



# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

“INTERPRETACIÓN GRAVIMÉTRICA  
Y MODELO ESTRUCTURAL DE LA CARTA TECORIPA H12D64  
EN EL SURESTE DE SONORA, MÉXICO”

## TESIS

Para obtener el grado de:

Geólogo

Presenta:

MONTAÑO DEL CID MARTIN ALEJANDRO



Hermosillo, Sonora, México

Agosto 2015

# 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



# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 02 de junio del 2015

**DR. I. GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO**  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA  
UNIVERSIDAD DE SONORA  
PRESENTE.-

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

**"INTERPRETACIÓN GRAVIMÉTRICA Y MODELO ESTRUCTURAL DE LA CARTA  
TECORIPA H12D64 EN EL SURESTE DE SONORA, MÉXICO"**

Esto con el fin de que el estudiante: *Martin Alejandro Montaña Del Cid* con **Expediente No. 210203737**, pueda presentar su examen profesional para la obtención de su título de Licenciatura en Geología

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedamos de Usted.

**ATENTAMENTE**  
**"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"**

**DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA**  
DIRECTORA DE TESIS



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

C.c.p. Archivo.



# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

Heramosillo, Sonora a 22 de junio del 2015

**Dra. Silvia Martínez Retama**

Directora de Tesis

Presente.-

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

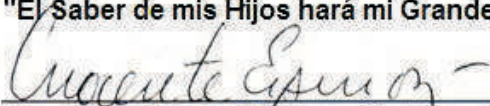
**"INTERPRETACIÓN GRAVIMÉTRICA Y MODELO ESTRUCTURAL DE LA CARTA  
TECORIPA H12D64 EN EL SURESTE DE SONORA, MÉXICO"**

Esto es en fin de que *Martin Alejandro Montaña Del Cid* con Expediente No.210203737, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo le comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

**Presidente**  
**Secretario**  
**Vocal**

**Dr. Ricardo Vega Granillo**  
**M.I. Eva Lourdes Vega Granillo**  
**Dra. Silvia Martínez Retama**

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

**Atentamente**  
**"El Saber de mis Hijos hará mi Grandeza"**  
  
**Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado**  
Jefe del Departamento



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGÍA

C.c.p. Archivo.



# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

**Nombre de la tesis:**

**"INTERPRETACIÓN GRAVIMÉTRICA Y MODELO ESTRUCTURAL DE LA CARTA  
TECORIPA H12D64 EN EL SURESTE DE SONORA, MÉXICO"**

**Nombre del sustentante:**

**Martin Alejandro Montaña Del Cid**

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 Licenciatura en la Universidad de Sonora.



**Dr. Ricardo 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 Licenciatura en la Universidad de Sonora.

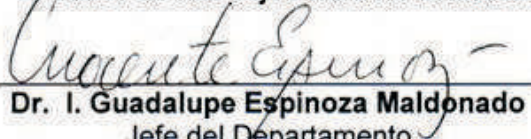


**M.I. Eva Lourdes Vega Granillo**

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 Licenciatura en la Universidad de Sonora.



**Dra. Silvia Martínez Retama**

**Atentamente**  
**"El Saber de mis Hijos hará mi Grandeza"**  
  
**Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado**  
Jefe del Departamento



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

C.c.p. Archivo.

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutora:

Dra. Silvia Martínez Retama

Por la confianza que ha puesto en mí persona, su apoyo, sus consejos, los conocimientos transmitidos, por su paciente dirección de esta tesis y el tiempo invertido en la realización de la misma.

A mis Sinodales:

Dr. Ricardo Vega Granillo

M.I. Eva Lourdes Vega Granillo

Por sus sugerencias y sus consejos para mejorar esta tesis, así como el tiempo invertido en la revisión de la misma.

Agradezco a la Universidad de Sonora, por la formación recibida; al Departamento de Geología por la educación brindada y por el apoyo económico presentado para la realización de este proyecto, así como la facilitación del equipo gravimétrico para el trabajo de campo.

A mi familia, especialmente a mis padres, Martin Montaña y Marcela Del Cid, por su apoyo incondicional, su confianza, sacrificios y el esfuerzo que dedicaron para alentarme a ser una mejor persona y salir adelante, ya que sin ellos esto nunca hubiera sido posible. A mis hermanos, Luis y Edgar por todos los momentos que pasamos y el apoyo brindado. La familia no se mide por el número de miembros, sino por la unión que hay en ellos.

A mis amiga(o)s por su amistad y el apoyo que siempre me brindaron, sus palabras de aliento a seguir adelante, por compartir los mejores recuerdos y por siempre estar ahí en todo momento.

No queda más que agradecer a aquellas personas que forman parte de mi vida, mi familia, mis abuelos, tíos, amigos, maestros y toda esa gente que he encontrado en el camino que me ha enseñado el valor de ser como soy.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que con su apoyo y esfuerzo contribuyeron directa e indirectamente en la realización de esta tesis.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivo	3
1.4. Metodología	3
<b>2. GEOGRAFÍA</b>	
2.1. Localización	<b>4</b>
2.2. Accesos y Vías de Comunicación	4
2.3. Fisiografía	5
<b>3. GEOLOGÍA</b>	<b>6</b>
3.1. Geología Superficial	6
3.1.1. Paleozoico	10
3.1.1.1. Secuencia Sedimentaria Ordovícica	10
3.1.2. Mesozoico	11
3.1.2.1. Grupo Barranca	11
3.1.2.1.1. Formación Arrayanes	12
3.1.2.1.2. Formación Santa Clara	12
3.1.2.1.3. Formación Coyotes	14
3.1.3. Cretácico Superior	15
3.1.3.1. Formación Tarahumara	15
3.1.4. Cretácico Superior – Oligoceno	15

---

3.1.4.1. Batolito Laramídico de Sonora	15
3.1.5. Cenozoico	16
3.1.5.1. Formación Báucarit	16
3.1.5.2. Formación Lista Blanca	17
3.1.6. Cuaternario	17
3.1.6.1. Cobertura Sedimentaria	17
3.2. Geología Estructural	18
3.2.1. Deformación dúctil – frágil	19
3.2.2. Deformación frágil	19
3.3. Marco Tectónico	20
3.3.1. Orogenia Nevadiana	22
3.3.2. Batolito Laramídico	22
3.3.3. Basin and Range	23
<b>4. MÉTODO GRAVIMÉTRICO</b>	<b>23</b>
4.1. Ley de Gravitación Universal	24
4.2. Forma de la Tierra	24
4.2.1. El Geoide	25
4.2.2. El Elipsoide	25
4.3. Campo Gravitacional de la Tierra	26
4.4. Medición de la Gravedad	27
4.4.1. Gravímetros	28
4.5. Corrección de datos gravimétricos	29
4.5.1. Gravedad teórica. Corrección por Latitud	29
4.5.2. Corrección por Deriva	30
4.5.3. Corrección por Aire Libre	31



---

4.5.4. Corrección de Bouguer	32
4.5.5. Corrección Topográfica	33
4.5.6. Anomalía de Bouguer	35
4.6. Separación de Anomalía Regional y Residual	35
4.6.1. Ajuste Polinomial por Mínimos Cuadrados	36
4.7. Modelado Bidimensional	38
4.7.1. Método de Talwani	38
<b>5. DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LA CARTA TECORIPA H12-D64</b>	<b>38</b>
5.1. Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo	38
5.1.1. Adquisición de Datos	38
5.1.2. Determinación de la Densidad	41
5.1.3. Corrección de Datos	42
5.1.4. Anomalía de Bouguer	44
5.1.5. Anomalía Regional y Residual	45
5.2. Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI 2010 de la carta Tecoripa	46
5.2.1. Adquisición de Datos	46
5.2.2. Anomalía de Bouguer	49
5.2.3. Anomalía Regional y Residual	49
<b>6. MODELADO GRAVIMÉTRICO</b>	<b>51</b>
6.1. Modelación de Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo	51
6.1.1. Secciones Geológicas de los Perfiles	51
6.1.2. Modelado Bidimensional con Método de Talwani	54
6.1.2.1. Perfil 1	56

6.1.2.2. Perfil 2	57
6.1.2.3. Perfil 3	58
6.1.2.4. Perfil 4	58
6.2. Modelación de Perfiles de la Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI	59
6.2.1. Secciones Geológicas de los Perfiles	59
6.2.2. Modelado Bidimensional con Método de Talwani	63
6.2.2.1. Perfil A	64
6.2.2.2. Perfil B	64
6.2.2.3. Perfil C	65
6.2.2.4. Perfil D	66
6.2.2.5. Perfil E	67
6.3. Correlación de información geológica-geofísica	67
6.3.1. Correlación de Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo con la Geología	67
6.3.2. Correlación de Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI con Geología	69
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>75</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
Figura 1	Localización del Área de Estudio (SGM, 2003).	4
Figura 2	Accesos y Vías de Comunicación (SGM, 2003).	5
Figura 3	Provincias Fisiográficas de Sonora (SGM, 2003).	6
Figura 4	Carta Geológica- Minera Tecoripa H12-D64 (Modificado SGM, 2003).	8
Figura 5	Columna Estratigráfica de la Carta Tecoripa H12-D64 (SGM, 2003).	9
Figura 6	Esquema Estructural de la Carta Tecoripa H12-D64 (SGM, 2003).	20
Figura 7	Ubicación de la Carta en el terreno Tectonoestratigráfico (SGM, 2003).	21
Figura 8	Esquema del Geoide y el Elipsoide (Fuente: INEGI).	26
Figura 9	Fuerza de atracción de la Tierra sobre la Luna (Fuente: Paolera, 2013).	27
Figura 10	Caída Libre de un Cuerpo. a) Aceleración de la gravedad. b) Posición de un cuerpo en caída libre a intervalos regulares de 1 segundo. Se observa que la distancia recorrida en cada intervalo es mayor debido a que la velocidad va aumentando por el efecto de la gravedad (Fuente: educaplus).	27
Figura 11	Gravímetro de resorte o torsión (Boyd, 2010).	28
Figura 12	Corrección por Deriva.	31
Figura 13	Corrección por Aire Libre.	32
Figura 14	Corrección de Bouguer.	33
Figura 15	Corrección Topográfica.	34
Figura 16	Plantilla de Hammer.	34
Figura 17	Determinación de Anomalía Regional por Ajuste Polinomial por Mínimos Cuadrados (Murray, 1991).	37
Figura 18	Localización de las estaciones gravimétricas medidas en campo.	39
Figura 19	Gravímetro CG-5 marca Scintrex.	40
Figura 20	GPS Garmin Etrex Legend.	40
Figura 21	Perfil de la Gravedad Observada.	40
Figura 22	Densitómetro (Electronic Densimeter EW-300SG).	41
Figura 23	Mapa de Anomalía de Bouguer obtenido de las estaciones gravimétricas medidas en campo.	44
Figura 24	Mapa de Anomalía Regional de estaciones gravimétricas medidas en campo.	45
Figura 25	Mapa de Anomalía Residual de estaciones gravimétricas medidas en campo.	46
Figura 26	Localización de estaciones gravimétricas de INEGI.	48
Figura 27	Mapa de Anomalía de Bouguer Completa de datos de INEGI.	49
Figura 28	Mapa de Anomalía Regional datos de INEGI	50
Figura 29	Mapa de Anomalía Residual datos de INEGI.	50
Figura 30	Mapa de Geología Superficial y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo (Modificado SGM, 2003).	52
Figura 31	Secciones Geológicas elaboradas a partir del Mapa de Geología Superficial y la ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo.	53
Figura 32	Mapa de Anomalía Residual y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo.	55

Figura 33	Modelo Geológico para el perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	57
Figura 34	Modelo Geológico para el perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	57
Figura 35	Modelo Geológico para el perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	58
Figura 36	Modelo Geológico para el perfil 4. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	59
Figura 37	Mapa de Geología Superficial y ubicación de los perfiles datos INEGI (Modificado SGM, 2003).	60
Figura 38	Secciones Geológicas elaboradas a partir del Mapa de Geología Superficial y la ubicación de perfiles gravimétricos datos INEGI.	61
Figura 39	Mapa de Anomalía Residual datos de INEGI y ubicación de perfiles.	63
Figura 40	Modelo Geológico para el perfil A. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	64
Figura 41	Modelo Geológico para el perfil B. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	65
Figura 42	Modelo Geológico para el perfil C. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	66
Figura 43	Modelo Geológico para el perfil D. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	66
Figura 44	Modelo Geológico para el perfil E. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	67
Figura 45	Correlación de la Geología Superficial del área de estudio con la Anomalía de Bouguer Completa obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (Modificado SGM, 2003).	68
Figura 46	Correlación de la Geología Superficial del área de estudio con la Anomalía Residual obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (Modificado SGM, 2003).	69
Figura 47	Correlación de la Geología Superficial de la carta Tecoripa H12-D64 con la Anomalía de Bouguer Completa datos INEGI (Modificado SGM, 2003).	70
Figura 48	Correlación de la Geología Superficial de la carta Tecoripa H12-D64 con la Anomalía Residual datos INEGI (Modificado SGM, 2003).	71
Figura 49	Configuración 3D de la Anomalía Residual de datos medidos en el área de estudio.	72
Figura 50	Configuración 3D de la Anomalía Residual de datos INEGI de la carta Tecoripa.	72

## RESUMEN

La carta Tecoripa H12D64 se ubica al sureste del estado de Sonora; está delimitada por las coordenadas geográficas  $28^{\circ} 30'$  a  $28^{\circ} 45'$  de latitud norte y  $109^{\circ} 40'$  a  $110^{\circ} 00'$  de longitud oeste, con una superficie de  $904 \text{ km}^2$ . En general la geología se encuentra representada por rocas Ordovícicas (Calizas), rocas sedimentarias del Triásico, principalmente del Grupo Barranca, rocas volcánicas del Cretácico superior y del Terciario que constituyen a las Formaciones Tarahumara y Lista Blanca respectivamente. Los intrusivos de composición (granito-granodiorita, diorita, pórfidos andesíticos, riolíticos y cuarzomonzoníticos) se presentan alterados y erosionados dando origen a formas planas, excepto algunos afloramientos de dioritas y pórfidos; el Cenozoico está conformado por rocas de la Formación Báucarit que se encuentra rellenando algunos valles y forman lomeríos y cerros con topografías suaves.

En este trabajo se realizó un estudio gravimétrico para determinar la configuración y profundidad del basamento y elaborar un modelo estructural del subsuelo. Para tal efecto se realizó un levantamiento gravimétrico consistente en 3 perfiles a lo largo de la carretera con 45 estaciones espaciadas entre 600 y 1200 m aproximadamente. Estos datos fueron corregidos por deriva, latitud, elevación, Bouguer y topografía. Posteriormente se procesaron en el software de procesamiento de datos geofísicos WinGLink, donde se determinó la anomalía residual a partir de un ajuste polinomial de tercer grado. Para complementar este estudio, se utilizaron datos gravimétricos obtenidos por INEGI que corresponden a valores promedio estimados de Anomalía de Gravedad de Bouguer completa sobre el terreno (incluyen todas las correcciones). Se seleccionaron todas las estaciones gravimétricas comprendidas en la carta Tecoripa H12D64, en total se consideraron 96 estaciones gravimétricas espaciadas a cada 4070 m, por lo cual estos datos corresponden a un levantamiento regional con menor resolución que el nuestro. Los datos se procesaron y se determinó la anomalía residual a partir de un ajuste polinomial de primer grado.

Antes de realizar la modelación bidimensional de los perfiles gravimétricos medidos en campo y de INEGI, se analizó la geología superficial del área de estudio y se construyeron secciones geológicas a lo largo de los perfiles. Lo anterior se realizó con la finalidad de

proponer un modelo inicial del subsuelo que correlacione lo mejor posible con la geología del área.

Finalmente todos los perfiles fueron modelados, utilizando el método de Talwani. Se modelaron 4 perfiles correspondientes al levantamiento gravimétrico y 5 perfiles de datos de INEGI con orientación NE-SW perpendiculares al rumbo de las anomalías y estructuras geológicas. En general, los modelos estructurales obtenidos muestran cuerpos intrusivos asociados a altos gravimétricos bien definidos y bajos gravimétricos asociados a cuencas y rocas sedimentarias.

Los modelos geológicos obtenidos a partir de 4 perfiles trazados sobre el mapa de anomalía residual (obtenidos del levantamiento gravimétrico) muestran el basamento representado por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara del Cretácico Superior que se encuentran en contacto con rocas sedimentarias del Grupo Barranca del Triásico Superior y Calizas del Ordovícico medio. Ambas rocas, volcánicas y sedimentarias, son intrusionadas por Granitos-Granodioritas, Dioritas, Pórfidos Cuarzomonzónicos Andesíticos y Riolíticos, con edades del Terciario- Oligoceno. En base a la geología superficial así como a la configuración del basamento y modelo estructural obtenido se puede inferir la existencia de fallas con orientación NW-SE que originan estructuras de tipo Horst y Graben. Las cuencas tienen profundidades de 2,000 a 4,000m con rellenos sedimentarios de la Formación Báucarit y Sedimentos del Cuaternario.

Los datos de la Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI, correspondientes a la carta Tecoripa, muestran datos muy suavizados que representan el comportamiento regional del área de estudio. La correspondiente anomalía residual obtenida por ajuste polinomial de primer grado, presenta un alto gravimétrico bien definido de forma circular asociado a cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas. También se observa un bajo gravimétrico con orientación NW-SE asociado a cuencas sedimentarias.

En ambos datos (medidos y de INEGI), los bajos gravimétricos asociados a rocas sedimentarias del Grupo Barranca corresponden a los eventos de depósitos (Orogenia Nevadiana de edad Jurásica) relacionados a la apertura del golfo de México. Los altos

gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, se relacionan a eventos ocurridos a principios del Eoceno hasta el Oligoceno (Orogenia Larámide), donde se genera un arco magmático evidenciado por cuerpos graníticos y dacitas así como pórfidos de tipo cuarzomonzónico, andesíticos, riolítico. Las estructuras de tipo Horst y Graben presentes en los modelos están relacionadas al evento distensivo Basin and Range, donde las cuencas presentan rellenos con depósitos principalmente de la Formación Báucarit y Sedimentos del Cuaternario. También se presenta la formación Lista Blanca originada por vulcanismos de tipo fisural.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

La presencia de minerales en la carta es conocida desde el siglo pasado, lo cual es evidenciado por la gran cantidad de obras mineras que se observan en la porción este de la carta.

Aguilera (1896) hace una breve descripción de las principales minas y de la geología de los depósitos de carbón de la zona de Santa Clara y los bronzes.

Dumble durante los años de 1898 a 1900, estudió la geología y los depósitos de carbón de Sonora e introdujo dos unidades litoestratigráficas. Una fue la División Barranca, que comprendió los estratos clásticos sedimentarios, y la otra fue la División Lista Blanca, que comprendió las rocas volcánicas, las cuales él las consideró del Triásico.

King (1939) basándose en datos preexistentes agrupó los sedimentos del Mesozoico inferior en la Formación Barranca, asignándoles una edad del Triásico superior –Jurásico inferior.

Wilson y Rocha (1946) con el objeto de evaluar los recursos de carbón del noroeste de México, aportaron datos muy valiosos sobre la estratigrafía del Triásico superior de esta región y concluye que la región de Santa Clara es litológica y paleontológicamente de facies palustre.

Alencaster (1961), realizó estudios de fauna fósil en la Formación Barranca asignándole una edad de Carnica del Triásico superior. Elevó además a rango de grupo la misma formación y la dividió en Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyotes, para cada uno de los conjuntos descritos por King.

Rangin (1974) considera que los depósitos continentales lacustres son de tipo molasa, con algunas intercalaciones de origen marino, la cual fue afectada por tres fases tectónicas.

En el año de 1980, la Dirección General de Fomento Minero del estado de Sonora inició un programa de apoyo a la pequeña y mediana minería, construyendo plantas de beneficio en los poblados de La Colorada, Álamos, Arivechi y San Javier.



