libre, (resumen en extenso), en XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos: Libro de resúmenes, Instituto Nacional de Geoquímica. Vol. 16, No. 1, pp. 229-234.
- BOCKHOVEN, N.T., 1980, Reconnaissance geology of the Yecora-Ocampo area, Sonora and Chihuahua, Mexico. Ph. D. Thesis, Univ. of Texas, Austin.
- BOYD, M. T. Introduction to Geophysical Exploration. Module Gravity. [En línea] Australia, University of Melbourne, 1999, [citado Diciembre 2010]. Disponible en :<http://www.earthsci.unimelb.edu.au/ES304/index.html>
- BURGER, H.R.(1992), Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface, Prentice Hall.
- CANTOS-FIGUEROLA .J. 1974. Tratado de Geofísica Aplicada. 2ª. Edición. Litoprint, España, Capitulo II, Metodo Gravimetrico, p. 35-104.
- COCHEME, J.J. and DEMANT, A., 1991, Geology of Yecora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. In Perez-S.E. and Jacques-A., C, eds., Study in Sonoran Geology. Geol. Soc. Am., Special Paper 254, pp. 81-94.

- COCHEME, J.J., 1985, Le magmatisme cénozoïque dans le nord-ouest du Mexique. Cartographie de la région de Yecora- Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et du passage à un régime distensif. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. d'Aix-Marseille, France.
- DAMON, P. E., M. SHAFIQUILLAH, J. ROLDÁN-QUINTANA, AND J.-J. COCHEMÉ (1983), EL BATOLITO Laramide (90-40 Ma) de Sonora, in Memoria XV Convención Nacional, Asoc. de Ing. De Minas, Metal., y Geól. De Méx., México City pp. 65-95.
- DAMON, P.E., 1978, Mineralization in time and space in northwestern Mexico and southwestern United States. I Simposio; sobre Geología y potencial Minero del Estado de Sonora. Instituto de Geología de la UNAM.
- DAMON, P.E., CLARK, F.K., SHAFIQUILLAH, M., ROLDAN Q.J., ISLAS, L.J., 1981. Geology and mineral deposits of southern Sonora and the Sonoran Sierra Madre Occidental. In: Geology of Northwestern Mexico and Southern Arizona field-guides and papers. Geol. Society of America; Annual Meeting.
- DICKINSON, W.R., 1989, Tectonic setting of Arizona through geologic time, in Jenny, J.P., Reynolds, S.J., eds. Geologic Evolution of Arizona: Tucson, Az. Geol Society digest 17, p. 1-16
- DICKINSON, W.R., 1979. Cenozoic plate setting of the Cordilleran region in the United States, in Armentrout, J.M. Cole, M.R. and TerBest, H. Jr., eds. Relations of Tectonics to ore deposits in southern Cordillera: Arizona Geol. Soc. Digest, v. 14 p. 113-135.
- ELSTON, W.E., 1976. Tectonic significance of the mid-Tertiary volcanism in the Basin and Range province: A critical review with special reference to New Mexico, in Elston, W. E., and Northrop, S. A. (eds.), Cenozoic volcanism in southwestern New Mexico: New Mexico Geological Society, Special Publication no. 5, p. 93-102.

GASTIL, G., KRUMMENACHER, D., MINCH J. 1979. The record of the Cenozoic volcanism around the Gulf of California. Geol. Soc. Of America Bull. Part. I. V. 90 p. 839-857.

GRANT, F.S. & WEST, G.F. (1965) Interpretation theory in applied geophysics. New York, McGraw-Hill. Kearey P.

HAMILTON, W., 1969. Mesozoic California and the underflow of the Pacific Mantle. Geol. Soc. Of America Bull. V. 80, no.12, p 2409-2430.

HUBBERT M. K., 1948. A line-integral method of computing the gravimeter effects of two dimensional masses. Geophysics, XIII. P265-273. Tulsa

HUMPHREYS, E.D. WELDON, R.J., 1986. Pacific-North American relative motion in southern California. EOS, American Geophysical Union Transactions, v.67, p. 905.

INGLE, J.C., 1973. Neogene marine history of the Gulf of California, (abs_GSA Abstracts with program, v.5, p.62.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI). Información Geográfica. Geodesia [en línea]. México. [citado Septiembre, 2010] Sitio del INEGI en Internet: www.inegi.org.mx.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA, (INEGI), Carta Topográfica 1:50000, Guaymas G12B11

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA, (INEGI), Carta Topográfica 1:50000, José María Morelos y Pavón H12D18

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA, (INEGI), Carta Topográfica 1:250000, Sierra Libre H12-11.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA, (INEGI),
Carta Topográfica 1:250000, Guaymas G12-2.

JOHNPEER G.D., 1977 - Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area,
Sonora, México. MS thesis, Arizona State University.

KEAREY, P., BROOKS, M., & HILL, I. (2002). An introduction to geophysical
exploration. Third Edition. Blackwell Science Ltd., Oxford.

LYLLE, M., NESS, G.E., 1991. The opening of the Southern Gulf of California. Eds. Dauphin,
J.P., Simoneit, R.T. The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG Memorier
43 p

MARTINEZ L.R. 2000. Estudio geohidrológico de la Cuenca Arroyo Guaymas con énfasis en
el desarrollo urbano. Tesis Profesional, Dept. Ing. Civil, Universidad de Sonora.

MARTINEZ R. S. 2007. Modelo Geoeléctrico del Acuífero del Valle de Guaymas y su
Intrusión Salina usando Sondeos Electromagnéticos Transitorios. Tesis Doctoral, Cicecese,
Ensenada Baja California, p 1-5, 74-85

McDOWELL, F.W., CLAUBAUGH, S.E., 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental
and their relation to the tectonic history of western Mexico. Geol. Soc. America. Special
paper 180, p 113-124.

MORA, A.G., 1992, History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Ursula, Sonora,
Mexico, master of arts thesis, Department of Geology, University of Texas, Austin, p 153.

MORA-KLEPEIS, G., MCDOWELL, F.W., ORTEGA-RIVERA, A., 1997, Late Miocene
felsic volcanism in west-central Sonora: An expression of rift or subduction-related
magmatism.: Salt Lake City, Abstracts with Programs, Utah, Geological Society of
America, Annual Meeting, A481.

- NOURSE, J.A., ANDERSON, T.H., SILVER, L.T., 1994. Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico. *Tectonics*, Vol. 13, no 5 p. 1161-1182.
- OLGUÍN-VILLA, 2010, Estudio físico y químico del volcanismo hiperalcalino en la región de Cataviña, Baja California, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de licenciatura, 26-34.
- OSKIN, M., STOCK J. Y MARTIN-BARAJAS, A., 2001, Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California: *Geology*, 29(5), 459-462.
- PARASNIS, D.S., 1962, *Principios de Geofísica Aplicada*, 1970 Traducción, Paraninfo Madrid.
- RADELLI, L., 2005, Oligo-Miocene evolution of Sonora-Baja California, Mexico - a segment of the North American margin. *Bol. Depto. Geol. UniSon*, 2005, Vols. 18 y 19, p. 153 – 174
- RINEY, B. Las Placas Tectónicas. Como se formaron Baja California y el Mar de Cortés. [en línea] E.E.U.U. Museo de Historia Nacional de San Diego [citado Diciembre 2010].
Disponible en: <http://www.oceanoasis.org/fieldguide/geology1-sp.html>
- ROLDAN, Q.J., MORA-KLEPEIS, G., CALMUS, T., VALENCIA M.M., LOZANO S.R., 2004. El graben de Empalme, Sonora, México: Magmatismo y tectónica extensional asociada a la ruptura inicial del Golfo de California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21. Núm. 3, 2004. p. 320-324.
- SCINTREX LTD., 2006. CG-5 Scintrex Autograv System, Operation Manual. Document Part N°. 867700. Rev.1. Canada
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, (SGM), 2000. Carta Geológica-Minera. G12-2
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, (SGM), 2000. Carta Geológica-Minera. H12-11

- SHERIDAN, M.F., WILSON, R.T., and JOHNPEER, G.D., 1979, Geology of the coastal region near Guaymas, Sonora. Bol. Depto. Geol. UniSon, v.2, n1, p. 1-15, Hermosillo, Sonora, México.
- SPENCER, J.E., and REYNOLDS, S.J., 1989, Middle Tertiary tectonics of Arizona and adjacent areas, in Jenney, J.P., and Reynolds, S.J., eds., Geologic evolution of Arizona: Arizona Geological Society Digest 17, p. 539-573.
- STOCK, J.M., LEWIS, C.J., NAGY, E.A., 1999, The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 9, 53-74.
- TALWANI, M. & EWING, M. - 1960 - Rapid computation of gravity attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape. Geophysics, 25:203-225.
- TALWANI, M., WORZEL, J.L. & LANDISMAN, M., 1959. Rapid Gravity computation of two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Journal of the Geophysical research, Volumen 64, No. 1, p 49- 59
- TÉCNICAS MODERNAS DE INGENIERÍA, S.A. (TIM). 1975. Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la costa de Guaymas, Sonora
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E., and KEYS, D.A., 1976, Applied Geophysics: Cambridge University press.
- VEGA G. R.; De La O V. M.; VEGA G. L. Y ARAUX S. E. 2004; Geología Urbana y Riesgos Geológicos de la Region de Guaymas y San Carlos, Sonora. Universidad de Sonora Colección de Textos Académicos. p 15-61 y 113-170.
- VEGA G.L., VEGA G.R., MARTÍNEZ L.R. 2005. Unidades Geohidrológicas y familias de agua de la Subcuenca arroyo Guaymas, Sonora.