Weber (1980), desarrolló trabajos de exploración Paleobotánica en la Formación Santa Clara entre Hermosillo y Tónichi, Sonora, descubriendo 25 nuevas localidades fosilíferas. De acuerdo a la flora corroboró la edad Cárnica de la Formación Santa Clara.

En 1981, el Consejo de Recursos Minerales C.R.M., realizó un estudio geológico-minero al fundo minero La Bojorqueña, localizado en el municipio de La Colorada, definiendo, con reservas positivas de 3127 toneladas, reservas probables de 834 toneladas, con leyes promedio de 2.8 g/t de Au, 390 g/t de Ag, 5.2 % de Pb y 5.1 % de Zn.

El C.R.M. (1981), realizó un estudio geológico minero en el fundo La Trinidad, municipio de San Javier, donde concluyó que la mayor parte de la mineralización se encuentra en forma diseminada en una brecha del Grupo Barranca, cubicando un potencial de 4000 toneladas.

En 1983, Servicio Geológico Mexicano (SGM) realizó un levantamiento aeromagnético, generando datos digitales que están disponibles para el público.

En el año de 1984, el C.R.M. realizó estudios geológico-mineros a los fundos San Joaquín y Julieta, Santa Rosa y Ampliación Santa Rosa; dentro del municipio de San Javier, Sonora, definiendo que la veta Julieta es la más importante estructural y económicamente y cubicó 4792 toneladas.

Stewart y Roldán (1991) consideran que el Grupo Barranca descansa discordantemente sobre una secuencia eugeosinclinal de pedernal, argilita, cuarcita y rocas carbonatadas del Paleozoico. Discordantemente sobre el Grupo Barranca descansan las rocas de la Formación Tarahumara las cuales son de edad Cretácico temprano. Además consideran que los sedimentos del Grupo Barranca se depositaron en una cuenca tipo rift y que fue originada por un fallamiento transtensional y/o extensional.

En el año 2000, el C. R. M., realizó la carta geológico-minera y geoquímica Tecoripa, clave H12-12, a escala 1:250,000, donde se visitaron algunas minas de los municipios de La Colorada y San Javier.

En el año 2002, Roldán realizó una caracterización geológico- geoquímica y evolución del arco magmático mesozoico- terciario entre San Carlos y Maycoba en el sur de Sonora.

El INEGI (2010), hizo levantamientos gravimétricos con fines geodésicos cuyo objetivo fue generar datos de valores de gravedad para la determinación del geoide de México y para la elaboración de cartas gravimétricas.

### **1.1. Justificación**

Se han realizado algunos trabajos geológicos en la región, principalmente en la zona de San Javier y La Barranca, relacionados con la exploración de minerales; sin embargo, los estudios geofísicos son muy escasos en esta región. Por lo tanto, el estudio gravimétrico realizado en la presente tesis aportará información muy valiosa para determinar la configuración y profundidad del basamento, así como el modelo estructural para la zona.

### **1.2. Objetivo**

El objetivo de este estudio es obtener un modelo estructural del subsuelo en el área de estudio (Tecoripa).

Objetivos particulares

Identificación de fallas en el subsuelo.

Determinación de la configuración y profundidad del basamento.

Determinación del espesor del relleno sedimentario en las cuencas presentes en la carta.

### **1.3. Metodología**

Las distintas etapas utilizadas en la elaboración de esta tesis consistieron en revisión bibliográfica, reconocimiento geológico, recolección de muestras para medición de densidad, levantamiento gravimétrico (adquisición de datos), correcciones, procesamiento y modelación de datos, correlación de información geofísica – geológica e interpretación de datos.

## 2. GEOGRAFÍA

### 2.1. Localización

El área de estudio se ubica en la porción sureste del estado de Sonora, dentro de los municipios de La Colorada, San Javier y Suaqui Grande, queda comprendida entre las coordenadas geográficas: 28°30' a 28° 45' de latitud norte y 109° 40' a 110° 00' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 904 km<sup>2</sup> (Figura 1).

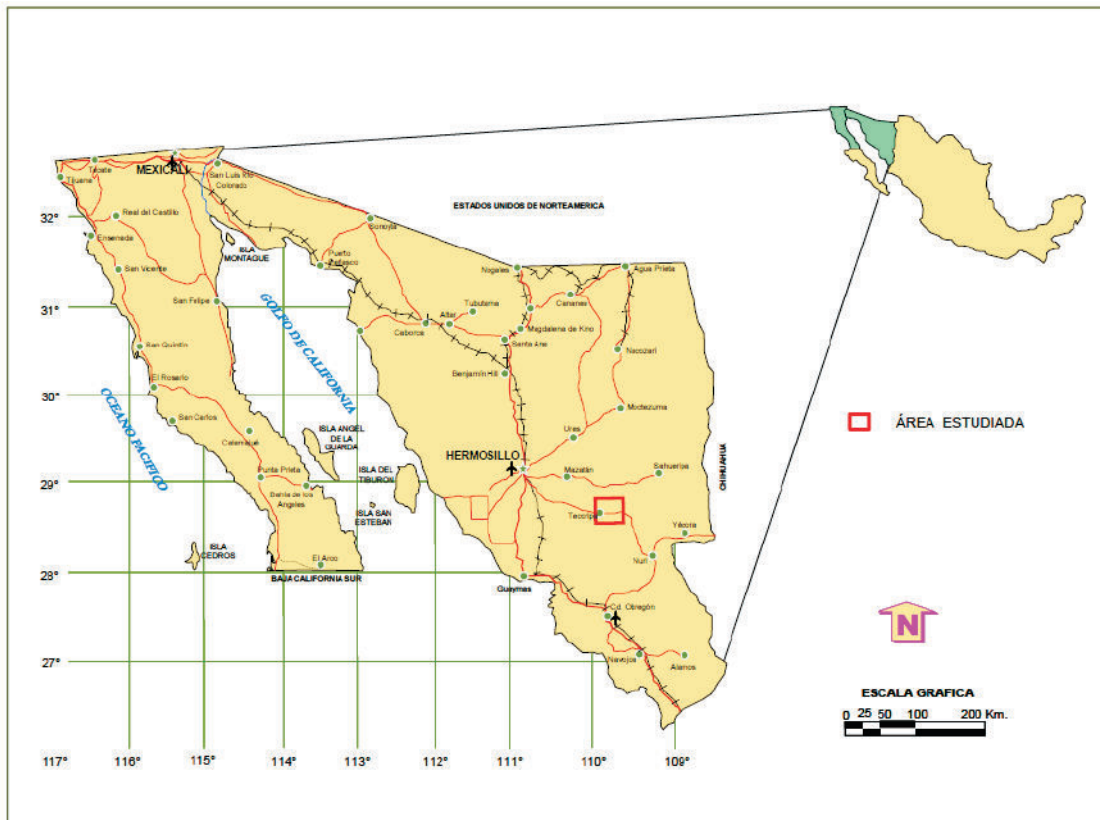
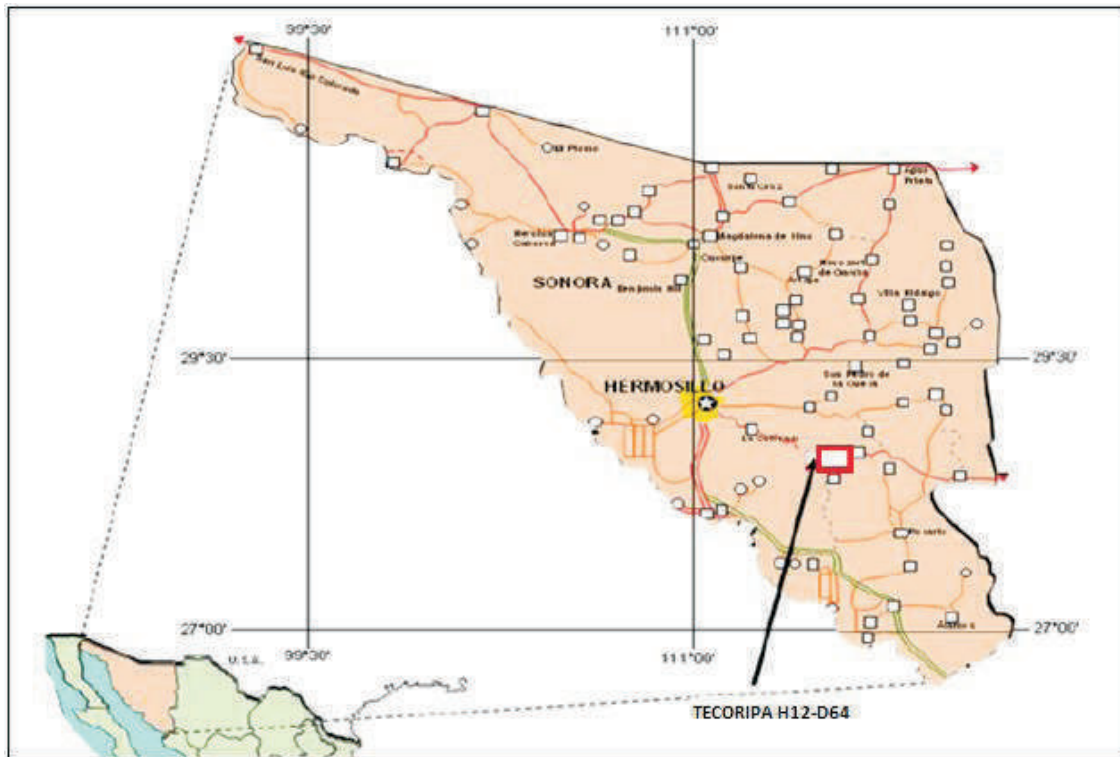


Figura 1. Localización del Área de Estudio (SGM, 2003).

### 2.2. Accesos y Vías de Comunicación

El acceso por vía terrestre se realiza por la carretera federal No. 16, tramo Hermosillo-Yécora, pasando por los poblados de La Colorada, San José de Pimas, Tecoripa, y La Barranca, del poblado de Tecoripa se desvían carreteras estatales como el tramo Tecoripa-Suaqui Grande; de la carretera federal Hermosillo-Yécora en el km. 141, se tiene la desviación a la población

de San Javier. De estas carreteras se desprenden caminos de terracería y algunas brechas, considerando que en general, el área se encuentra bien comunicada (Figura 2).



**Figura 2.** Accesos y Vías de Comunicación (SGM, 2003).

### 2.3. Fisiografía

Fisiográficamente está ubicada en la provincia de la Sierra Madre Occidental, dentro de la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos (Raisz, 1964). La subprovincia de Sierras y Valles Paralelos se caracteriza por ser una región de sierras alargadas, separadas por amplios valles intermontanos (Figura 3), como se observa en las sierras Las Tarugas, El Aliso y El Encinal. Están dispuestas paralelamente con un tren estructural de rumbo general hacia el noroeste. La sierra Agua Dulce de menor dimensión presenta una orientación hacia el noreste. En general se tienen elevaciones montañosas de entre los 850 y 1300 m sobre el nivel del mar y en los valles desde 200 a 400 m sobre el nivel del mar.

Las unidades paleozoicas forman escarpes muy pronunciados formando estructuras rocosas muy masivas y compactas, muy resistentes a la erosión. Las rocas del Triásico principalmente las unidades conglomeráticas del Grupo Barranca, presentan gran similitud geomorfológica.

Las rocas del Cretácico superior que constituyen a la Formación Tarahumara de composición intermedia presentan topografía más suave constituyendo lomeríos y mesetas. Las rocas volcánicas del Terciario que constituyen a la Formación Lista Blanca, forman escarpes más pronunciados y alargados.

Las rocas intrusivas ácidas en general se presentan alteradas y erosionadas dando origen a formas planas, excepto algunos afloramientos de dioritas y pórfidos que presentan topografía más elevada. Las rocas de la Formación Báucarit se encuentran rellenando algunos valles y forman lomeríos y cerros con topografías suave.

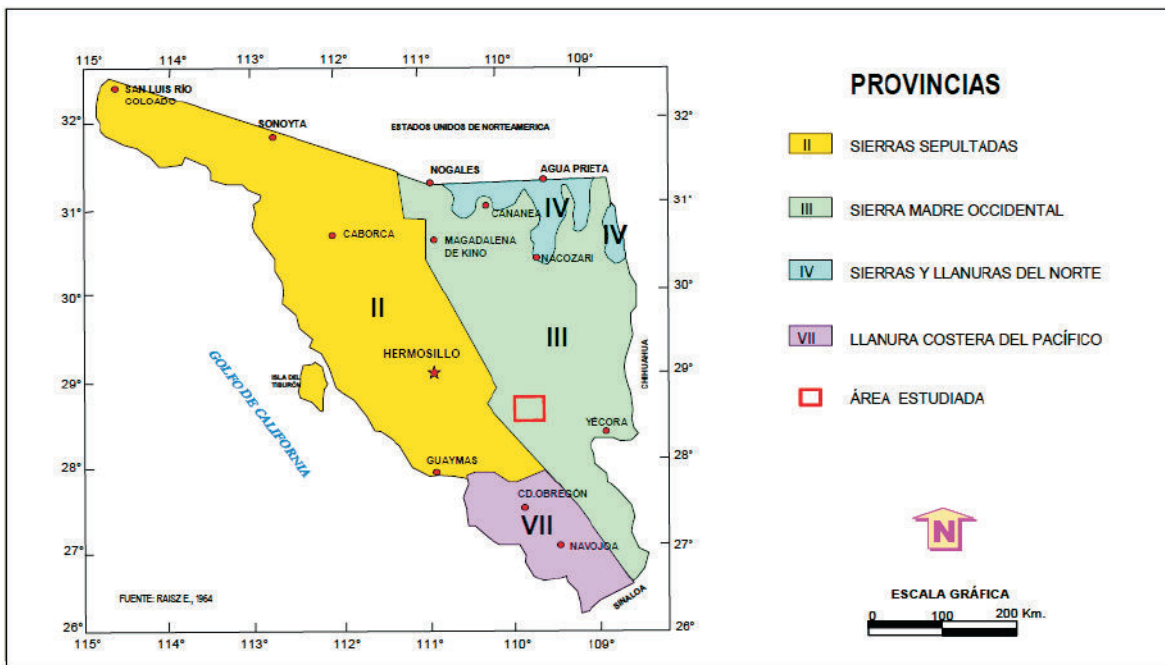


Figura 3. Provincias Fisiográficas de Sonora (SGM, 2003).

### 3. GEOLOGÍA

#### 3.1. Geología Superficial

El contexto geológico regional de la carta se ubica dentro del terreno tectonoestratigráfico Caborca, el cual se considera de afinidad eugeoclinal, que forma parte del cratón de

Norteamérica y que fue trasladado aproximadamente 800 km desde la parte oeste del cratón hasta su actual posición a lo largo de la megacizalla Mojave-Sonora (Coney y Campa, 1987).

La estratigrafía del área de estudio, que incluye a los distritos de La Colorada, San Javier y Suaqui Grande, en el contexto geológico regional de la carta Tecoripa; esta comprende unidades litoestratigráficas que varían en edad desde el Ordovícico medio al Holoceno representadas por rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas, tanto volcánicas como intrusivas.

Las rocas paleozoicas representan ambientes marinos, tanto de plataforma como de aguas profundas, están constituidas por caliza, lutita y arenisca. Las rocas mesozoicas sobreyacen discordantemente a las rocas paleozoicas y comprenden al Grupo Barranca del Triásico-Jurásico, consistente en secuencias detríticas de origen fluvial (Formación Arrayanes), transicional marino-continental (Formación Santa Clara), y aluvial (Formación Coyotes). El Grupo Barranca se encuentra sobreyacido en discordancia con la Formación Tarahumara del Cretácico superior, consistente en rocas volcánicas y vulcanosedimentarias. En el límite Cretácico superior-Paleoceno se emplazaron plutones de diorita, granodiorita y granito de edad Laramídica. El Cenozoico descansa en discordancia sobre el Mesozoico. La Formación Báucarit del Mioceno medio aflora como depósitos de conglomerados, areniscas, areniscas arcillosas e intercalaciones de rocas volcánicas de composición basáltica y andesítica. Concordantemente con la Formación Báucarit se tiene a la Formación Lista Blanca del Mioceno superior. Todas estas rocas son sobreyacidas discordantemente por depósitos no consolidados del Plio-Cuaternario (Figuras 4 Y 5).

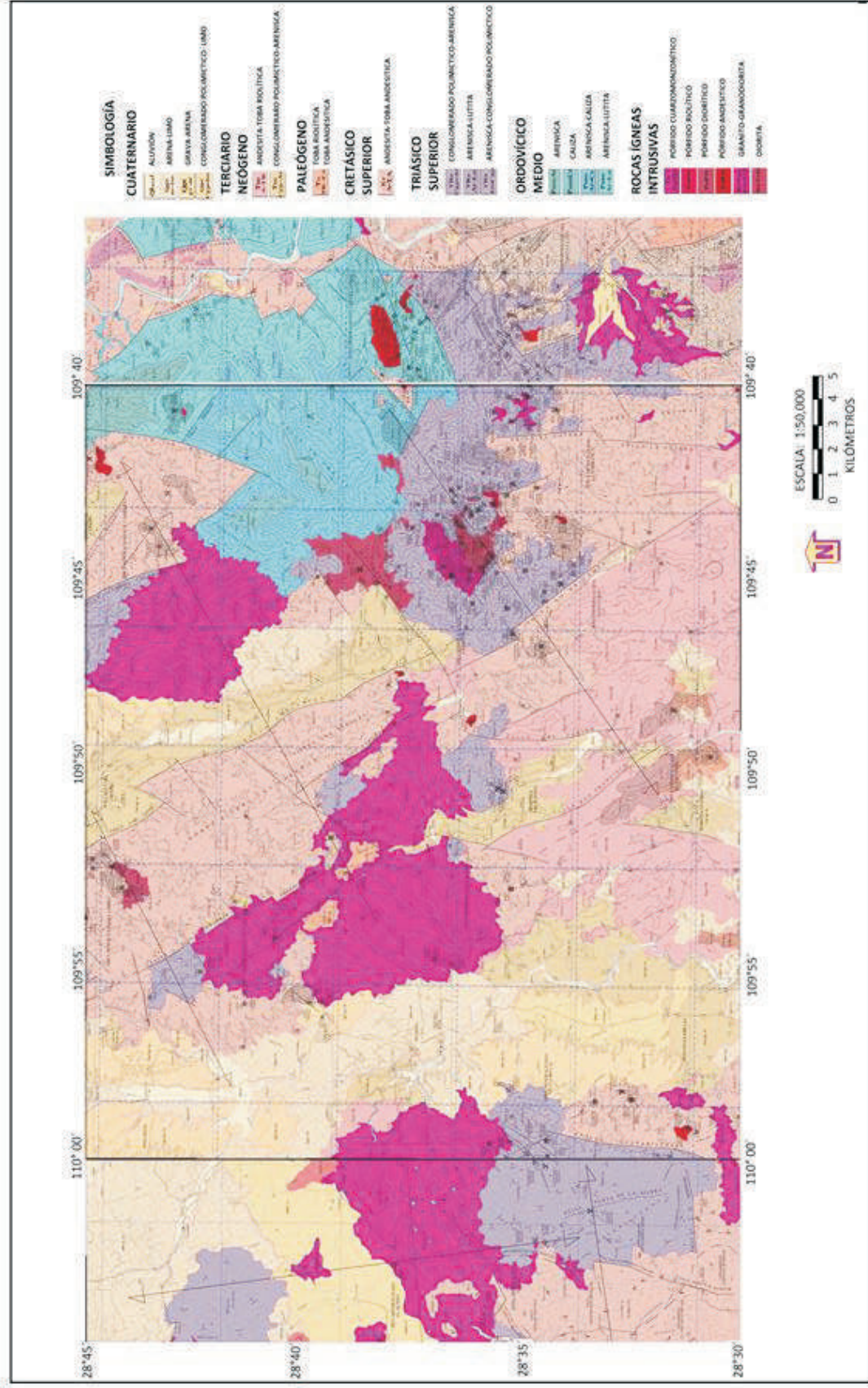


Figura 4. Carta Geológica-Minera Tecoripa H12D-64 (Modificado SGM, 2003).