VEGA G.R. 1996. La Sierra de Mazatán, Sonora, México: Geología y análisis estructural de un Complejo Metamórfico en la parte sur de la provincia de <<Basin and Range>>. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.

VIDAL-SOLANO, J.R., 2005, Le volcanisme hyperalcalin d'âge Miocène Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora): Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique: Universidad Paul Cézanne, tesis doctoral, 256 p.

WILSON, I.F., ROCHA, V.S., 1946, Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, Mpio. de San Javier, Estado de Sonora: México, D.F., Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México, Bol. 49.

ZOBACK, M.L., ANDERSON, R.E, and THOMPSON, G.A., 1981, Cainozoic evolution of the state of stress and style of tectonism of the Basin and Range Province of the western United States. *Phil. Trans. R. Soc. London*, v. 300, pp. 407-434.

APÉNDICE

PERFIL 1 GRAVIMETRICO

NW Carretera de Cobro (Líbramiento Guaymas) SE

ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mGal)	C _{AL}	C _B	C _{LAT}	C _T	A _B (mGal)	REGIONAL	RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.75								
SJP1G1	503477	3101592	90	2602.69	18.51	-5.53	0.32	8.61	14.68	14.68	0.00	0.02
SJP1G2	503824	3101654	61	2610.14	9.56	-2.86	0.28	6.33	13.54	14.72	-1.19	-60.28
SJP1G3	504317	3101759	45	2611.44	4.63	-1.38	0.20	4.25	9.22	14.79	-5.56	-282.47
SJP1G4	504760	3101993	34	2609.09	1.23	-0.37	0.05	3.04	3.13	14.85	-11.72	-594.94
SJP1G5	505194	3102254	35	2606.90	1.54	-0.46	-0.13	3.31	1.25	14.91	-13.66	-693.87
SJP1G6	505691	3102354	26	2606.14	-1.23	0.37	-0.19	2.45	-2.38	14.97	-17.35	-881.25
SJP1G7	505863	3102064	30	2606.73	0.00	0.00	0.00	3.19	0.00	15.01	-15.01	-762.42
SJP1G8	506125	3101539	24	2607.53	-1.85	0.55	0.35	2.00	-1.33	15.09	-16.41	-833.54
SJP1G9	506658	3101387	24	2607.98	-1.85	0.55	0.45	2.12	-0.65	15.16	-15.81	-802.66
SJP1G10	507146	3101290	26	2606.01	-1.23	0.37	0.52	2.65	-1.60	15.22	-16.82	-853.97
SJP1G11	507643	3101211	31	2604.34	0.31	-0.09	0.57	2.85	-1.94	15.28	-17.22	-874.51
SJP1G12	508126	3101082	30	2604.24	0.00	0.00	0.66	2.69	-2.33	15.34	-17.67	-897.33
SJP1G13	508621	3101006	30	2604.20	0.00	0.00	0.71	2.62	-2.38	15.40	-17.78	-902.86
SJP1G14	509118	3100876	26	2604.87	-1.23	0.37	0.80	2.49	-2.62	15.47	-18.08	-918.30
SJP1G15	509609	3100779	27	2604.41	-0.93	0.28	0.86	2.33	-2.97	15.53	-18.50	-939.26
SJP1G16	510098	3100676	28	2604.26	-0.62	0.18	0.93	2.20	-2.95	15.59	-18.54	-941.58
SJP1G17	510587	3100579	25	2604.38	-1.54	0.46	1.00	2.17	-3.44	15.65	-19.10	-969.74
SJP1G18	511076	3100970	23	2604.79	-2.16	0.65	0.74	2.34	-3.57	15.73	-19.30	-979.92
SJP1G19	511566	3100367	18	2605.10	-3.70	1.11	1.14	1.51	-4.76	15.83	-20.58	-1045.19
SJP1G20	512056	3100263	19	2605.53	-3.39	1.01	1.21	1.43	-4.13	15.89	-20.01	-1016.26
SJP1G21	512549	3100160	17	2606.46	-4.01	1.20	1.28	1.15	-3.84	15.95	-19.79	-1005.10
SJP1G22	513008	3099978	13	2607.39	-5.24	1.57	1.40	0.93	-3.87	16.01	-19.88	-1009.49
SJP1G23	513446	3099738	13	2609.07	-5.24	1.57	1.56	0.63	-2.33	16.07	-18.41	-934.68
SJP1G24	513884	3099500	11	2610.57	-5.86	1.75	1.72	0.60	-1.13	16.13	-17.27	-876.94
SJP1G25	514319	3099262	12	2613.16	-5.55	1.66	1.88	0.70	1.94	16.20	-14.26	-724.02
SJP1G26	514757	3099024	14	2615.93	-4.94	1.47	2.04	1.17	5.77	16.26	-10.49	-532.62
SJP1G27	515195	3098784	16	2619.22	-4.32	1.29	2.20	1.37	9.86	16.32	-6.46	-328.18
SJP1G28	515633	3098546	18	2621.46	-3.70	1.11	2.36	1.48	12.79	16.38	-3.59	-182.36
SJP1G29	515633	3098546	18	2621.48	-3.70	1.11	2.36	1.48	12.81	16.38	-3.57	-181.14
SJP1G30	516066	3098309	13	2622.37	-5.24	1.57	2.52	1.12	12.42	16.44	-4.02	-204.05
SJP1G31	516397	3098216	20	2621.92	-3.09	0.92	2.59	1.87	14.30	16.48	-2.19	-111.06
SJP1G32	516507	3098067	17	2622.84	-4.01	1.20	2.69	1.56	14.37	16.51	-2.14	-108.80
SJP1G33	516945	3097828	12	2622.35	-5.55	1.66	2.85	0.84	12.22	16.57	-4.35	-220.75
SJP1G34	517382	3097589	10	2622.73	-6.17	1.84	3.01	0.78	12.28	16.63	-4.35	-220.76
SJP1G35	517814	3097350	9	2623.18	-6.48	1.94	3.17	0.41	12.30	16.69	-4.39	-223.00
SJP1G36	518256	3097111	9	2624.02	-6.48	1.94	3.33	0.00	12.90	16.75	-3.86	-195.91
SJP1G37	518696	3096874	15	2623.91	-4.63	1.38	3.49	0.21	14.44	16.82	-2.37	-120.45
SJP1G38	519264	3096508	32	2620.27	0.62	-0.18	3.73	2.38	16.90	16.90	0.00	0.02
EB	505863	3102064	30	2606.70								

PERFIL 2 GRAVIMETRICO

W Ejido El Caballo E

ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mgal)	C _{AL}	C _B	C _{LAT}	C _T	A _B (mgal)	REGIONAL	RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.18								
SJP2G1	503178	3103322	72	2603.91	12.96	-3.87	-0.85	6.91	9.70	9.70	0.00	0.00
SJP2G2	503286	3103380	58	2608.33	8.64	-2.58	-0.88	5.86	10.00	9.72	0.28	14.19
SJP2G3	503750	3103491	50	2607.46	6.17	-1.84	-0.96	5.18	6.65	9.81	-3.16	-160.23
SJP2G4	504258	3103691	40	2606.58	3.09	-0.92	-1.09	4.09	2.38	9.90	-7.52	-382.00
SJP2G5	504757	3103710	35	2604.87	1.54	-0.46	-1.11	3.62	-0.90	9.99	-10.89	-552.78
SJP2G6	505258	3103773	35	2604.01	1.54	-0.46	-1.15	3.42	-1.99	10.08	-12.07	-612.95
SJP2G7	505753	3104117	32	2604.44	0.62	-0.18	-1.38	3.30	-2.57	10.18	-12.75	-647.31
SJP2G8	506252	3104656	36	2605.70	1.85	-0.55	-1.74	3.81	-0.29	10.31	-10.60	-538.49
SJP2G9	506750	3104921	38	2606.59	2.47	-0.74	-1.92	4.00	1.04	10.41	-9.37	-475.75
SJP2G10	507251	3105183	45	2604.82	4.63	-1.38	-2.10	4.76	1.37	10.51	-9.14	-463.89
SJP2G11	507752	3105421	47	2603.32	5.24	-1.57	-2.26	5.07	0.45	10.60	-10.16	-515.79
SJP2G12	508251	3105749	53	2602.57	7.10	-2.12	-2.48	5.60	1.31	10.71	-9.39	-477.00
SJP2G13	508750	3106215	55	2602.17	7.71	-2.30	-2.79	5.81	1.24	10.83	-9.59	-486.80
SJP2G14	509251	3106646	61	2601.84	9.56	-2.86	-3.08	6.52	2.63	10.94	-8.31	-422.10
SJP2G15	509750	3107029	66	2602.07	11.11	-3.32	-3.34	6.84	4.01	11.05	-7.04	-357.64
SJP2G16	510251	3107393	71	2602.95	12.65	-3.78	-3.58	7.34	6.22	11.16	-4.94	-250.74
SJP2G17	510751	3107975	74	2605.18	13.57	-4.06	-3.97	6.99	8.35	11.29	-2.94	-149.38
SJP2G18	510860	3108201	77	2603.50	14.50	-4.33	-4.12	6.71	6.89	11.33	-4.45	-225.76
SJP2G19	511033	3109055	92	2603.81	19.13	-5.72	-4.70	8.32	11.49	11.49	0.00	0.00
EB	505863	3102064	30	2606.16								