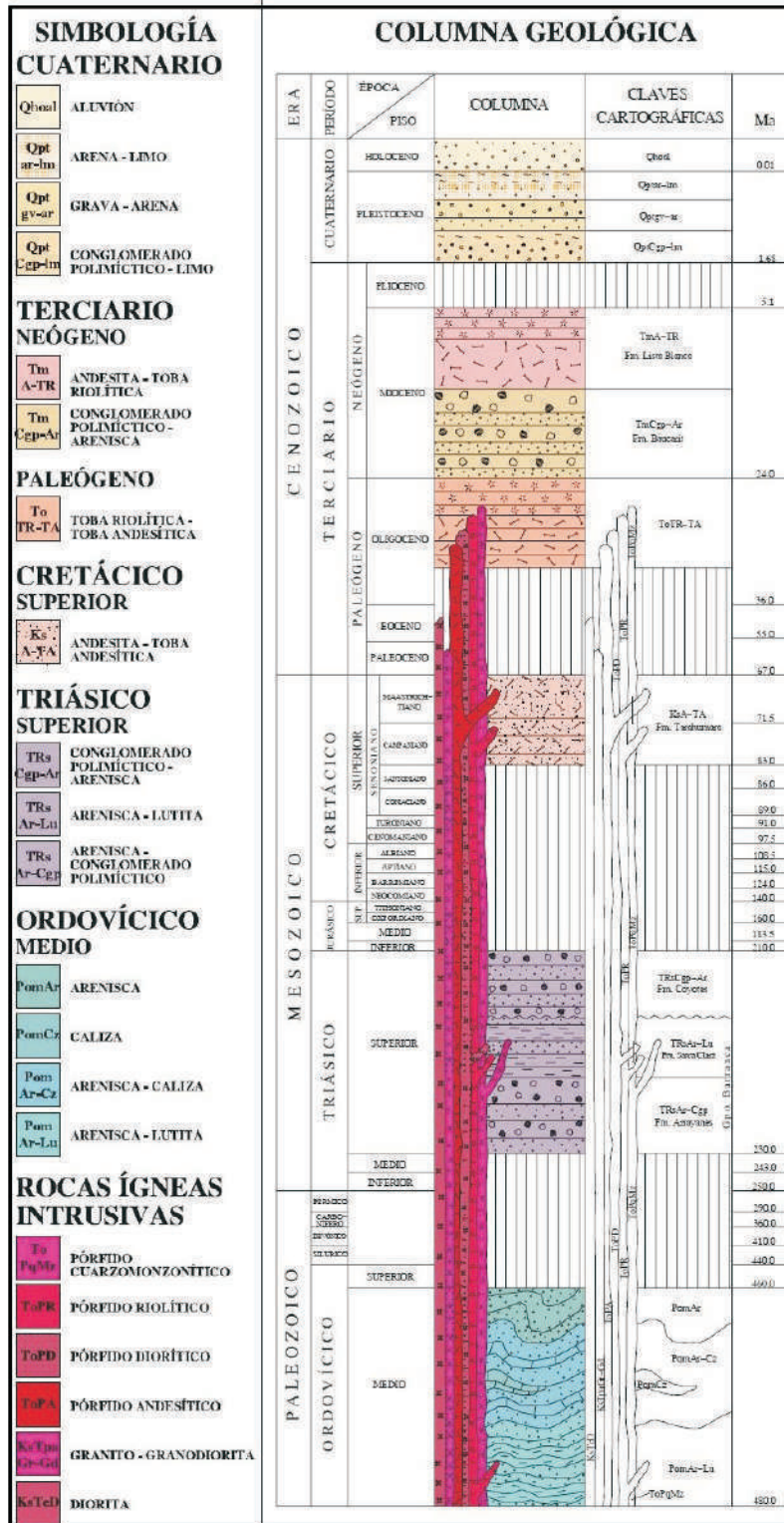


Figura 5. Columna Estratigráfica de la Carta Tecoripa H12-D64 (SGM, 2003).



### **3.1.1. Paleozoico**

Las rocas del Paleozoico corresponden a los depósitos de cuenca de aguas profundas, con contenidos de fósiles principalmente graptolitos en lutitas. En la carta están representadas por una secuencia sedimentaria de edad Ordovícico medio, integrada por cuatro unidades litológicas, con contenidos de graptolitos, la primera está constituida por lutita y arenisca, las cuales afloran en la porción noreste de la carta y en la mina Hidalgo; sobreyaciendo concordantemente a esta unidad se tienen los sedimentos, representados por arenisca y caliza, presentándose esta última unidad intercalada en la arenisca, afloran en la sierra Aliso, sierra Agua Dulce, rancho Aliso, puerto Colorado y arroyo La Tinaja; la tercera consiste en una caliza de color rojizo en muestras intemperizadas y un color gris claro en ejemplares planos. La cuarta unidad está constituida por arenisca de cuarzo y cubre concordantemente a la unidad lutita-arenisca, aflora en la esquina noreste de la carta.

#### **3.1.1.1. Secuencia Sedimentaria Ordovícica**

Lutita-Arenisca, Arenisca-Caliza, Caliza y Arenisca

Rocas sedimentarias de color gris claro a gris oscuro, de grano medio a fino con estratificación delgada, con escasas intercalaciones de caliza y pedernal, unidad a la que Barrera y Domínguez (1987) denominan informalmente unidad Soyopa; aflora en la mina Hidalgo, arroyo Plomosa, sierra Alisos, sierra Agua Dulce, rancho Aliso, puerto Colorado, puerto Agua Dulce y pico La Garza.

Esta secuencia sedimentaria, con base a su contenido de graptolitos, su posición estratigráfica y característica de los sedimentos, es considerada de edad Ordovícico medio y puede ser correlacionable con las rocas ordovícicas de la mina Barita de Mazatán, donde se tienen graptolitos similares a los descritos por Noll (1981) en la sierra del Cobachi. Se estima que estas rocas se depositaron en un ambiente marino de aguas profundas. Estas rocas presentan depósitos del tipo de relleno de fisuras de origen mesotermal. Las cuarcitas contienen más de 95% de cuarzo por lo que tienen posibilidades para ser explotadas por sílice.

### **3.1.2. Mesozoico**

Las rocas del Mesozoico se encuentran distribuidas en gran parte de la carta y están representadas por rocas sedimentarias del Triásico superior constituidas por areniscas, lutitas, conglomerados polimícticos, limolitas, areniscas, lutitas carbonosas y pedernal, que en conjunto representan al Grupo Barranca, integrado de la base a la cima por las formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes (SGM, 2003).

El Cretácico superior está representado por rocas volcánicas, correspondientes a la Formación Tarahumara. Ligado a este vulcanismo se tiene el emplazamiento del Batolito Laramídico, constituido por cuerpos graníticos, granodioríticos y dioríticos.

#### **3.1.2.1. Grupo Barranca**

Dumble (1900), introdujo la unidad “División Barranca”, que comprendió los estratos clásticos sedimentarios, los dividió en tres miembros: inferior, medio y superior.

King (1939), agrupó a los sedimentos del Mesozoico inferior y los elevó al grado de Formación, llamándolos Formación Barranca.

Alencaster (1961), a partir de flora y fauna fósil asigna una edad del Triásico tardío y propone que la Formación Barranca se eleve al rango de “Grupo Barranca” que comprende tres unidades litoestratigráficas: Formación Arrayanes, en la parte inferior, Formación Santa Clara en la parte media y Formación Coyotes en la parte superior.

Las rocas sedimentarias del Grupo Barranca se encuentran distribuidas en una franja orientada este-oeste en la parte central de Sonora, aproximadamente al norte de la coordenada 28° 25' y al sur de la coordenada 28° 56', en donde se encuentran los principales yacimientos y minas de grafito. Los afloramientos más extensos y expuestos se localizan en el área de Santa Clara, estimándose que conjuntamente conforman un espesor superior a los 3,000 m (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Además se encuentran afloramientos escasos en la parte sur del estado, en la región de Álamos y en otras localidades del sureste de Sonora cercanas a los límites con el estado de Chihuahua (Martínez, 1984). El Grupo Barranca se

encuentra en discordancia por medio de una brecha con la Formación Tarahumara del Cretácico Superior (Adabie, 1981; Vassallo, 1985).

#### **3.1.2.1.1. Formación Arrayanes**

La Formación Arrayanes aflora en una banda orientada Este-Oeste en la parte norte de la localidad de San Javier. Los afloramientos mejor expuestos se encuentran en la parte central de la localidad de San Javier (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Los autores mencionados definieron 3 miembros dentro de la Formación Arrayanes en la localidad de San Javier.

Consiste en una alternancia de areniscas de cuarzo y conglomerado polimíctico con intercalaciones delgadas de lutita y lodolita que afloran principalmente en el cerro El Carrizo y el Arroyo Arrayanes.

Esta unidad presenta un espesor aproximado de 900 m, es sobreyacida en contacto transicional con las rocas de la Formación Santa Clara y cubre discordantemente a las rocas del Ordovícico medio, se considera de edad Triásico superior y es correlacionable con el miembro inferior de las Formación Antimonio (González, 1980) del Triásico superior, localizado al noroeste del estado, en las cercanías de Caborca y en la sierra de La Flojera (Roldan y González, 1985), al suroeste de Hermosillo. Actualmente en estas rocas no se han reconocido yacimientos minerales.

El ambiente de depósito de la Formación Arrayanes se considera como de tipo fluvial, debido al gran número de paleocanales presentes y por análisis petrológico (Stewart y Roldán-Quintana, 1991).

#### **3.1.2.1.2. Formación Santa Clara**

La Formación Santa Clara aflora en una banda irregular a través de la Sierra de San Javier al sur de los afloramientos de la Formación Arrayanes (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). La Formación Santa Clara aflora en valles con vegetación y en las colinas bajas es menos

abundante. Los mejores afloramientos se encuentran en los cortes de carretera 2 o 3 km al sur de San Javier, 2 km al suroeste, y de 5 a 3 km al sureste del Rancho la Barranca.

La Formación Santa Clara en San Javier está compuesta de intercalaciones de limolitas, lutitas, areniscas, conglomerados, lutitas carbonosas y carbón (Fotografía 1).

A esta unidad se le observa un espesor aproximado a los 1100 m, se encuentra sobreyacida por la Formación Coyotes y por las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y cubre concordantemente en contacto transicional a las rocas de la Formación Arrayanes. En base al contenido de plantas fósiles, fauna marina y su relación estratigráfica con otras unidades se le considera de edad Triásico superior y es correlacionable en edad con el miembro superior que aflora en la sierra La Flojera, al noreste de Hermosillo y con las rocas del Triásico superior de la región de San Javier, al suroeste de San José de Moradillas (Roldán y González, 1985). Esta unidad presenta gran interés geológico-minero ya que aloja yacimientos minerales tanto metálicos como no metálicos, sobresaliendo la gran cantidad de mantos de carbón y grafito.



**Fotografía 1.** Lutitas del área de San Javier.

Wilson y Rocha (1946) hicieron una sección medida incompleta de la Formación Santa Clara en el distrito Santa Clara, midiendo 370 m. Mientras que Stewart y Roldán-Quintana (1991), basados en secciones generalizadas estimaron el espesor de la Formación Santa Clara en más de 1400 m, pero siendo este un dato inexacto.

El ambiente de depósito de la Formación Santa Clara ha sido difícil de entender y se ha interpretado de diferente manera. Se ha aceptado que el ambiente de depósito de esta formación es en base al contenido tanto de flora como de fauna fósil (Alencáster, 1961b; Silva-Pineda, 1961; Weber, 1980) de tipo transicional marino-terrestre con un clima tropical. Un estudio detallado de petrografía (Cojan y Potter, 1991), considera a la Formación Santa Clara como producto de un ambiente palustre que muy posiblemente estuvo restringido a una

gran cuenca formada por cuencas más pequeñas alimentadas por ríos que desembocaban hacia el sur, y que registraron pequeñas transiciones marinas hasta el final de su actividad en el Cárnico.

### 3.1.2.1.3. Formación Coyotes

La Formación Coyotes es una secuencia en la que dominan las secuencias de conglomerados con clastos sostenidos con predominancia de guijarros angulares a subredondeados de cuarzo arenisca y pedernal en una matriz de arenisca fina a muy gruesa (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). En algunas localidades de 4 a 6 km al sur de San Javier se observan clastos de cuarzo areniscas y calizas, los clastos de la Formación Coyotes son similares a las rocas de los estratos paleozoicos que subyacen discordantemente al Grupo Barranca (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Estos conglomerados se presentan en capas de 0.5 a 1.5 m de espesor, algunos de los cuales presentan gradación de más grueso en la base a relativamente fino en la cima (Stewart y Roldán-Quintana, 1991).

Esta unidad se encuentra sobreyacida discordantemente por las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y por los sedimentos de la Formación Báucarit, que cubre discordantemente a las rocas de la Formación Santa Clara.

Su ambiente de depósito se considera por corrientes fuertes sobre abanicos aluviales, esto lo atestigua la presencia de canales rellenos y espesores gruesos de los conglomerados soportados por clastos (Fotografía 2). En esta unidad actualmente no se han localizado yacimientos minerales.



**Fotografía 2.** Conglomerado con clastos angulares área San Javier.

### **3.1.3. Cretácico Superior**

#### **3.1.3.1. Formación Tarahumara**

Wilson y Rocha (1946), denominaron Formación Tarahumara a rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y vulcanosedimentarias que afloran en el arroyo Tarahumara, en el área de Santa Clara distante 4 km, al este de esta área.

Esta unidad consiste principalmente de andesita y toba andesítica con algunos afloramientos intercalados de dacitas, riolitas y tobas de composición dacítica, riolítica y aglomerados, que debido a la escala de la cartografía quedan incluidas en esta unidad.

A esta unidad se le considera un espesor aproximado a los 700 m, se presenta sobreyaciendo discordantemente y por contacto tectónico a las secuencias del Ordovícico medio y a los sedimentos del Grupo Barranca, es cubierta discordantemente por contacto tectónico por las rocas volcánicas de la Formación Lista Blanca, por los sedimentos de la Formación Báucarit y por los conglomerados del Pleistoceno.

Su ambiente de depósito se relaciona a un arco volcánico continental que existió durante el Cretácico superior y Terciario inferior. Esta unidad presenta gran interés geológico-minero, ya que aloja a una gran cantidad de yacimientos minerales de origen hidrotermal, tanto del tipo de relleno de fisuras como, brechas y diseminados.

La gruesa secuencia volcánica y volcanoclástica de la Formación Tarahumara se considera como parte del arco volcánico continental Laramídico de Sonora que se desarrolló durante el Cretácico tardío y el Paleoceno (Wilson y Rocha, 1946; McDowell *et al.*, 2001). Su emplazamiento y evolución fueron contemporáneos con los cuerpos plutónicos graníticos del batolito Laramídico (McDowell *et al.*, 2001).

### **3.1.4. Cretácico Superior – Oligoceno**

#### **3.1.4.1. Batolito Laramídico de Sonora**

El Batolito Laramídico de Sonora consiste de rocas plutónicas, generalmente calcoalcalinas que se generaron durante el evento laramídico, formando cuerpos de dimensiones batolíticas,

stocks, apófisis (granito- granodiorita y diorita) y troncos hipabisales (pórfidos andesíticos, dioríticos, riolíticos y cuarzomonzoníticos), que intrusieron a las rocas pre cretácicas.

Un conjunto de rocas intrusivas que afloran ampliamente en Sonora y que se interpretan genéticamente asociadas a las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara como parte de un arco volcánico del Cretácico tardío y Terciario temprano, intrusieron al Grupo Barranca y a la misma Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1946). Como parte de este conjunto se reportan plutones de diorita, granodiorita y granito en el centro y sur de Sonora. Wilson y Rocha (1946) reportaron intrusivos que abundan en la zona de Santa Clara y la Barranca en el municipio de San Javier, a los que se les asigna una edad del Cretácico a Terciario temprano.

Damon *et al.* (1983) determinaron una edad entre 62.9 y 62.7 Ma para este intrusivo. En la parte central del estado, afloran granitos y granodioritas con edades de 63 a 56 Ma (Damon *et al.*, 1983), que se alojan en la Formación Tarahumara. Los cuerpos intrusivos más jóvenes corresponden a stocks dioríticos a cuarzodioríticos con edades de 59 a 40 Ma (Amaya-Martínez *et al.*, 1993) que afloran en la región oriental del batolito de Río Chico y cortan a la Formación Tarahumara. McDowell *et al.* (1994) determinaron edades K-Ar, en el rango de 55 a 54 Ma para otros intrusivos en esa región.

### **3.1.5. Cenozoico**

#### **3.1.5.1. Formación Báucarit**

Cubriendo en discordancia a las rocas más antiguas del área de estudio, se tiene a la Formación Báucarit, la cual aflora en los valles del área. Dumble (1900) dio el nombre de División Báucarit a depósitos de conglomerados, areniscas y areniscas arcillosas regularmente consolidadas que están expuestas en la vecindad del pueblo de Báucarit en el sur del estado. Ese mismo autor notó que tales depósitos clásticos se presentaban rellenando a las cuencas alargadas de los valles de Sonora.

King (1939) aplicó el término de Formación Báucarit a esas mismas rocas y distingue en ella a un miembro superior clástico y un miembro inferior volcánico que consta de flujos, aglomerados basálticos y tobas andesítico-basálticas. La localidad tipo de esta formación es en

el arroyo Cedros cerca del pueblo de Báucarit (King, 1939). La Formación Báucarit aflora en casi todos los valles de Sonora donde forma un relleno clástico sedimentario que se formó durante la deformación de sierras y valles paralelos (Basin and Range). Sus principales componentes son conglomerados cuyos clastos reflejan la composición litológica de las sierras adyacentes, areniscas y en menor proporción limolitas.

Se le asigna a la Formación Báucarit una edad de 23 a 10 Ma (Bartolini *et al.*, 1992, 1994), se considera producto de la sedimentación continental principalmente de ambientes fluviales y lacustres interestratificados con rocas volcánicas principalmente básicas y ligadas íntimamente con la distensión terciaria. Actualmente no se ha reconocido que tengan interés geológico-minero.

### **3.1.5.2. Formación Lista Blanca**

Este término fue establecido por Dumble (1900) para describir una secuencia constituida por niveles de conglomerados y rocas volcánicas en el cerro Lista Blanca al oeste de San Marcial, Sonora a la que originalmente le había asignado una edad Triásica. Posteriormente King (1939) en la misma localidad le atribuye una edad Cretácica. Estas mismas edades se mantuvieron con Wilson y Rocha (1946). Después se establece que las rocas de la Formación Lista Blanca descansan concordante sobre conglomerados de la Formación Báucarit y en base a un fechamiento K-Ar en una latita se le asigna una edad de 10.4 Ma (Morales-Montaña *et al.*, 1990; Bartolini *et al.*, 1994). La Formación Lista Blanca está constituida por rocas piroclásticas félsicas y domos riódacíticos (Roldán-Quintana, 2002). En el cerro Lista Blanca, esta unidad consiste en una secuencia de 48 m de espesor de riolitas, ignimbritas y areniscas tobáceas que sobreyacen a conglomerados de la Formación Báucarit. En la región de Mesa Grande, la Formación Lista Blanca está sobreyacida en discordancia por basaltos de olivino recientes que forman mesetas (Roldán-Quintana, 2002).