PERFIL 3 GRAVIMETRICO											
W Ejido El Tigre E											
ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mgal)	C _{AL}	C _B	C _{LAT}	C _T	A _B (mgal)	REGIONAL RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.59							
SJP3G1	500401	3106974	85	2596.61	16.97	-5.07	-3.30	8.94	4.37	4.37	0.00
SJP3G2	500566	3107085	78	2597.94	14.81	-4.42	-3.37	8.35	3.52	4.43	-0.90
SJP3G3	501059	3107252	75	2595.86	13.88	-4.15	-3.49	7.99	0.32	4.58	-4.26
SJP3G4	501525	3107440	72	2594.52	12.96	-3.87	-3.61	7.63	-2.16	4.72	-6.88
SJP3G5	502011	3107562	75	2593.37	13.88	-4.15	-3.69	8.01	-2.36	4.87	-7.23
SJP3G6	502449	3107322	72	2594.06	12.96	-3.87	-3.53	7.43	-2.73	5.02	-7.75
SJP3G7	502923	3107158	62	2595.21	9.87	-2.95	-3.42	6.71	-4.36	5.16	-9.52
SJP3G8	503422	3107219	55	2597.99	7.71	-2.30	-3.46	5.83	-4.01	5.31	-9.32
SJP3G9	503903	3107364	57	2597.35	8.33	-2.49	-3.56	6.15	-4.00	5.45	-9.46
SJP3G10	504113	3107259	60	2598.02	9.26	-2.77	-3.49	5.87	-2.90	5.52	-8.42
SJP3G11	504517	3107557	47	2599.58	5.24	-1.57	-3.69	4.68	-5.53	5.67	-11.20
SJP3G12	504681	3108069	57	2599.28	8.33	-2.49	-4.04	5.49	-3.20	5.82	-9.03
SJP3G13	505171	3108155	47	2600.83	5.24	-1.57	-4.09	5.03	-4.33	5.97	-10.30
SJP3G14	505320	3108630	51	2600.28	6.48	-1.94	-4.41	5.08	-4.29	6.11	-10.40
SJP3G15	505438	3109114	49	2600.34	5.86	-1.75	-4.74	5.28	-4.79	6.26	-11.05
SJP3G16	505797	3109465	48	2600.78	5.55	-1.66	-4.97	4.69	-5.40	6.40	-11.80
SJP3G17	506214	3109737	45	2602.52	4.63	-1.38	-5.16	4.43	-4.74	6.55	-11.29
SJP3G18	506614	3110036	43	2604.83	4.01	-1.20	-5.36	3.71	-3.78	6.69	-10.48
SJP3G19	507108	3109967	58	2605.01	8.64	-2.58	-5.31	5.61	1.58	6.84	-5.25
SJP3G20	507589	3110063	61	2607.13	9.56	-2.86	-5.38	5.47	4.14	6.98	-2.84
SJP3G21	507744	3110174	74	2606.09	13.57	-4.06	-5.45	6.65	7.04	7.04	0.00

PERFIL 4 GRAVIMETRICO													
W Ejido La Zorra-El Bayo E													
ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mGal)	CAL	CB	CLAT	CT	Cd	Ab (mGal)	REGIONAL	RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.73									
SJP4G1	492421	3118749	147	2600.98	36.09	-10.79	-11.21	13.88	0.00	19.04	19.04	0.00	0.00
SJP4G2	492716	3118853	117	2608.59	26.84	-8.02	-11.28	12.33	0.00	18.55	19.07	-0.53	-26.75
SJP4G3	493208	3118777	113	2608.70	25.61	-7.65	-11.23	12.11	0.00	17.61	19.13	-1.52	-77.15
SJP4G4	493703	3118700	106	2609.58	23.45	-7.01	-11.18	11.51	0.00	16.43	19.19	-2.76	-440.13
SJP4G5	494195	3118920	106	2609.34	23.45	-7.01	-11.33	11.25	0.00	15.78	19.26	-3.48	-176.47
SJP4G6	494606	3118901	103	2608.23	22.52	-6.73	-11.31	11.20	0.00	13.99	19.30	-5.32	-269.91
SJP4G7	495104	3118955	103	2606.59	22.52	-6.73	-11.35	11.09	0.00	12.20	19.36	-7.16	-363.55
SJP4G8	495602	3118912	104	2604.45	22.83	-6.82	-11.32	11.03	0.00	10.26	19.42	-9.16	-465.33
SJP4G9	495817	3118887	110	2600.16	24.68	-7.37	-11.30	12.00	0.00	8.24	19.45	-11.21	-569.14
SJP4G10	496087	3118783	108	2598.73	24.06	-7.19	-11.24	11.85	0.00	6.30	19.48	-13.18	-669.24
SJP4G11	496588	3118767	100	2599.34	21.60	-6.45	-11.22	10.85	0.00	4.20	19.54	-15.34	-779.08
SJP4G12	497081	3118676	93	2599.35	19.44	-5.81	-11.16	10.12	0.00	2.02	19.60	-17.58	-892.52
SJP4G13	497581	3118665	88	2600.68	17.89	-5.35	-11.16	9.69	0.00	1.85	19.66	-17.81	-904.33
SJP4G14	498083	3118681	84	2602.98	16.66	-4.98	-11.17	9.24	0.00	2.82	19.72	-16.90	-858.22
SJP4G15	498584	3118665	80	2605.26	15.43	-4.61	-11.16	8.45	0.00	3.46	19.78	-16.32	-828.66
SJP4G16	499080	3118619	80	2606.75	15.43	-4.61	-11.12	8.45	0.00	4.98	19.83	-14.85	-754.29
SJP4G17	499577	3118580	83	2607.08	16.35	-4.89	-11.10	9.09	0.00	6.62	19.89	-13.27	-674.05
SJP4G18	500511	3117484	84	2607.98	16.66	-4.98	-10.36	9.14	0.00	8.53	20.06	-11.53	-585.67
SJP4G19	500766	3117913	95	2607.96	20.05	-5.99	-10.65	9.64	-0.45	11.09	20.12	-9.03	-458.49
SJP4G20	500970	3118365	98	2607.85	20.98	-6.27	-10.95	10.24	-0.48	11.93	20.18	-8.25	-418.74
SJP4G21	501185	3118815	101	2607.96	21.90	-6.54	-11.26	10.57	-0.50	12.71	20.24	-7.53	-382.26
SJP4G22	501439	3119243	107	2607.98	23.75	-7.10	-11.54	11.13	-0.52	14.32	20.30	-5.98	-303.67
SJP4G23	501731	3119645	109	2608.03	24.37	-7.28	-11.81	11.48	-0.55	14.88	20.35	-5.48	-278.10
SJP4G24	502056	3120021	110	2607.66	24.68	-7.37	-12.07	11.97	-0.57	14.96	20.41	-5.45	-276.97
SJP4G25	502428	3120358	116	2607.66	26.53	-7.93	-12.29	12.40	-0.60	16.46	20.47	-4.02	-203.89
SJP4G26	502912	3120489	115	2606.42	26.22	-7.84	-12.38	12.46	-0.64	14.97	20.53	-5.56	-282.35
SJP4G27	503402	3120586	123	2603.94	28.69	-8.57	-12.45	13.29	-0.71	14.98	20.59	-5.61	-284.79
SJP4G28	503898	3120559	132	2602.26	31.47	-9.40	-12.43	14.00	-0.75	15.97	20.65	-4.67	-237.37
SJP4G29	504371	3120392	111	2606.85	24.99	-7.47	-12.32	12.15	-0.77	14.29	20.71	-6.42	-326.01
SJP4G30	504867	3120340	117	2606.76	26.84	-8.02	-12.28	12.52	-0.80	15.90	20.77	-4.87	-247.12
SJP4G31	505363	3120308	124	2606.46	29.00	-8.66	-12.26	13.55	-0.83	18.17	20.82	-2.65	-134.59
SJP4G32	505861	3120239	128	2605.19	30.23	-9.03	-12.21	14.02	-0.86	18.28	20.88	-2.60	-132.17
SJP4G33	506333	3120083	128	2605.45	30.23	-9.03	-12.11	13.97	-0.89	18.60	20.94	-2.34	-119.04
SJP4G34	506809	3119930	122	2606.93	28.38	-8.48	-12.01	13.18	-0.93	18.09	21.00	-2.91	-147.54
SJP4G35	507308	3119900	124	2607.13	29.00	-8.66	-11.99	13.20	-0.96	18.76	21.06	-2.30	-116.79
SJP4G36	507791	3119964	157	2599.10	39.18	-11.71	-12.03	16.49	-1.00	21.12	21.12	0.00	0.00