### **3.1.6. Cuaternario**

#### **3.1.6.1. Cobertura Sedimentaria**

Cubriendo a toda la columna estratigráfica se encuentran los sedimentos recientes, constituidos por el aluvión y por conglomerados polimícticos derivados de las zonas



montañosas, con clastos derivados mayormente de la Formación Lista Blanca. La cobertura sedimentaria mantiene aislados a los cuerpos aflorantes del Grupo Barranca tanto en Moradillas como en San Marcial, dando la impresión de “islas” dentro de los sedimentos recientes (Alencáster, 1961).

Las rocas del Cuaternario están representadas por conglomerado-limo, grava-arena, arena-limo, de edad Pleistoceno y depósitos de aluvión de edad Holoceno.

### **3.2. Geología Estructural**

En la carta las características geomorfológicas más sobresalientes consisten en una sucesión de sierras altas, alargadas de rumbo preferencial NW-SE separadas por pequeños valles rellenos de material clástico derivado de las sierras circundantes, esta morfología es producto de la última etapa tectónica distensiva iniciada a partir del Terciario medio a superior, que dio como producto fallamiento en bloque delimitado por fallas normales (Horst sierra las Tarugas) y la formación de valles. Este evento dislocó y fragmento las unidades pre terciarias complicando aún más el panorama estructural.

Las rocas ordovícicas presentan fallamiento normal y microplegamientos, donde sus planos axiales muestran diferentes direcciones (sierra Aliso y mina Hidalgo), caracterizados por pliegues isópacos y cerrados, correspondiendo a una o más etapas compresivas paleozoicas, ya que presentan divergencias en sus direcciones axiales. Las rocas del Triásico están representadas por el Grupo Barranca, presentan una orientación a nivel regional casi E-W, evidenciando una deformación compresiva. En la carta no se observa esta orientación. En las formaciones Arrayanes y Santa Clara se presentan pliegues isópacos con planos axiales orientados al NW y echados al NE, la Formación Coyotes presenta microplegamientos pudiéndose distinguir pliegues King (km. 3 entronque carretera a San Javier) asociados a pequeñas fallas inversas. Las rocas cretácicas de la Formación Tarahumara presentan evidencias de deformación compresiva como lo atestigua la existencia de pliegues abiertos (porción este, km. 4 carretera a San Javier y al oeste de la sierra El Encinal), esta deformación se considera producto de la orogenia Laramide y Mesocretácica. Las unidades del Terciario están caracterizadas por fallamiento normal de rumbo preferencial NW-SE truncados por

fallas con rumbo NE-SW, esta orientación es típica de la región y se le atribuye a la extensión del episodio de sierras y valles paralelos (Figura 6).

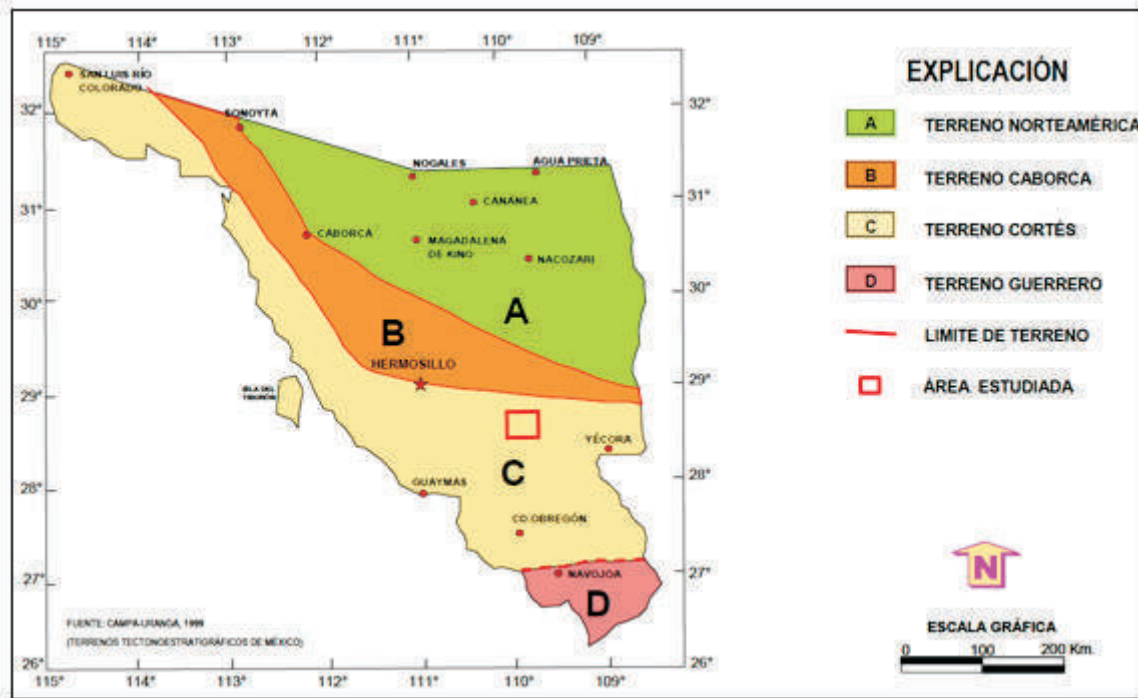
### **3.2.1. Deformación dúctil – frágil**

Esta deformación se manifiesta en las rocas del Ordovícico medio, como en las del Triásico superior, en las primeras rocas (Ar-Lu), se tienen microplegamientos a nivel de afloramiento, con orientación de los planos axiales al NW, con buzamientos al NE, su estratificación dominante (So), presenta un rumbo NW 20°-40° SE, con echado de 20°-45° tanto al NE como SW. Las rocas del Triásico (Formación Arrayanes, Santa Clara y Coyotes), presentan pliegues isópacos, con planos axiales de rumbo general de NW con echados hacia el NE. En las formaciones Santa Clara y Coyotes se observan pliegues tipo “Kink” asociados a pequeñas fallas inversas, no cartografiadas a la escala de este estudio.

### **3.2.2. Deformación frágil**

Los sistemas de la deformación frágil están representados por grandes fallas normales localizadas en diferentes porciones de la carta. El primer sistema y el más importante lo integran las estructuras más sobresalientes de la carta y está representado por las fallas normales con desplazamientos laterales: El Porvenir y Las Lajas con rumbo NW 20°-30° SE y longitudes de 17 km, limitan el horst Las Tarugas. Se tiene otro sistema de estructuras representado por fallas normales, denominadas San Miguelito y El Aliso, con rumbo NE10°-55° SW y longitudes de 8 a 16 km, ponen en contacto tectónico a las rocas del Ordovícico con las volcánicas del Cretácico superior. Otro tercer sistema lo integran las estructuras con rumbo casi N-S, representadas por las fallas normales: Agua Nueva, El Sabino, La Gotera y Guayabillal, con longitudes que varían de 4 a 7 km, poniendo en contacto tectónico a rocas del Triásico superior con las del Cretácico superior, así como a unidades del Cretácico con las del Mioceno. Un cuarto sistema lo representan las fallas normales: Cerro Colorado, Rodeo, Hidalgo, De Campa y San Francisco, con rumbos NW 20°-60° SE y longitudes de 3 a 7 km, afectando a rocas desde el Ordovícico hasta el Mioceno.





**Figura 7.** Ubicación de la Carta en el terreno Tectonoestratigráfico (SGM, 2003).

Los principales eventos tectónicos que se reconocen son: Orogenia Paleozoica, muy difícil de estudiar, ya que la intensidad del tectonismo mesozoico y cenozoico enmascaran y ocultan las estructuras de ese tiempo., sin embargo trabajos previos a detalle en la porción occidental de la carta (Poole y Madrid (1986), Radelli y otros (1987), Stewart y otros 1990), han establecido al menos tres eventos de deformación en esta zona, el primero en el Devónico medio, el segundo en el Mississípico tardío, reportado en la región de la Barita de Mazatán (Poole y Madrid, 1986), y un tercero en el intervalo del Pérmico al Triásico medio y que parece corresponder a la fase más importante, ya que es la responsable de la superposición tectónica de las rocas paleozoicas de cuenca sobre sedimentos de plataforma (Radelli et al., 1987), su origen e interpretación se define por la subducción del Paleozoico tardío-Triásico medio de la placa Kula bajo la placa Americana causando orogenia y deformación en la columna paleozoica temprana y paleozoica precámbrica. Después del último evento magmático en el Precámbrico (Granito Aibó) transcurrió un periodo de tiempo del cual no se reconoce registro litológico alguno, hasta el inicio de depósitos de secuencias miogeosinclinales en discordancia sobre dicho basamento.

### 3.3.1. Orogenia Nevadiana

Orogenia Nevadiana, este evento es asignado al Jurásico, durante él ocurren grandes fallas con desplazamientos laterales con rumbo NW-SE (Anderson y Silver, 1979) y la depositación de grandes secuencias de sedimentos continentales y marinos en cuencas relacionadas a la apertura del Golfo de México. Esto se evidencia por los sedimentos del Grupo Barranca, donde en forma regional sus afloramientos presentan una orientación casi E-W, atestiguando un evento distensivo.

En la carta sus afloramientos no presentan esta orientación. Es evidente que el Grupo Barranca se debió a una etapa distensiva triásica, orientada E-W. Presenta evidencias de deformación compresiva que pudo ocurrir en el Jurásico superior, asignándola a la orogenia Nevadiana propuesta por Rangin (1982). Stewart y Roldan (1991) consideran que el Grupo Barranca se depositó en una cuenca tipo rift y que fue originada por fallamiento transtensional y/o extensional.

### 3.3.2. Batolito Laramídico

La primera fase ocurrió entre 90 y 40 Ma en el estado de Sonora con el emplazamiento del Batolito Laramide (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 albíta-epidota. En el estado de Sonora se encuentra en la parte central con espesores de hasta 300 m (Amaya *et al.*, 1994).

Ambas deformaciones son debidas a un evento compresivo. En la región, esta orogenia se caracteriza por una fase de compresión, originando un arco magmático y su consecuente arco volcánico. Este evento está evidenciado en la carta por el emplazamiento de cuerpos

intrusivos de dimensiones batolíticas y la deformación de las rocas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior.

A principios del Eoceno y hasta el Oligoceno se genera un arco magmático continental, el cual es acompañado de cúpulas graníticas de menor magnitud que originan apófisis y troncos de diferentes composiciones que afectaron a las rocas anteriores. En la carta están evidenciados por pórfidos cuarzomonzoníticos, riolíticos, dioríticos y andesíticos (Damon, 1989).

### **3.3.3. Basin and Range**

En el Oligoceno se genera un vulcanismo bimodal, cuya composición varía de félsica a intermedia, manifestándose en la carta en forma de derrames fisurales. Es 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, conformando bloque levantados y escalonados (Horst sierra las Tarugas) y valles elongados (grabens El Mortero y Agua Blanca). Según Elston (1976) esta distensión inició hace  $18 \pm 3$  Ma en Arizona, mientras que para Cochemé (1985) inició hace unos 17 Ma (Mioceno inferior) en Yécora, también la fechan con edades de  $\pm 10$  Ma (Zoback *et al.*, 1981, en Radelli, 2005).

Durante esta fase extensiva conocida como Basin and Range, se tiene un adelgazamiento de la corteza con fusión parcial y producción de un magma básico que llega a la superficie a través de fallas normales, dando lugar a un vulcanismo bimodal de tipo fisural (Formación Lista Blanca), con edad desde 17.2 a 12.0 Ma.

## **4. MÉTODO GRAVIMÉTRICO**

El método gravimétrico de prospección se basa en la medida, en superficie, de las pequeñas variaciones (o anomalías) de la componente vertical del campo gravimétrico terrestre. Estas variaciones son debidas a una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo las anomalías, se puede llegar a una interpretación más o

menos probable de la situación de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad.

Tres son los aparatos clásicos empleados en el método gravimétrico: la balanza de torsión que mide las derivadas de la gravedad, el péndulo que mide la gravedad absoluta o relativa, y el gravímetro que mide la gravedad relativa.

#### 4.1. Ley de Gravitación Universal

La atracción de las masas obedece a la Ley de la Gravitación de Newton que establece que la atracción de dos masas  $m_1$  y  $m_2$  es directamente proporcional a su producto e inversamente al cuadrado de su distancia.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

Dónde:

$$G = \text{Contante de Gravitación Universal } 6.67 \times 10^{-8} \frac{\text{cm}^2}{\text{gr} \cdot \text{s}^2} \quad (2)$$

Entonces la aceleración gravitacional  $g$  sobre la masa  $m$  es:

$$g = \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2} \quad (3)$$

También se le conoce como atracción gravitacional. La aceleración gravitacional fue medida primero por Galileo en su famoso experimento en Pisa. El valor numérico de  $g$  sobre la superficie de la Tierra es alrededor de  $980 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$ . En honor a Galileo la unidad de aceleración de gravedad,  $1\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$  es llamada Galileo o Gal. (Telford, 1990).

#### 4.2. Forma de la Tierra

La variación regular de la gravedad terrestre con la latitud se debe a dos factores: la rotación de la Tierra y su desviación de la verdadera esfericidad. Los efectos de la rotación se pueden determinar fácilmente utilizando las reglas sencillas que rigen la aceleración centrífuga de un cuerpo que gira. La forma de la Tierra interviene porque sobre una Tierra no esférica la atracción es menor en los puntos más alejados del centro (en el que se puede considerar que

está concentrada la masa), y es mayor en los puntos más cercanos a él. En una Tierra achatada en los polos la atracción gravitatoria debe ser mayor en las regiones polares que en el ecuador. Además, la componente de la fuerza centrífuga que se opone a la gravedad es mayor en las proximidades del ecuador aproximadamente 10,000 miligales menor que en una latitud de  $90^{\circ}$ . Aproximadamente la mitad de esta diferencia, como ha determinado Hammer, se contrarresta por la disminución de la atracción desde el ecuador hacia el polo, debido a que existe una mayor cantidad de masa entre el centro y el ecuador abombado, que entre el centro y las áreas polares achatadas. La diferencia actual entre el polo y el ecuador es aproximadamente de 5,300 miligales.

#### **4.2.1. El Geoide**

Se le llama Geoide a la superficie de equilibrio de los mares de la Tierra si éstos se pudieran extender por los continentes a través de canales imaginarios hechos en ellos bajo el nivel del mar. Es decir, sería la superficie equipotencial correspondiente al nivel de los mares. Difiere del esferoide en que los continentes y los fondos marinos están irregularmente repartidos sobre la Tierra y, asimismo, en las discontinuidades de densidad de la Tierra.

Como la plomada (normal del geoide) tiende a desviarse hacia las regiones de exceso de masa (como los continentes) y a alejarse de las de déficit de masa (como los océanos), la consecuencia es que el geoide está por encima del esferoide en los continentes y por debajo en los océanos (Figura 8).

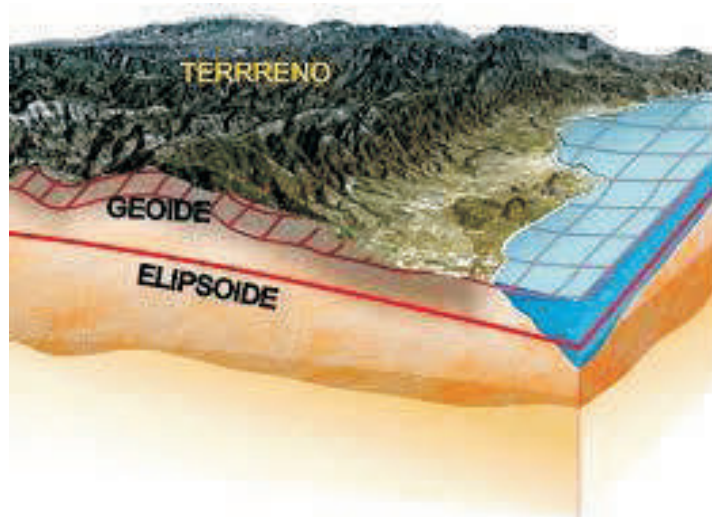
#### **4.2.2. El Elipsoide**

Debido a la complejidad de las variaciones internas de la densidad, es más común referenciarse a una superficie más suave y simple. Por acuerdo internacional, esta superficie equipotencial imaginaria es la superficie esferoidal que formaría una Tierra rotando y con una densidad uniforme, además de que es la que mejor se aproxima a la forma terrestre. Las diferencias en altura entre este esferoide y el geoide rara vez exceden a los 100 metros y generalmente caen debajo de 50 metros (Blakely, 1995) y reflejan variaciones laterales a



partir del modelo de densidad uniforme. El campo gravitacional de un elipsoide es de importancia fundamental porque es fácilmente manejable, matemáticamente hablado, y las desviaciones del campo gravimétrico real y del elipsoide son relativamente pequeñas.

La gravimetría está íntimamente relacionada con estas tres superficies, geoide, elipsoide y topografía (Figura 8).



**Figura 8.** Esquema del Geoide y el Elipsoide (Fuente: INEGI).

#### **4.3. 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 (Figura 9).

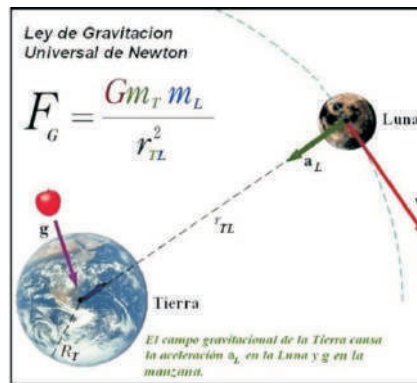


Figura 9. Fuerza de atracción de la Tierra sobre la Luna (Fuente: Paolera, 2013).

#### 4.4. Medición de la Gravedad

Se pueden encontrar tres distintas formas para medir las anomalías de la gravedad: medición 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 (Figura 10); 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.

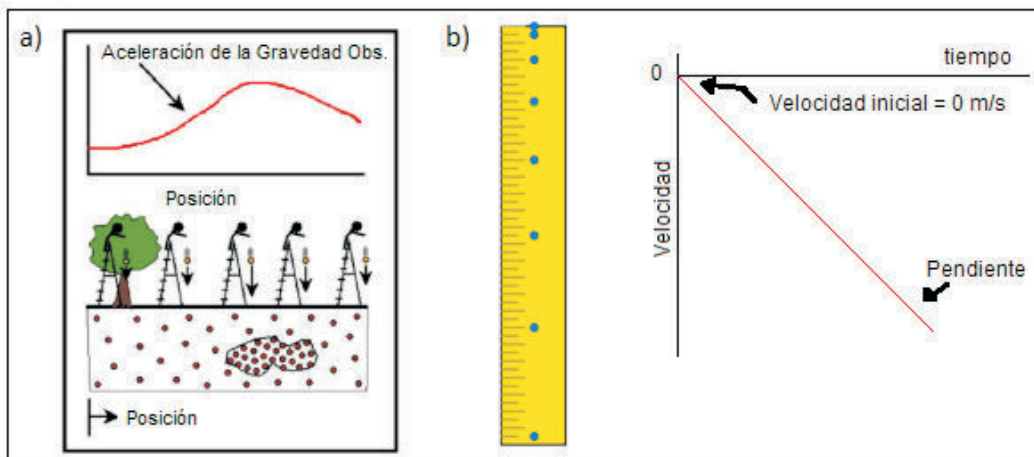


Figura 10. Caída Libre de un Cuerpo. a) Aceleración de la gravedad. b) Posición de un cuerpo en caída libre a intervalos regulares de 1 segundo. Se observa que la distancia recorrida en cada intervalo es mayor debido a que la velocidad va aumentando por el efecto de la gravedad (Fuente: educaplus).

#### 4.4.1. Gravímetros

A partir de año 1932, se empezaron a utilizar instrumentos que se basan en el principio de las balanzas de resorte para medir la gravedad y sus variaciones, éstos se conocen actualmente como gravímetros.