PERFIL 5 GRAVIMETRICO

N Carretera a Guaymas S

ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mGal)	C _{AL}	C _B	C _{LAT}	C _T	A _B (mGal)	REGIONAL	RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.75								
SJP5G1	499222	3119825	92	2606.56	19.13	-5.72	-11.94	10.68	8.76	8.66	0.10	5.13
SJP5G2	499577	3118580	83	2607.08	16.35	-4.89	-11.10	9.09	6.59	9.47	-2.88	-146.29
SJP5G3	500275	3117737	84	2606.03	16.66	-4.98	-10.53	9.31	6.55	10.16	-3.61	-183.39
SJP5G4	500862	3116699	79	2605.24	15.12	-4.52	-9.83	8.87	4.93	10.91	-5.97	-303.37
SJP5G5	501197	3116057	77	2604.04	14.50	-4.33	-9.40	8.62	3.48	11.36	-7.88	-400.14
SJP5G6	501543	3115376	73	2602.67	13.27	-3.96	-8.95	8.08	1.17	11.84	-10.67	-542.07
SJP5G7	501996	3114607	70	2601.00	12.34	-3.69	-8.43	7.77	-0.95	12.40	-13.35	-678.06
SJP5G8	502389	3113332	65	2598.62	10.80	-3.23	-7.57	6.33	-4.99	13.24	-18.23	-925.62
SJP5G9	502610	3112567	65	2596.27	10.80	-3.23	-7.06	6.90	-6.25	13.74	-19.99	-1015.11
SJP5G10	502913	3111572	65	2596.19	10.80	-3.23	-6.39	7.18	-5.39	14.39	-19.78	-1004.24
SJP5G11	503203	3110514	72	2592.42	12.96	-3.87	-5.68	7.85	-6.27	15.08	-21.34	-1083.82
SJP5G12	503842	3110301	69	2594.44	12.03	-3.60	-5.54	6.78	-5.82	15.50	-21.32	-1082.59
SJP5G13	503435	3109704	67	2593.60	11.41	-3.41	-5.13	7.23	-6.25	15.95	-22.20	-1127.34
SJP5G14	503774	3108570	58	2595.89	8.64	-2.58	-4.37	6.41	-5.96	16.70	-22.66	-1150.57
SJP5G15	503905	3107360	56	2597.34	8.02	-2.40	-3.56	5.36	-5.18	17.46	-22.64	-1149.86
SJP5G16	504260	3106869	52	2599.08	6.79	-2.03	-3.23	5.09	-4.25	17.84	-22.09	-1121.49
SJP5G17	504551	3105963	42	2602.06	3.70	-1.11	-2.62	4.18	-3.72	18.44	-22.16	-1125.15
SJP5G18	505110	3105015	37	2603.62	2.16	-0.65	-1.98	3.48	-3.31	19.13	-22.44	-1139.28
SJP5G19	504853	3104971	36	2604.25	1.85	-0.55	-1.95	3.01	-3.34	19.29	-22.63	-1149.28
SJP5G20	505115	3103988	34	2604.25	1.23	-0.37	-1.29	3.07	-3.05	19.93	-22.98	-1166.85
SJP5G21	505508	3102936	29	2605.30	-0.31	0.09	-0.59	2.53	-2.92	20.63	-23.55	-1195.99
SJP5G22	505863	3102064	29	2606.75	-0.31	0.09	0.00	3.19	-0.22	21.22	-21.44	-1088.73
SJP5G23	506377	3100587	26	2600.82	-1.23	0.37	0.99	2.33	-6.67	22.21	-28.87	-1466.03
SJP5G24	506523	3100241	23	2609.40	-2.16	0.65	1.23	1.87	1.04	22.44	-21.40	-1086.92
SJP5G25	506743	3099236	22	2612.11	-2.47	0.74	1.90	1.46	3.81	23.09	-19.28	-978.91
SJP5G26	506405	3098153	24	2614.28	-1.85	0.55	2.63	2.01	7.68	23.80	-16.12	-818.40
SJP5G27	506108	3097056	20	2618.12	-3.09	0.92	3.37	2.16	11.54	24.51	-12.97	-658.85
SJP5G28	506055	3096462	16	2622.21	-4.32	1.29	3.76	0.18	13.18	24.88	-11.70	-594.21
SJP5G29	505868	3096335	19	2622.47	-3.39	1.01	3.85	1.06	15.06	25.03	-9.96	-506.00
SJP5G30	505917	3095198	27	2623.75	-0.93	0.28	4.61	1.14	18.91	25.74	-6.83	-346.73
SJP5G31	506122	3094194	21	2626.55	-2.78	0.83	5.29	1.24	21.18	26.38	-5.20	-264.00
SJP5G32	506275	3093145	17	2629.67	-4.01	1.20	5.99	0.54	23.45	27.05	-3.60	-182.86
SJP5G33	506925	3092179	16	2629.83	-4.32	1.29	6.64	1.26	24.76	27.78	-3.02	-153.34
SJP5G34	506415	3092162	16	2630.85	-4.32	1.29	6.65	0.70	25.23	28.10	-2.87	-145.53
SJP5G35	506563	3091113	12	2634.72	-5.55	1.66	7.36	0.52	28.76	28.76	0.00	0.00