El gravímetro consiste en una masa suspendida en un resorte, la cual se deforma proporcionalmente a la fuerza de gravedad que actúa en la masa. En condiciones de equilibrio estático se tiene que:

$$kd = mg \quad (4)$$

En donde “k” es la constante del resorte, “d” es la elongación del resorte para contrarrestar la fuerza “mg”, por lo tanto:

$$g = \frac{kd}{m} \quad (5)$$

La aceleración “g” de la gravedad solo depende de la deformación “d”, considerando que “k” y “m” son fijos.

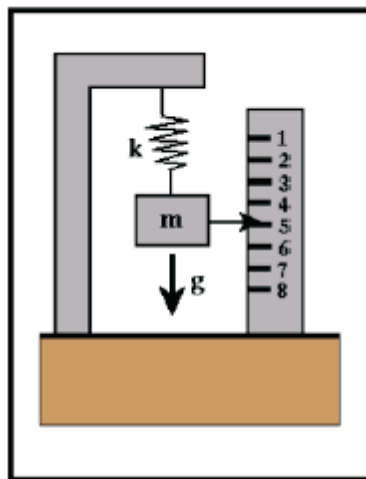


Figura 11. Gravímetro de resorte o torsión (Boyd, 2010).

Principalmente se tienen dos tipos de gravímetros:

-**Los estables:** estos instrumentos solo tienen un elemento para equilibrar la fuerza gravitacional, es decir, la variación de la gravedad implica un desplazamiento lineal, angular o de tipo eléctrico. Son sistemas muy sensibles con respecto a los cambios de temperatura, presión y pequeñas variaciones sísmicas y magnéticas.

-**Los inestables:** la fuerza gravitacional en estos sistemas se encuentra en un equilibrio inestable que posee una fuerza restauradora. Su inestabilidad es debida a una tercera fuerza que amplifica el efecto de cualquier variación en la gravedad con respecto al valor correspondiente a su equilibrio. Estos instrumentos poseen una mayor sensibilidad y una mayor resolución debido a que la tercera fuerza es proporcional a la magnitud de la variación y actúa en la misma dirección.

La diferencia entre ambos gravímetros consiste en que el segundo tipo (inestables) en lugar de medir la deformación del resorte, aplica fuerzas externas para equilibrar la fuerza de la gravedad, obteniendo de esta manera una mayor aproximación en las lecturas.

#### **4.5. Corrección de datos gravimétricos**

##### **4.5.1. Gravedad teórica. Corrección por Latitud**

En 1672 Richer refería, sin explicarlo, que la gravedad variaba de un punto a otro de la Tierra. Poco después, independientemente y casi al mismo tiempo, Newton y Huygens lo explicaban diciendo que este fenómeno se debía a que la Tierra no era de forma esférica.

En efecto, como la Tierra está achatada por los polos, la distancia a su centro es máxima en el ecuador (por tanto el valor de la gravedad es mínimo) y mínima en los polos (valor de gravedad máximo). A esta variación se suma la del efecto de rotación de la Tierra, llamada la fuerza centrífuga, que es máxima en el ecuador y nula en los polos y siempre opuesta a la fuerza de gravedad. Como consecuencia de ambos efectos la aceleración de la gravedad varía, aproximadamente de 978,000 mGal en el ecuador a 983,000 mGal en los polos.

El campo de gravedad de referencia es un modelo matemático del campo gravitatorio. Esta fórmula también se llama gravedad teórica. La Fórmula Internacional de la Gravedad para 1984 es:

$$C_{lat} = g_{ec} [1 + \alpha \text{sen}^2 (\lambda) + \beta \text{sen}^2 (2\lambda)] \quad (6)$$

Donde:

$\lambda$  es la latitud del sitio en la superficie del elipsoide.

$$g_{ec} = 978.03268 \text{ Gal}; g_{polo} = 938.20207$$

$$\alpha = 0.0052855$$

$$\beta = 0.0000016$$

En un levantamiento gravimétrico la estación base local puede o no estar referida (amarrada) a una base en donde se conoce la  $g$  absoluta. Si está amarrada se aplica la Fórmula Internacional, si no está amarrada, la corrección por latitud se realiza aplicando la expresión del gradiente:

$$C_{LAT} = 0.81 \sin 2 \lambda \quad (7)$$

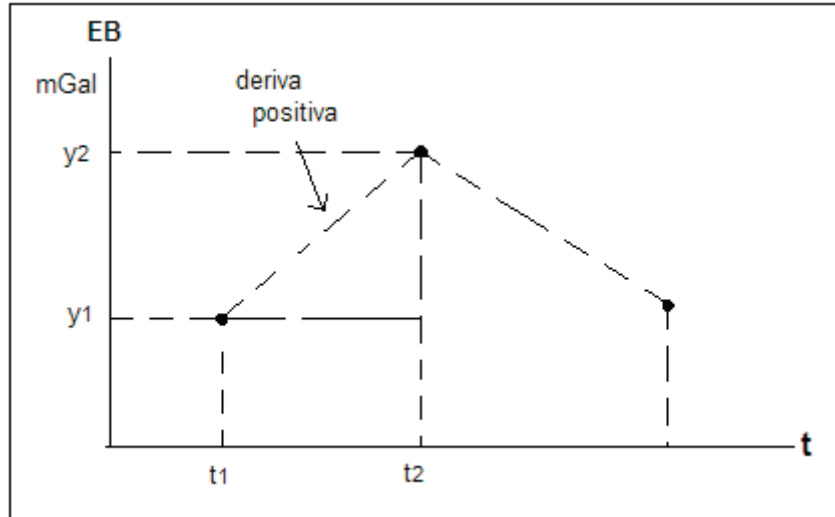
Donde:

$\lambda$  es la latitud

$\lambda = 28.37^\circ$  para el área de Tecoripa (Obtenida de los perfiles medidos en campo).

#### 4.5.2. Corrección por Deriva

El gravímetro, como todo instrumento de precisión, da lugar a lo que se llama deriva instrumental (o variación con el tiempo de la lectura de una estación); es decir, si efectuamos medidas sobre una misma estación a diversos intervalos de tiempo obtenemos valores ligeramente distintos. Esta deriva está producida principalmente por la fatiga del sistema de muelles, o por las variaciones de temperatura, aunque también existen razones incontroladas y otras calculables como es el efecto luni-solar o de las mareas (Figura 12).



**Figura 12.** Corrección por Deriva.

Para eliminar estos dos efectos (marea y deriva), se reocupan algunas estaciones base suponiendo que el cambio temporal es lineal en ese lapso de tiempo. Las estaciones no reocupadas se corrigen, de tal forma que una deriva positiva requiere una corrección negativa y viceversa, en este tipo de corrección también se elimina el efecto de mareas.

#### 4.5.3. Corrección por Aire Libre

Cuando se realizan mediciones en dos puntos de la superficie que se encuentran a diferente altura, la gravedad observada no es igual. Se conoce como corrección de Aire Libre porque con el solo hecho de cambiar el nivel, se genera una variación de la gravedad y entre los dos niveles solo se considera aire (Figura 13).

Es la medida simplemente a la altura  $h$  de la estación, es decir, al estar más alejada del centro de la Tierra. Suponiendo a la Tierra esférica, sea  $M$  su masa y  $r$  su radio, por definición de  $g$  tenemos:

$$g = G \frac{M \cdot 1}{R^2} ; \frac{\partial g}{\partial r} = -2 G \frac{M}{r^3} = \frac{2g}{r} = -0.3085 \frac{mgal}{m} \quad (8)$$

Poniendo para  $g$  y  $r$  los valores medios.

Para la altura  $h$  en metros será  $-0.3085 h$ .

Ahora bien, como las reducciones las hacemos para calcular el valor que tendría  $g$  al nivel del mar  $M$ , habrá que sumar  $0.3085 h$  a la gravedad observada.

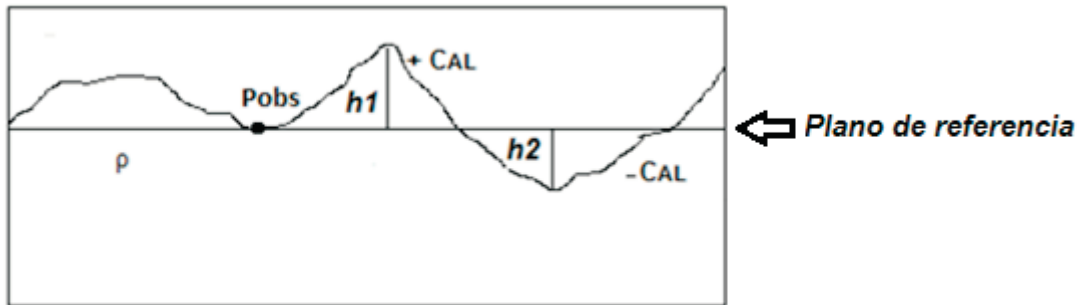


Figura 13. Corrección por Aire Libre.

#### 4.5.4. Corrección de Bouguer

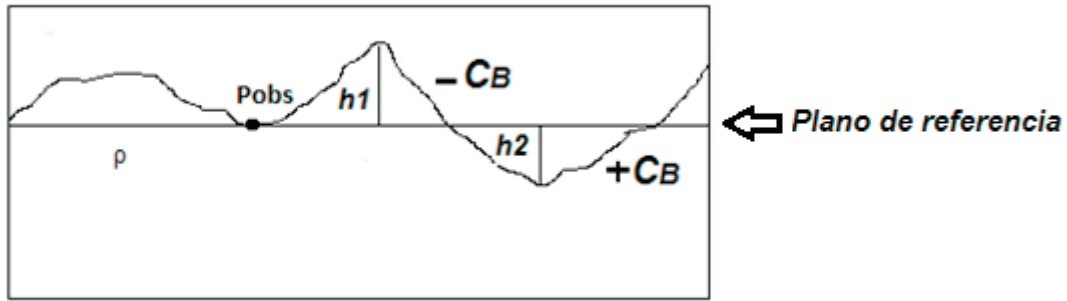
Se calcula hallando el efecto Gravífico del terreno comprendido entre el nivel de la estación (plano de cota  $h$ ) y el nivel del mar, suponiendo que la estación se ha hecho en un plano topográfico del terreno (Figura 14).

La ecuación de la placa infinita es:

$$C_B = 2 \pi G \rho h = \mp 0.0419 \rho h \quad (9)$$

Donde:

$\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$  densidad cortical típica



**Figura 14.** Corrección de Bouguer.

Cuando se hace la corrección de aire libre se ignora la masa que existe entre la estación y el plano de referencia. La Corrección de Bouguer aproxima todas las masas arriba del plano de referencia a una losa homogénea de extensión lateral infinita de espesor igual a la altura  $h$  de la estación respecto al plano de referencia.

Cuando la corrección de Aire libre es positiva, la corrección de Bouguer es negativa y viceversa.

#### 4.5.5. Corrección Topográfica

Para reducir el valor observado de la gravedad al valor que tendría al nivel del mar solo queda tener en cuenta el efecto Gravífico de las masas por encima y por debajo del nivel  $h$  de la estación, ya que en la corrección de Bouguer, se supone que el terreno es horizontal y por lo tanto no se consideran sus irregularidades. El material por encima de la estación atraerá a la masa unidad puesta en el sentido opuesto a la fuerza de la gravedad, mientras el material por debajo actuará en sentido contrario. Puesto que el efecto del material del valle habría que restarlo a la corrección de Bouguer y ésta es negativa, la corrección total topográfica ira siempre sumada a la gravedad observada. Por lo tanto, la corrección topográfica tiene en cuenta el efecto de la topografía alrededor de la estación (Figura 15), y para ambos casos, un valle o una colina cercana a la estación, siempre será positiva.



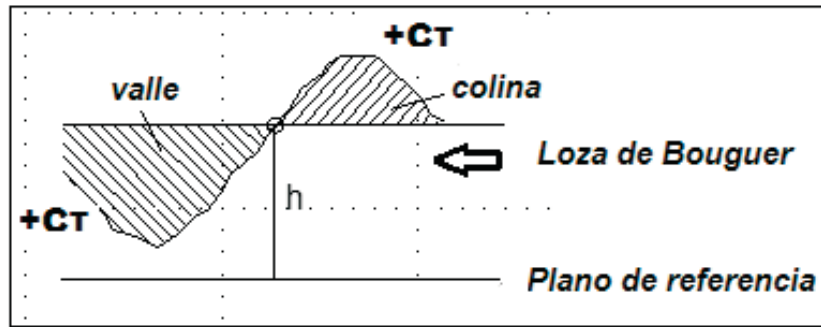


Figura 15. Corrección Topográfica.

Para hallar esta corrección se emplea la plantilla de Hammer que consiste en una gráfica con una serie de círculos concéntricos alrededor de la estación y divididos en sectores tal como lo indica la figura 16.

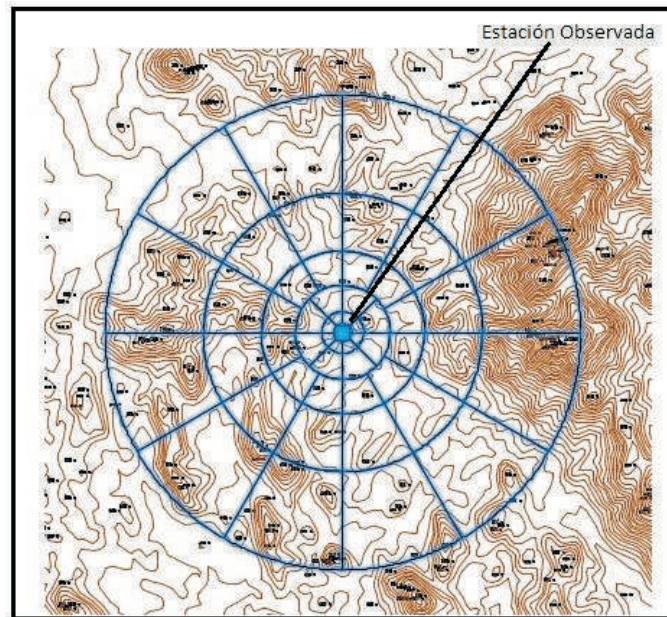


Figura 16. Plantilla de Hammer.

Con ayuda de unas tablas calculadas por Hammer (Apéndice A), se determinan los efectos gravínicos debidos a cada uno de los prismas que tienen de base a estos sectores y altura, la altura media de la zona en la que está. Estos gráficos se superponen al mapa topográfico, de donde se deduce dicha altura media. Para las zonas próximas a la estación se suele hacer una

nivelación precisa del terreno mientras para las zonas más alejadas se puede emplear la altimetría de un mapa topográfico escala 1:50,000.

#### Anomalía de Aire Libre

La anomalía de Aire Libre queda expresada de la siguiente manera:

$$A_{AL} = g_{OBS} - C_{LAT} \pm C_{AL} \quad (10)$$

$$A_{AL} = g_{OBS} - C_{LAT} \pm 0.3085 h \quad (11)$$

Esta corrección debe sumarse a las mediciones de gravedad si la estación se encuentra por encima del plano de referencia o sustraerse en caso contrario (Khan, 1980).

#### 4.5.6. 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:

$$A_B = g_{OBS} - C_{LAT} \pm C_D \pm C_{AL} \mp C_B + C_T \quad (12)$$

Donde:

$g_o$  = 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.

#### 4.6. Separación de Anomalía 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 el efecto residual debido a las masas superficiales (estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes).

En prospección interesa hacer resaltar el efecto debido a las masas superficiales, eliminando o reduciendo al mínimo el debido de masas profundas. Por ello se define corrientemente la anomalía regional como el efecto de todo aquello que no le interesa al prospector.

La anomalía residual sería:

**Anomalía Residual**= Anomalía de Bouguer - Anomalía Regional

Recordemos que el mapa residual se obtendrá simplemente como diferencia entre el mapa de Bouguer y el Regional.

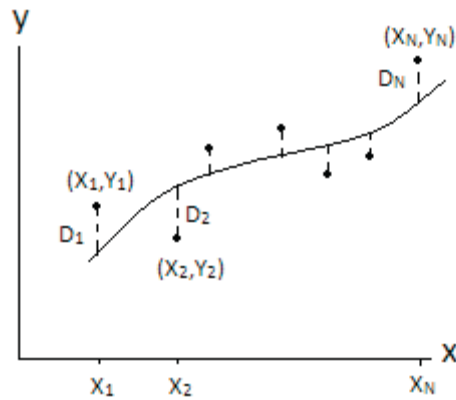
Hay que recordar que como cualquier otra técnica geofísica, el factor más importante en la interpretación es el conocimiento de la geología local.

#### **4.6.1. Ajuste Polinomial por Mínimos Cuadrados**

Existen varios métodos para la determinación del mapa residual. Algunos de los métodos para calcularlos son: Método de Saxov y Nygaard, método de Griffin, determinación por mínimos cuadrados, promedios móviles, entre otros.

El regional es representado por un perfil o una superficie polinomial, estimándose ésta por mínimos cuadrados. La curva de mejor ajuste, es aquella que minimiza las desviaciones ( $D_i$ ) (Figura 17). El grado del polinomio depende de la complejidad del regional.

En esta ocasión se realizó un ajuste Polinomial por el Método de Mínimos Cuadrados. Para evitar juicios subjetivos al construir rectas, parábolas, u otras curvas aproximantes de ajustes de datos, es necesario acordar una definición de recta de mejor ajuste, parábola de mejor ajuste, etc.



**Figura 17.** Determinación de Anomalía Regional por Ajuste Polinomial por Mínimos Cuadrados (Murray, 1991).

De todas las curvas que aproximan un conjunto de datos, la que tiene la propiedad de que  $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$  es mínimo se llama una curva de ajuste óptimo.

La recta de mínimos cuadrados que aproximan el conjunto de puntos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$  tiene por ecuación:

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (13)$$

Donde las constantes  $a_0$  y  $a_1$  quedan fijas al resolver simultáneamente las ecuaciones, se le llaman ecuaciones normales para la recta de mínimos cuadrados. Las constantes se pueden encontrar en las formulas:

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (14)$$

$$a_1 = \frac{N(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (15)$$

## **4.7. Modelado Bidimensional**

### **4.7.1. Método de Talwani**

El primer gran salto cuantitativo en el proceso de interpretación, se dio con el trabajo de Talwani (1959). Este trabajo presentó por primera vez un algoritmo automatizado para obtener la contribución gravimétrica de cuerpos bidimensionales irregulares, liberando el proceso de interpretación de las estimaciones basadas en el cálculo de anomalía de cuerpos simples (esferas, láminas, etc.)

El método de Talwani aproxima un cuerpo 2D irregular, remplazando la sección transversal del cuerpo por un polígono. Para utilizar este método, se propone un modelo geológico (número de capas, espesores y densidades) y se calcula su respuesta (gravedad calculada). Esta respuesta se comprara con el perfil de la anomalía de Bouguer completa y el modelo geológico se modifica hasta que se logre el mejor ajuste entre ellos.