PERFIL 6 GRAVIMETRICO											
N. Camino de Aeropuerto Guaymas- San Jose de Guaymas- Empalme S											
ESTACIÓ N	LONGITUD (m)	LATITU D (m)	ELEVACIÓ N (m)	GRAVEDAD OBSERVAD A (mGal)	C _{AL}	C _B	C _{LAT}	C _T	A _B (mGal)	REGIONAL RESIDUAL	PROFUNDIDA D (m)
EB	505863	3102064	30	2606.75							
SJP6G1	506030	3094139	29	2624.72	-0.31	0.09	5.33	1.95	21.88	21.88	0.00
SJP6G2	506414	3094184	15	2626.93	-4.63	1.38	5.30	1.11	20.19	21.70	-1.51
SJP6G3	508247	3094618	11	2623.20	-5.86	1.75	5.00	0.66	14.85	20.82	-5.97
SJP6G4	509496	3094984	6	2621.79	-7.40	2.21	4.76	0.37	11.82	20.21	-8.39
SJP6G5	509443	3095274	2	2620.03	-8.64	2.58	4.56	-0.27	8.36	20.07	-11.71
SJP6G6	509926	3095142	2	2620.98	-8.64	2.58	4.65	-0.32	9.35	19.84	-10.49
SJP6G7	510424	3095114	2	2621.42	-8.64	2.58	4.67	-0.21	9.92	19.60	-9.68
SJP6G8	511097	3095280	-2	2620.89	-9.87	2.95	4.56	-0.59	8.04	19.28	-11.24
SJP6G9	511596	3095235	1	2620.41	-8.95	2.67	4.59	-0.38	8.45	19.05	-10.60
SJP6G10	512080	3095351	2	2619.81	-8.64	2.58	4.51	-0.25	8.11	18.81	-10.70
SJP6G11	512576	3095429	5	2619.63	-7.71	2.30	4.46	-0.09	8.69	18.58	-9.89
SJP6G12	512977	3095729	-1	2618.92	-9.56	2.86	4.26	-0.39	6.18	18.34	-12.16
SJP6G13	513429	3095946	3	2617.82	-8.33	2.49	4.11	0.18	6.37	18.11	-11.74
SJP6G14	513898	3096134	2	2617.74	-8.64	2.58	3.98	0.02	5.79	17.87	-12.08
SJP6G15	514397	3096195	1	2618.76	-8.95	2.67	3.94	-0.21	6.32	17.64	-11.32
SJP6G16	514894	3096267	2	2619.10	-8.64	2.58	3.90	0.07	7.11	17.40	-10.29
SJP6G17	515389	3096268	2	2619.18	-8.64	2.58	3.89	-0.11	7.00	17.17	-10.17
SJP6G18	515769	3095941	5	2619.24	-7.71	2.30	4.11	0.25	8.29	16.93	-8.65
SJP6G19	516018	3095511	4	2620.23	-8.02	2.40	4.40	0.09	9.20	16.70	-7.51
SJP6G20	516449	3095258	2	2620.67	-8.64	2.58	4.57	-0.13	9.16	16.47	-7.31
SJP6G21	516865	3094984	3	2621.42	-8.33	2.49	4.76	0.10	10.54	16.23	-5.70
SJP6G22	517312	3094734	1	2622.22	-8.95	2.67	4.93	-0.12	10.85	15.99	-5.15
SJP6G23	517824	3094598	9	2623.06	-6.48	1.94	5.02	0.56	14.19	15.75	-1.55
SJP6G24	517991	3094565	16	2622.30	-4.32	1.29	5.04	1.25	15.67	15.67	0.00
EB	505863	3102064	30	2606.68							