## **5. DATOS GRAVIMÉTRICOS DEL AREA DE ESTUDIO**

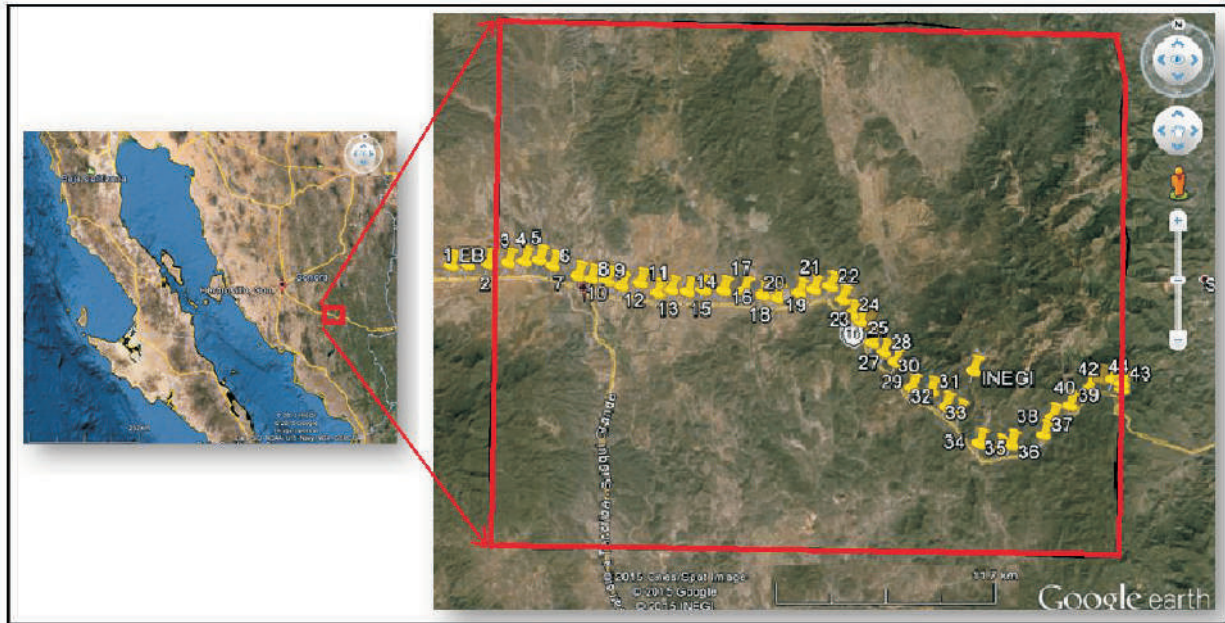
### **5.1. Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo**

#### **5.1.1. Adquisición de Datos**

Para poder realizar las mediciones gravimétricas, se utilizaron imágenes de satélite con el fin de reconocer el área de estudio, así como definir las diferentes rutas de acceso como carreteras o caminos, esto nos sirvió para planear el trabajo de campo.

Una vez con el trabajo previo, se realizó un viaje de reconocimiento para ver los accesos en las diferentes estaciones.

Se realizó un perfil W-E con 45 estaciones con una longitud aproximada de 39 km, la separación entre las estaciones varía entre 700 y 1600 m (Figura 18), así mismo, durante el trabajo de campo se verificaron los afloramientos litológicos y estructuras que se identificaron en el análisis bibliográfico previo.



**Figura 18.** Localización de las estaciones gravimétricas medidas en campo.

La estación base se ubicó 2.5 km al oeste del inicio de la carta de Tecoripa 1:50,000 con coordenadas 595134 m E y 3167029 m N, la cual se utilizó para observar la deriva instrumental del gravímetro realizando lecturas al inicio y al final del perfil. Las estaciones se tomaron sobre la carretera y caminos. Los perfiles se terminaron sobre un afloramiento de roca en la falda de un cerro para determinar la respuesta gravimétrica del basamento y determinar el regional.

Para realizar las lecturas de gravedad se utilizó un gravímetro marca Scintrex CG-5 (Figura 19), el cual cuenta con una resolución de 0.001 mGal y un rango máximo de operación de 8,000 mGal.

El gravímetro determina la lectura de la gravedad en cada punto, la desviación estándar y el tiempo en el que se hizo la medición.



Figura 19. Gravímetro CG-5 marca Scintrex.



Figura 20. GPS Garmin Etrex Legend.

Para tomar las coordenadas de cada estación, se utilizó un geoposicionador (GPS) portátil marca Garmin Etrex Legend – Garmin (Figura 20), donde se manejaron coordenadas UTM, con un datum en WGS84 (World Geodetic System).

Los valores de gravedad observados fueron capturados en formato digital para facilitar su manejo a partir del cual se obtuvo un perfil (Figura 21), para posteriormente generar un mapa utilizando el software WinGlink (Figura 23).

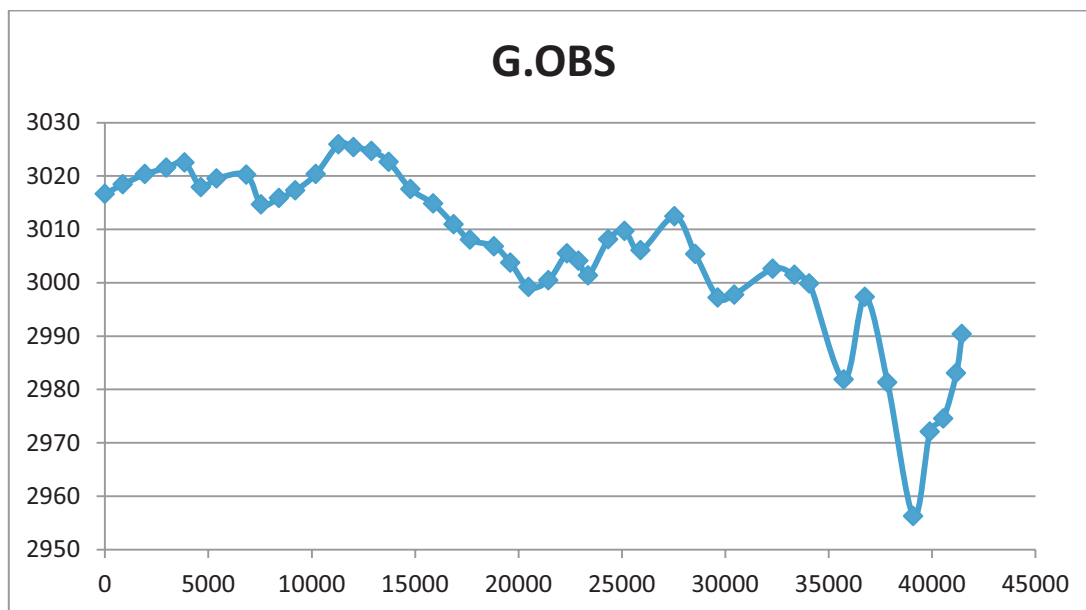


Figura 21. Perfil de la Gravedad Observada.

### 5.1.2. Determinación de la Densidad

Para la modelación de la anomalía, es necesario obtener valores de densidad de las rocas a lo largo de los perfiles. Para ello, durante un reconocimiento geológico de campo, se hizo la recolección de muestras de rocas que afloraban a lo largo de los perfiles gravimétricos. En total se recolectaron un total de 14 muestras, de las cuales se seleccionaron 7 y se cortaron a un tamaño adecuado para poder medir su densidad (Fotografía 3). En total se realizaron dos mediciones de cada muestra y se obtuvo un promedio de la densidad (Fotografía 4).

Para medir la densidad se utilizó la fórmula que se encuentra en Mirónov (1977), donde sugiere la fórmula:

$$\rho = \frac{W_3}{W_1 - W_2} \quad (16)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad en  $\text{gr}/\text{cm}^3$

$W_1$  = Peso de la roca en seco

$W_2$  = Peso de la roca inmersa en agua

$W_3$  = Peso de la roca húmeda

Para medir la densidad se usó densitómetro (Electronic Densimeter EW- 300SG) marca Alfa Mirage, de alta precisión y con resolución de  $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$  y con capacidad de 300 g (Figura 22).



**Figura 22.** Densitómetro (Electronic Densimeter EW-300SG).



En la tabla 1, se muestra los valores medidos para las diferentes rocas.

Roca	Densidad
Arenisca- Conglomerado	2.3
Arenisca-Lutita	2.42
Caliza	2.45
Andesita	2.53
Riolita - Andesita	2.5
Granito	2.68
Diorita	2.56

**Tabla 1.** Densidades de las rocas.



**Fotografía 3.** Muestras Geológicas.



**Fotografía 4.** Medición de la Densidad.

### 5.1.3. Corrección de Datos

Como ya se ha visto en el capítulo 5 del presente trabajo, la gravedad observada debe ser corregida, ya que los datos registrados se encuentran influenciados por variaciones a causa de la topografía y el tiempo. Por tal motivo se aplicaron las correcciones por Latitud, Deriva, Aire Libre, Bouguer y Topografía utilizando el programa Excel. Las tablas con las correcciones de los perfiles se muestran en el Apéndice B.

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. En este trabajo se obtuvieron mediciones relativas de la gravedad, por lo cual se utilizó la expresión del gradiente (ec. 7). 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.

Respecto a la Corrección por Deriva, se registró una deriva de 0.105 mGal en 6.36 horas; a partir de esa medición se obtuvo la corrección para cada estación mediante una interpolación lineal.

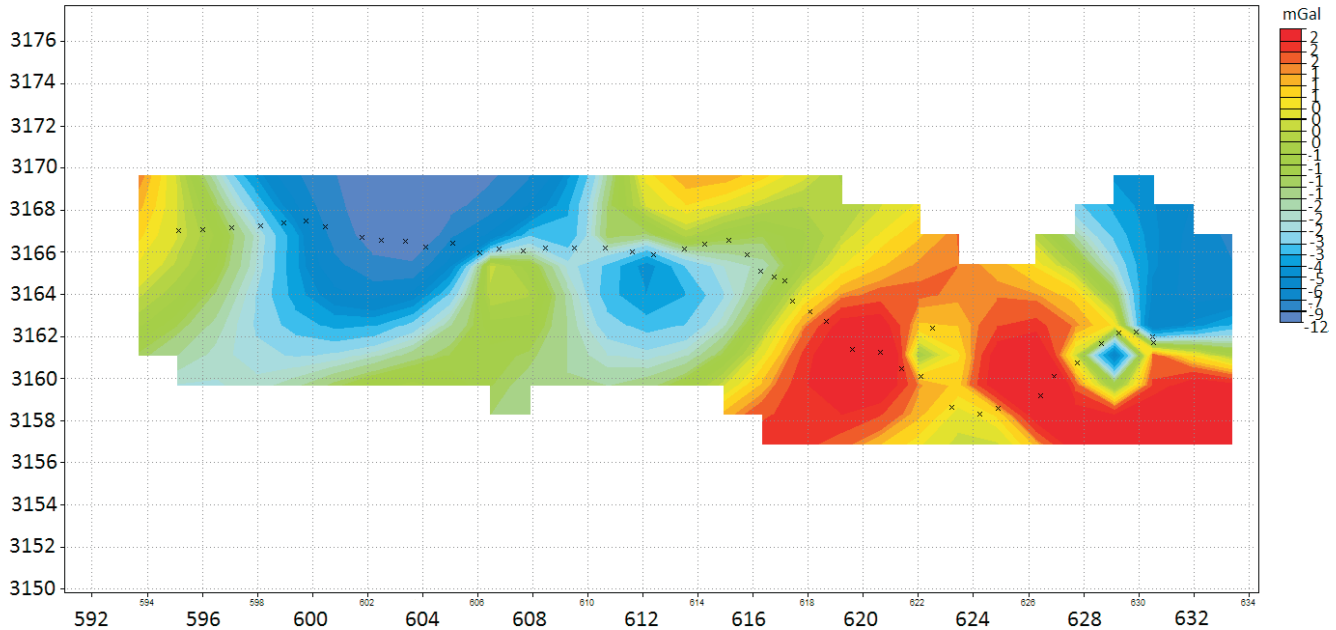
La Corrección por Aire Libre se realiza para corregir cambios de elevación de una estación comparada con la estación base, y consiste en reducir las lecturas a un solo nivel de referencia o *datum* (ec. 8). El valor de esta corrección se suma cuando la estación medida está sobre el nivel de referencia (estación base) y se resta cuando está por debajo (Figura 13).

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 (ec. 9). Esta corrección se resta cuando la estación medida está arriba del nivel de referencia y se suma cuando está debajo de la estación base (Figura 14). Se utilizó una densidad de 2.67 gr/cm para realizar esta corrección, que es la densidad cortical típica.

La Corrección Topográfica se realizó por medio de la plantilla de Hammer (Figura 16), que consiste en una serie de círculos concéntricos alrededor de las estaciones, divididos en sectores. Este método consiste en sobreponer la plantilla en el centro de cada estación en un mapa topográfico del área, para así, deducir una altura media con las curvas topográficas en cada sector. Para realizar esta corrección, se trazó un polígono del área de estudio en Google Earth, después se importó a Global Mapper, en donde se descargó el modelo de elevación digital. Posteriormente los datos fueron exportados a AutoCad en donde se generó a escala la plantilla de Hammer y se calcularon las correcciones correspondientes (Apéndice A).

#### 5.1.4. Anomalía de Bouguer

Después de aplicar las correcciones, se obtiene la Anomalía de Bouguer de acuerdo a la formula (12). A partir de estos valores se generó una malla en WinGlink utilizando el método de interpolación de mínima curvatura, la figura 23 muestra la Anomalía de Bouguer de los perfiles realizados.



**Figura 23.** Mapa de Anomalía de Bouguer obtenido de las estaciones gravimétricas medidas en campo.

En el mapa de Anomalía de Bouguer se observan dos zonas anómalas bien definidas. Al oeste del perfil se distingue un bajo gravimétrico con orientación casi N-S con un rango de valores de -12 a -2 mGal y en la parte este se observa un alto gravimétrico, en el cual se aprecian dos orientaciones NE-SW y NW-SE. En general, el rango de valores obtenidos en el perfil es de -12 mGal a +2 mGal.

### 5.1.5. Anomalía Regional y Residual

Para determinación del regional, se utilizó un ajuste polinomial de primer, segundo y tercer grado. Después de un análisis, se determinó utilizar el regional mediante el ajuste de una función polinomial de tercer grado (Figura 24), ya que se enfatizan mejor las anomalías sin perder información. En la cual, se observa un mínimo en la parte derecha e izquierda, entre en medio de ellas se observa un máximo como anomalías principales, teniendo un rango que va de -6.9 a +1.6 mGal. En cambio, en la anomalía residual (Figura 25) se observan varios bajos gravimétricos asociados a cuencas y rocas sedimentarias y altos gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos, con un rango de valores de -5 a +3 mGal.

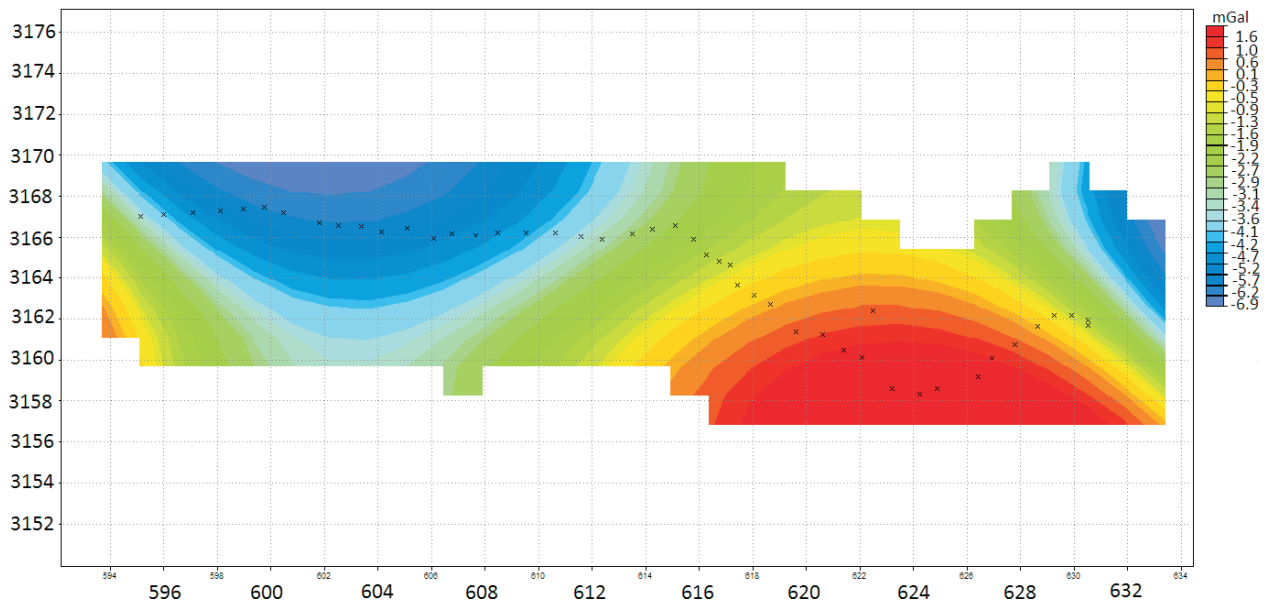
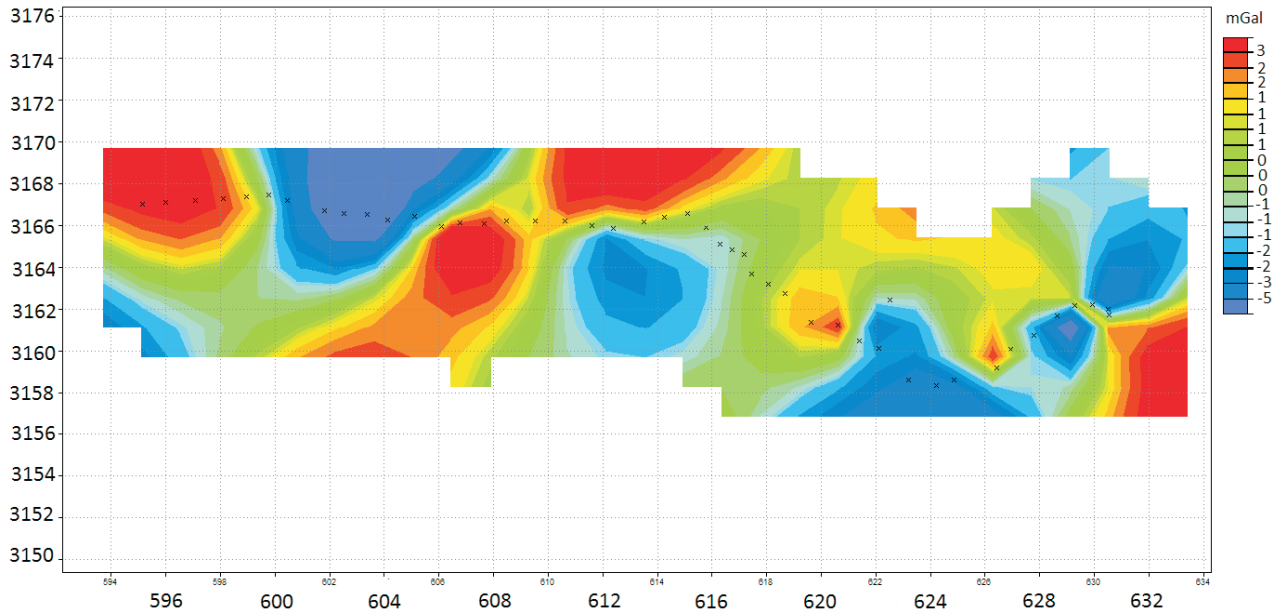


Figura 24. Mapa de Anomalía Regional de estaciones gravimétricas medidas en campo.



**Figura 25.** Mapa de Anomalía Residual de estaciones gravimétricas medidas en campo.

## 5.2. Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI 2010 de la Carta Tecoripa

### 5.2.1. Adquisición de Datos

Para complementar el levantamiento gravimétrico realizado, se utilizó la serie de modelos gravimétricos de México de INEGI, 2010. En particular se utilizaron los datos de la anomalía de Bouguer completa, los cuales contienen valores promedio estimados de anomalía de gravedad de Bouguer completa sobre el terreno.

Para producir dichos valores se utilizaron aproximaciones esféricas tanto para el cascarón de Bouguer como para el cálculo de corrección por terreno (INEGI, 2010). Los datos ya contienen todas las correcciones (aire libre, Bouguer, topográfica, etc.) y sus unidades de medida se expresan en mGal.

La Red Geodésica Gravimétrica de INEGI, está compuesta por un conjunto de estaciones donde se han realizado observaciones gravimétricas distribuidas homogéneamente, a través de las cuales se determina el comportamiento de la fuerza de gravedad dentro del territorio nacional.

Los levantamientos gravimétricos son realizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática (INEGI), se realizan con fines geodésicos y tienen como objetivo generar datos de valores de gravedad que son utilizados para la determinación del geoide de México y para la elaboración de cartas gravimétricas.

El conocimiento del valor de la gravedad es aplicable en el cálculo de separaciones entre el geoide y el elipsoide (altura geoidal), determinación de alturas ortométricas precisas, etc. o bien, combinado datos gravimétricos con observaciones realizadas a través de instrumentos GPS. La información gravimétrica tiene aplicación en la prospección de depósitos minerales, petroleros, de gas y otros.

Los levantamientos geodésicos gravimétricos comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en o cerca de la superficie terrestre, cuyo propósito consiste en fundamentar y determinar el campo gravimétrico existente.

Actualmente la Red Gravimétrica Nacional cuenta con estaciones con valores de gravedad de segundo orden, establecidas a través de levantamientos regionales ligados a la red básica, por parte de INEGI. Cada estación de la Red Gravimétrica cuenta entre otros datos, con el valor de la gravedad calculado. La metodología de medición o levantamiento de datos, consiste en la determinación de la gravedad relativa de distintos puntos ubicados sobre líneas o circuitos. Para determinar el valor de la gravedad se utilizan gravímetros geodésicos analógicos y digitales, con sensibilidad de 0.01 y 0.001 miligales de precisión, respectivamente.

Los levantamientos se realizan a través de los siguientes procesos:

Anteproyecto.- Consiste en ubicar sobre cartografía los posibles sitios de medición de acuerdo con los criterios de densificación establecidos para proyectar las mediciones gravimétricas en campo.

Medición.- Consiste en obtener lecturas gravimétricas e información geodésica a través de la medición puntual en campo para determinar valores de gravedad.

Procesamiento de Datos.- Se transforman los datos de las observaciones de campo a valores de gravedad, depurados y validados por medio de programas computacionales para ser integrados al Banco de Datos Gravimétrico.

Integración al Banco de Datos.- Los valores de gravedad obtenidos se vacían en el Banco de Datos Gravimétricos.

A partir del archivo de datos de la Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI 2010, se seleccionó y extrajo la información comprendida en el polígono con coordenadas  $28^{\circ}30'$  a  $28^{\circ}45'$  de latitud norte y  $109^{\circ}40'$  a  $110^{\circ}00'$  de longitud oeste. Este polígono corresponde a la carta Tecoripa H12-D64. En total se obtuvieron 96 estaciones gravimétricas espaciadas a cada 4,070 m. las cuales se muestran en la figura 26.



**Figura 26.** Localización de estaciones gravimétricas de INEGI.

El correspondiente archivo de datos obtenido se presenta en el Apéndice C.

### 5.2.2. Anomalía de Bouguer

Los datos de anomalía de Bouguer completa de INEGI, fueron importados al programa de procesamiento de datos geofísicos WinGLink, en donde se generó una malla por el método de interpolación de mínima curvatura. El mapa de Anomalía de Bouguer completa se muestra en la figura 27.

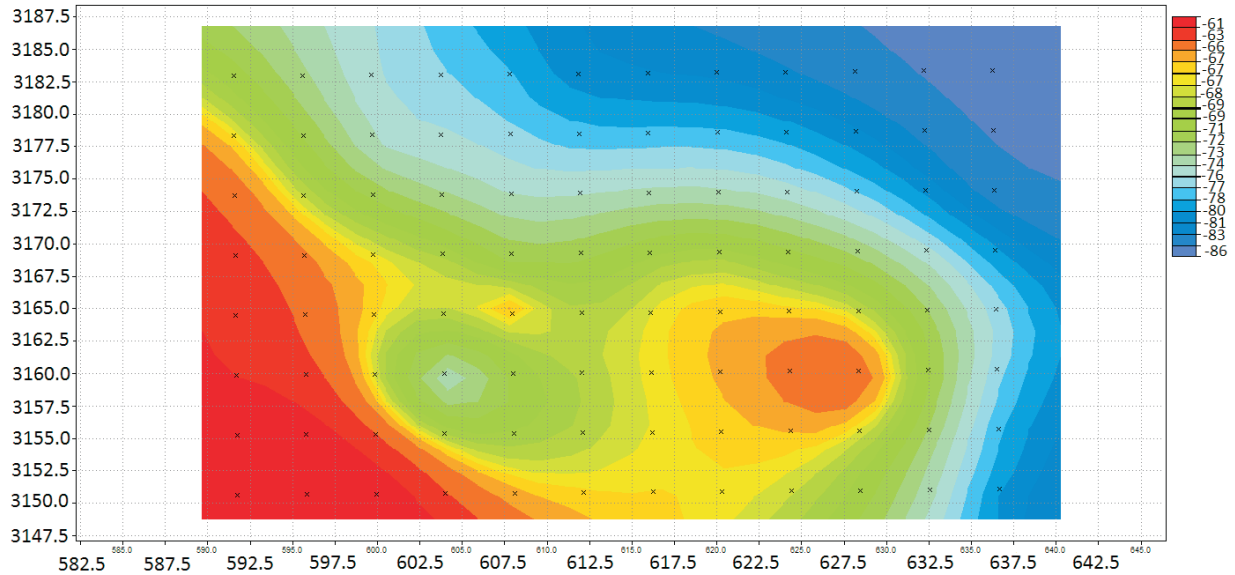


Figura 27. Mapa de Anomalía de Bouguer Completa de datos de INEGI.

### 5.2.3. Anomalía Regional y Residual

Las anomalías regional (Figura 28) y residual (Figura 29), se determinaron a partir de un ajuste polinomial de primer grado, ya que los datos se encuentran muy suavizados.

En este caso la anomalía regional corresponde a un plano inclinado, con un mínimo al NE de la carta y un máximo al SW. La anomalía residual presenta un alto gravimétrico circular asociado a intrusivos. La interpretación detallada de estos rasgos se discutirá en el siguiente capítulo.



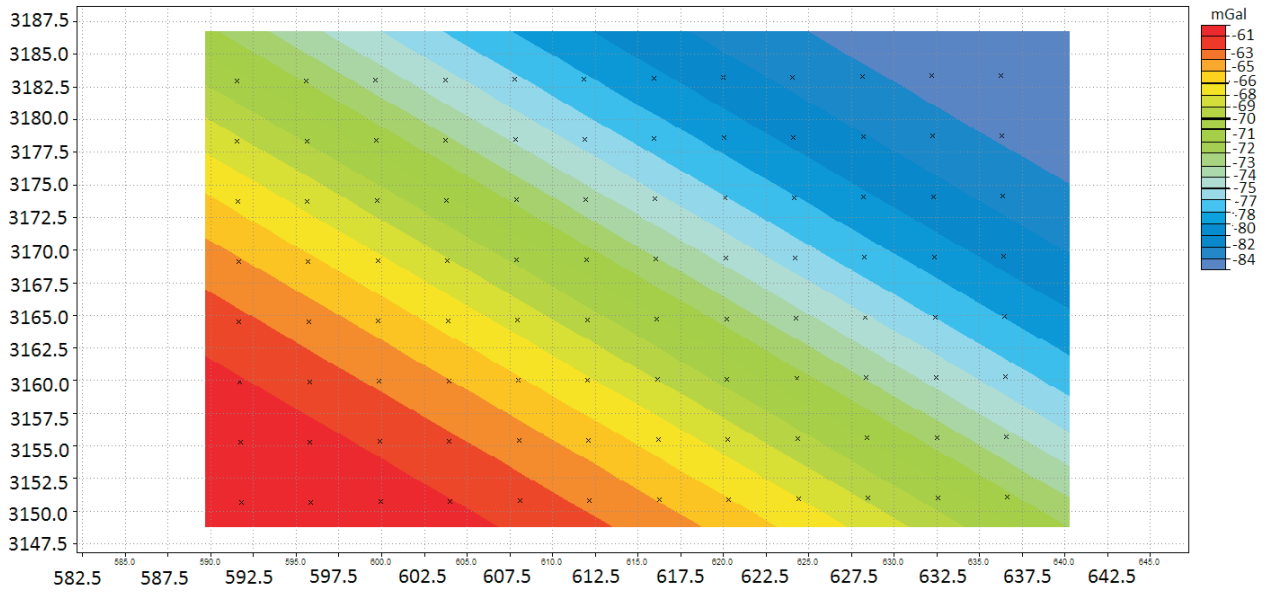


Figura 28. Mapa de Anomalía Regional datos de INEGI.

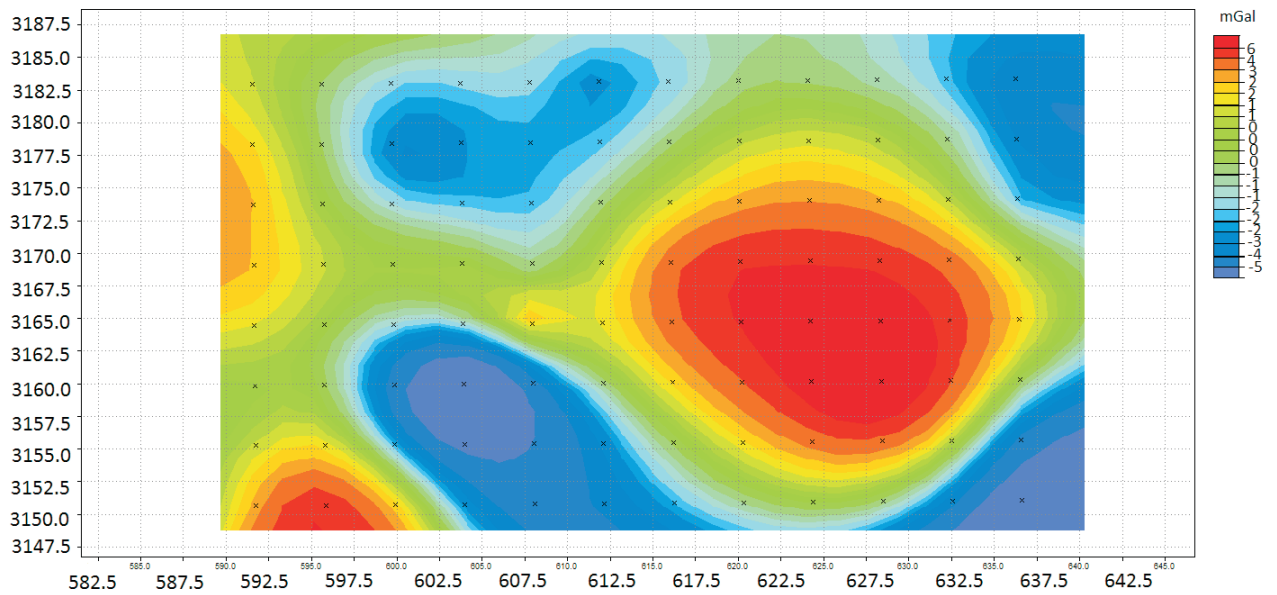


Figura 29. Mapa de Anomalía Residual datos de INEGI.

## **6. MODELADO GRAVIMÉTRICO**

### **6.1. Modelación de Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo**

Antes de realizar la modelación bidimensional de los perfiles gravimétricos medidos en campo, se analizó la geología superficial del área de estudio y se construyeron secciones geológicas a lo largo de los perfiles. Lo anterior, se realizó con la finalidad de proponer un modelo inicial del subsuelo que correlacione lo mejor posible con la geología del área.

A continuación se presenta el mapa de geología superficial (Figura 30), en donde se trazaron los perfiles gravimétricos medidos. También se muestra la figura 31 donde se presentan las 4 secciones geológicas correspondientes a dichos perfiles. Estas secciones se discuten en los siguientes párrafos.

#### **6.1.1. Secciones Geológicas de los Perfiles**

##### **▪ Sección 1**

La figura 31a, muestra la sección geológica 1 correspondiente al perfil 1-1' de la figura 30. Esta sección tiene orientación W-E y muestra una secuencia de dos intrusivos (granito-granodiorita) de edad Cretácico superior-Oligoceno. Entre los intrusivos se observa una cuenca sedimentaria rellena por conglomerado de la Formación Báucarit del cenozoico y una pequeña cobertura sedimentaria del Cuaternario.

##### **▪ Sección 2**

En la figura 31b se presenta la sección geológica 2 obtenida del perfil 2 -2' de la figura 30, la cual tiene una orientación NW-SE. La sección muestra una secuencia de andesitas y tobas andesíticas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior, la cual se encuentra intrusionada por granito-granodiorita de edad Cretácico superior-Oligoceno; también se presentan derrames lávicos del cenozoico de la Formación Lista Blanca compuesta por andesitas y riolitas.

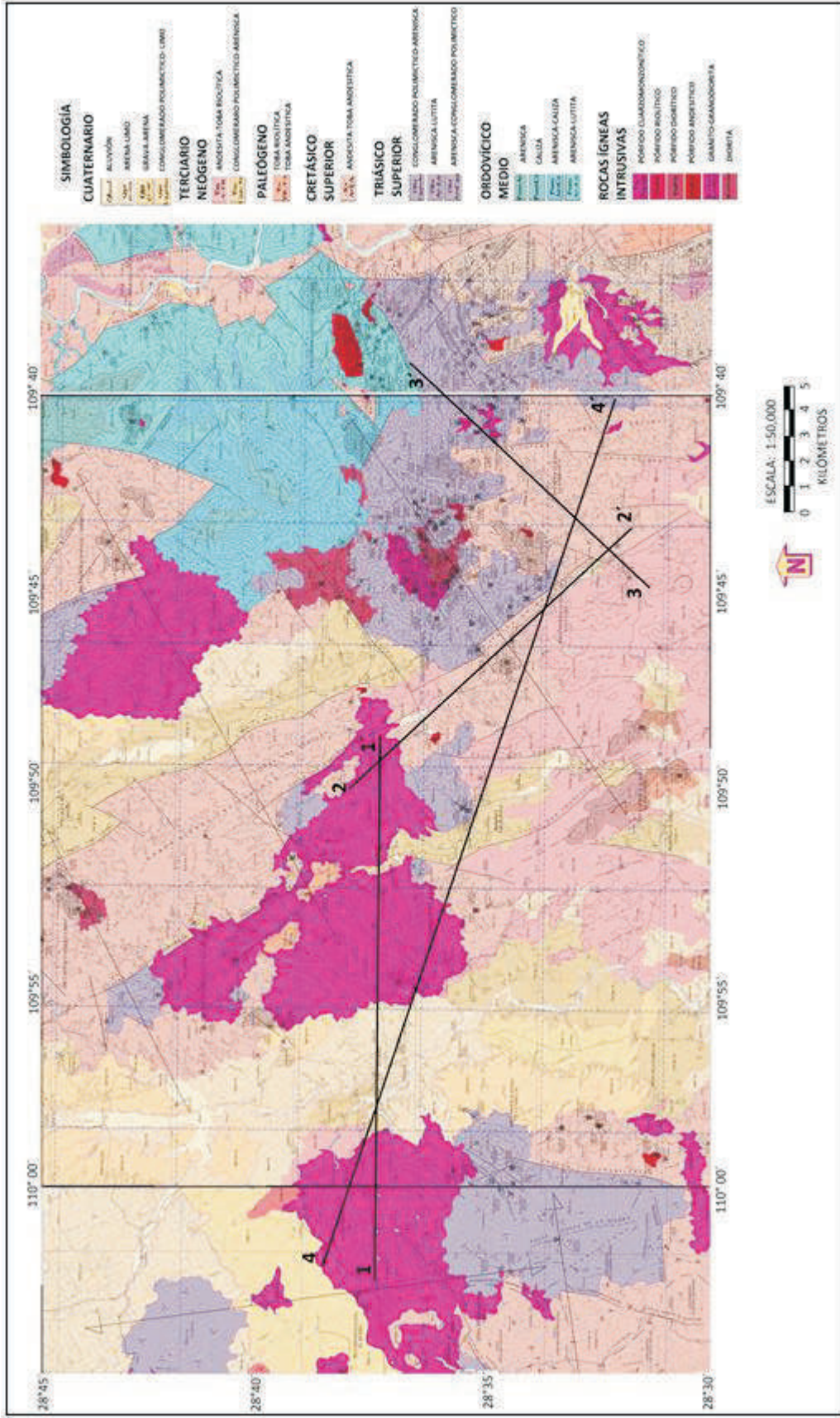
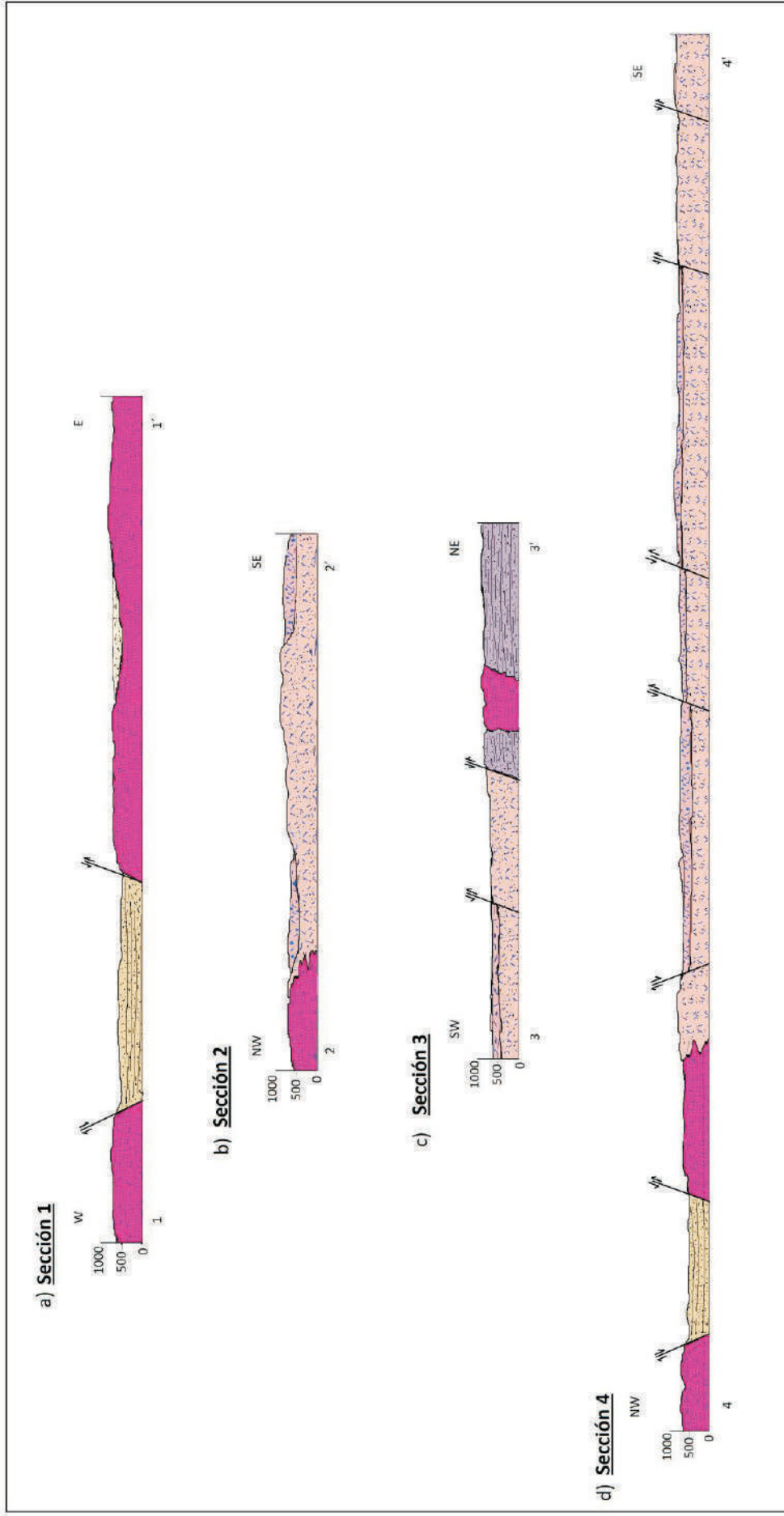


Figura 30. Mapa de Geología Superficial y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo (Modificado SGM, 2003).



**Figura 31.** Secciones Geológicas elaboradas a partir del Mapa de Geología Superficial y la ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo.

### ▪ **Sección 3**

La sección geológica 3 se muestra en la figura 31c y corresponde al perfil 3-3' con orientación SW-NE mostrado en la figura 30. En la sección se observa un contacto entre el Grupo Barranca (arenisca, lutita y conglomerado) con la Formación Tarahumara (andesita y tobas andesítica) del Cretácico superior, las cuales se sobreponen al Grupo Barranca del mesozoico; así mismo se presentan andesitas y riolitas de la Formación Lista Blanca de edad Cenozoica.

### ▪ **Sección 4**

La sección geológica 4 se presenta en la figura 31d y corresponde al perfil 4-4' ilustrado en la figura 30. Este perfil tiene una orientación NW-SE y es el más extenso. La sección geológica se encuentra constituida principalmente por andesitas y tobas andesíticas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior, a las cuales les sobreyace andesitas y riolitas de la Formación Lista Blanca. Estas formaciones son intrusionadas por granito-granodiorita de edad Cretácico superior- Oligoceno. También se observa una cuenca rellena por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

#### **6.1.2. Modelado Bidimensional con Método de Talwani**

El proceso de modelado implica crear un modelo geológico estructural hipotético con propiedades físicas y forma geométrica propuestas (modelo inicial) y calcular la respuesta gravitacional del mismo.

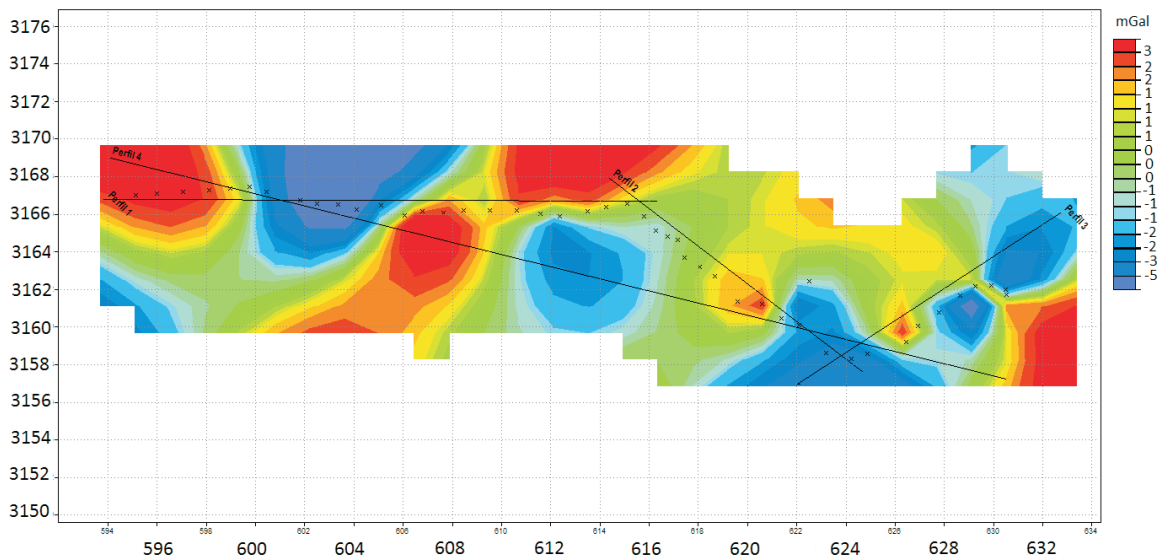
Este método es conocido como modelado directo, y consiste en elaborar modelos estructurales del subsuelo tomando como base la densidad y profundidad de los cuerpos que conforman dichos modelos. Los modelos bidimensionales asumen que la tierra cambia solo en dos direcciones: con la profundidad y en la dirección de los perfiles (z, x) y se mantiene constante en la dirección del rumbo de la estructura.

Para realizar el proceso de modelado, los perfiles medidos en campo se trazaron sobre el mapa de Anomalía Residual de tercer grado (Figura 32). Este mapa es el resultado de restar la Anomalía de Bouguer con la anomalía regional, determinada por ajuste polinomial de tercer

grado. El mapa de Anomalía residual resultante se seleccionó de entre otros, ya que las anomalías observadas en este ajuste polinomial, se enfatizan mejor sin perder información.

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 impredecible. Por eso, se recomienda que superficies de grados mayores a cuatro no se usen para definir un regional (Burger, 1992).

El mapa de anomalía residual de la figura 32 muestra la ubicación de los 4 perfiles, los cuales fueron trazados de tal forma que, éstos pasaran por las estaciones gravimétricas y a la vez cortaran las anomalías más representativas.



**Figura 32.** Mapa de Anomalía Residual y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo.

La modelación gravimétrica 2D se realizó con el software WinGLink de Geosoft, el cual es un programa de modelado que permite un manejo interactivo entre el modelo geológico propuesto y la correspondiente respuesta gravimétrica calculada en tiempo real. Para tal fin, emplea el método de Talwani et al. (1959). Este método aproxima un cuerpo 2D irregular, reemplazando la sección transversal del cuerpo por un polígono. Para utilizar este método, se

propone un modelo geológico (número de cuerpos, tamaño y densidades) y se calcula su respuesta (gravedad calculada). Esta respuesta se compara con el perfil de la anomalía residual y el modelo geológico se modifica hasta que se logre el mejor ajuste entre ellos.

Para los modelos de estos perfiles se consideraron de 4 a 7 cuerpos dependiendo del perfil, y se consideraron distintas densidades, las cuales se obtuvieron a partir de valores medidos y de tablas de los autores; Dobrin (1975), R. Burguer (1992), Schön (1995), tal como se ilustra en la (Tabla 2).

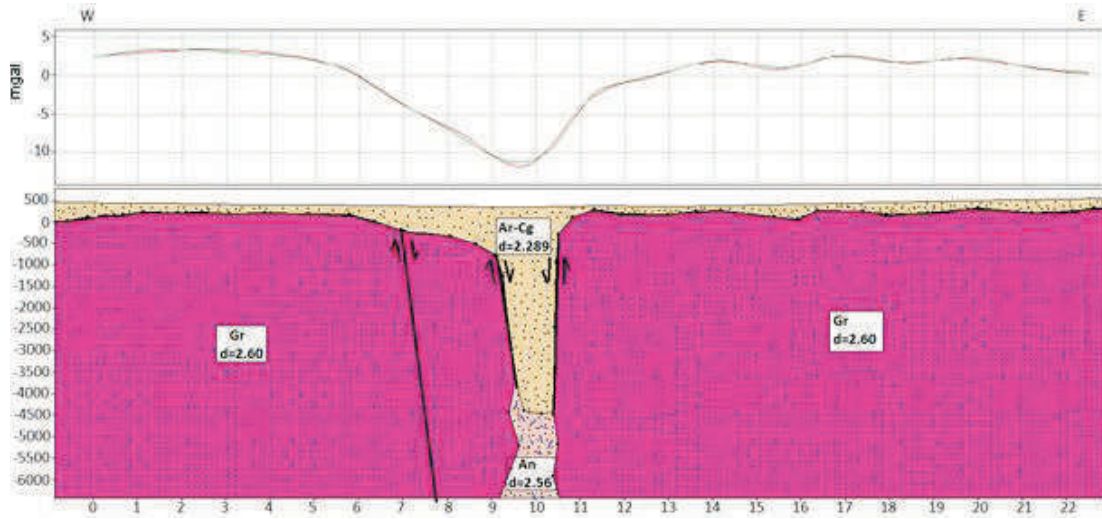
Cuerpo	Roca	Densidad
1	Arenisca- Conglomerado	2.289 - 2.38
2	Arenisca-Lutita	2.368- 2.479
3	Caliza	2.4 - 2.44
4	Andesita	2.5 -2.56
5	Riolita - Andesita	2.548
6	Granito	2.55 - 2.6
7	Diorita	2.56

**Tabla 2.** Cuerpos considerados en el modelado y sus correspondientes densidades.

#### 6.1.2.1. Perfil 1

En la figura 33 se muestra el modelo geológico obtenido para el perfil 1, el cual tiene una orientación W-E y una extensión de 22 km. En la parte superior de la gráfica se presenta el perfil de anomalía residual (en mGal) y la respuesta calculada para el modelo. En la parte inferior se presenta el modelo geológico propuesto.

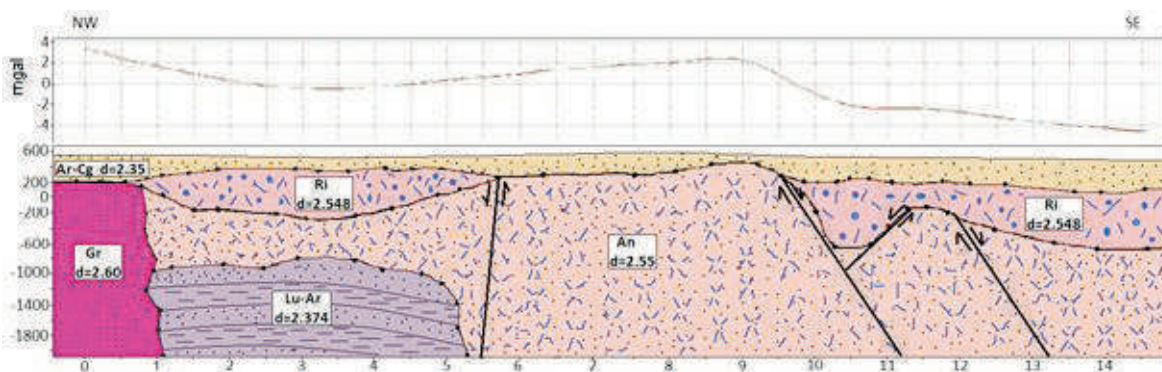
El modelo geológico está representada por dos intrusivos graníticos y al centro se forma una cuenca rellena por conglomerados de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario, la cual tiene un espesor de aproximadamente 4.5 km. Esta cuenca origina el bajo gravimétrico observado al centro de la anomalía gravimétrica.



**Figura 33.** Modelo Geológico para el perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

### 6.1.2.2. Perfil 2

El modelo geológico para el perfil 2 se muestra en la figura 34. El perfil tiene una orientación NW-SE y una extensión de un aproximadamente de 14 km. El modelo geológico está formado principalmente por rocas sedimentarias del Grupo Barranca del Triásico superior (Lu-Ar) y rocas volcánicas de la formación Tarahumara del Cretácico superior, las cuales son intrusionadas por granito. Sobreyacen sobre ellas rocas volcánicas de la Formación Lista Blanca (riolitas-andesitas) así como la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

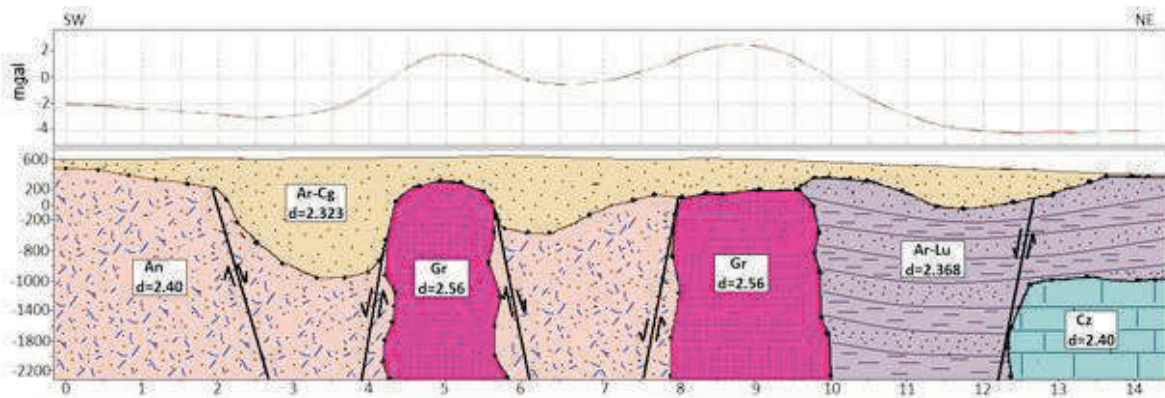


**Figura 34.** Modelo Geológico para el perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.



### 6.1.2.3. Perfil 3

El modelo geológico del perfil 3 se presenta en la figura 35, tiene una orientación SW-NE con una extensión de 14 km. En la parte superior de la gráfica se observan dos altos gravimétricos bien definidos asociados a dos intrusivos graníticos. También se muestran rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y rocas sedimentarias del Grupo Barranca, las cuales se encuentran intrusionadas. Esta zona se encuentra delimitada por fallas asociadas a estructuras típicas de Horst y Graben. Los bajos gravimétricos están asociados a cuencas rellenas por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario; la cuenca más profunda tiene un espesor de aproximadamente 1 km. Al NE tenemos un contacto entre el Grupo Barranca y calizas del Ordovícico medio.



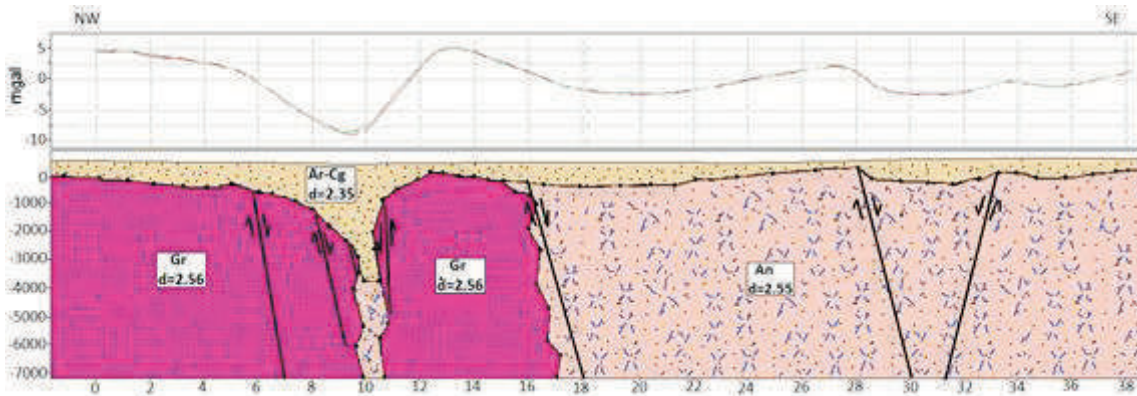
**Figura 35.** Modelo Geológico para el perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

### 6.1.2.4. Perfil 4

El perfil 4 tiene una orientación NW-SE y una extensión de 38 km, se modeló a partir de datos interpolados de los tres perfiles anteriores.

El modelo geológico de la figura 36, es parecido al del perfil 1; en la parte NW de la sección geológica se muestran dos intrusivos graníticos que originan dos altos gravimétricos. Entre ellos, se forma una cuenca tipo Horst y Graben, con un espesor de aproximadamente 4 km, rellena por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario, la cual origina el bajo gravimétrico en la gráfica superior, hacia el SE tenemos una secuencia de rocas andesíticas de

la Formación Tarahumara donde se observan fallamientos los cuales producen pequeñas cuencas.



**Figura 36.** Modelo Geológico para el perfil 4. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

## 6.2. Modelación de Perfiles de la Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI

### 6.2.1. Secciones Geológicas de los Perfiles

Como se comentó anteriormente, antes de realizar la modelación se hizo una revisión de la geología superficial del área de estudio. Con este fin, se identificaron las principales estructuras presentes en la carta geológica Tecoripa H12D64 y se trazaron perfiles con orientación NE-SW, los cuales son perpendiculares al rumbo de las anomalías gravimétricas y de las estructuras (Figura 37). Después se construyeron las correspondientes secciones geológicas a lo largo de los perfiles. Esto nos sirvió de base para proponer los modelos iniciales del subsuelo. La figura 38 muestra las 5 secciones geológicas correspondientes a dichos perfiles, las cuales se discuten en los siguientes párrafos.

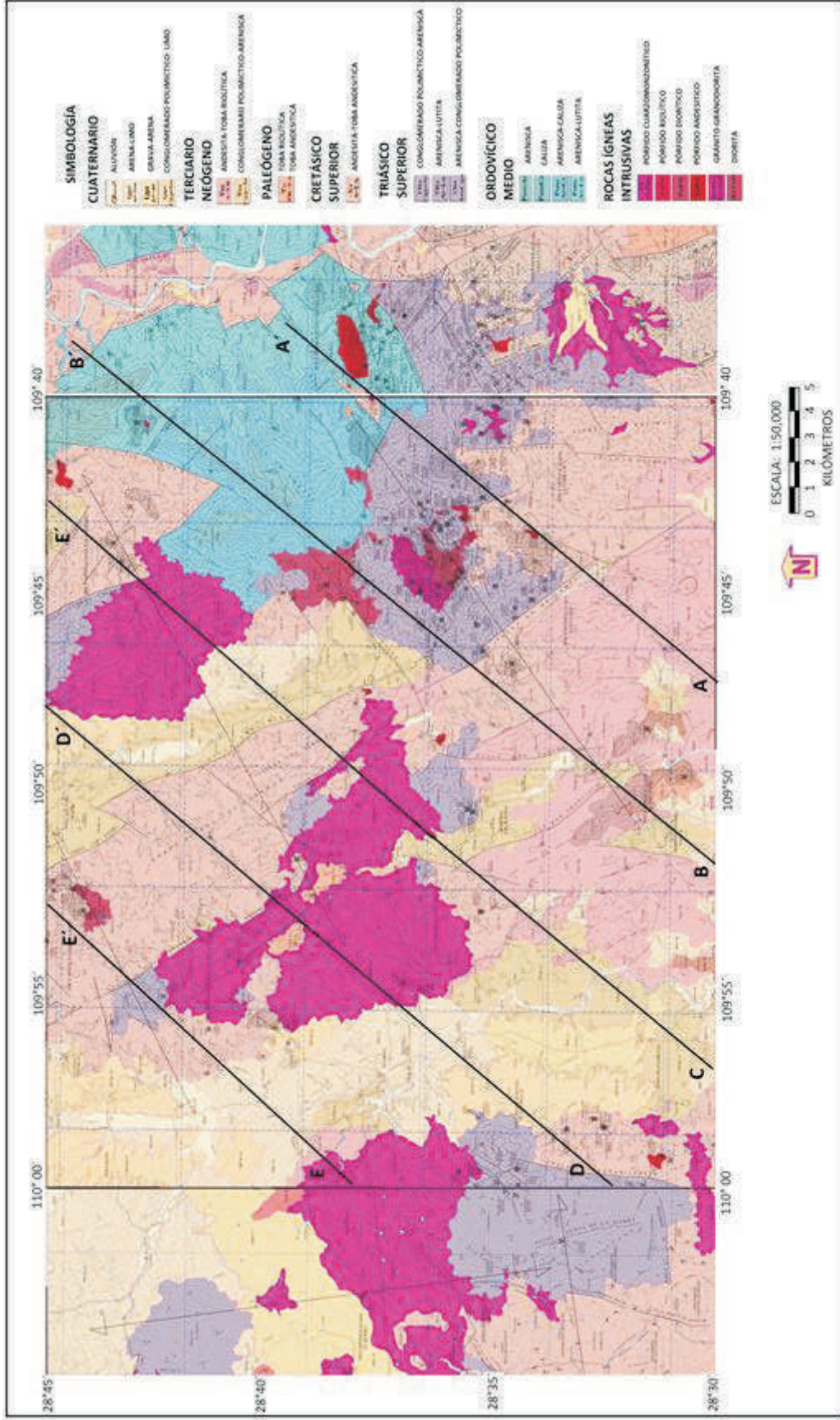


Figura 37. Mapa de Geología Superficial y ubicación de los perfiles datos INEGI (Modificado SGM, 2003).

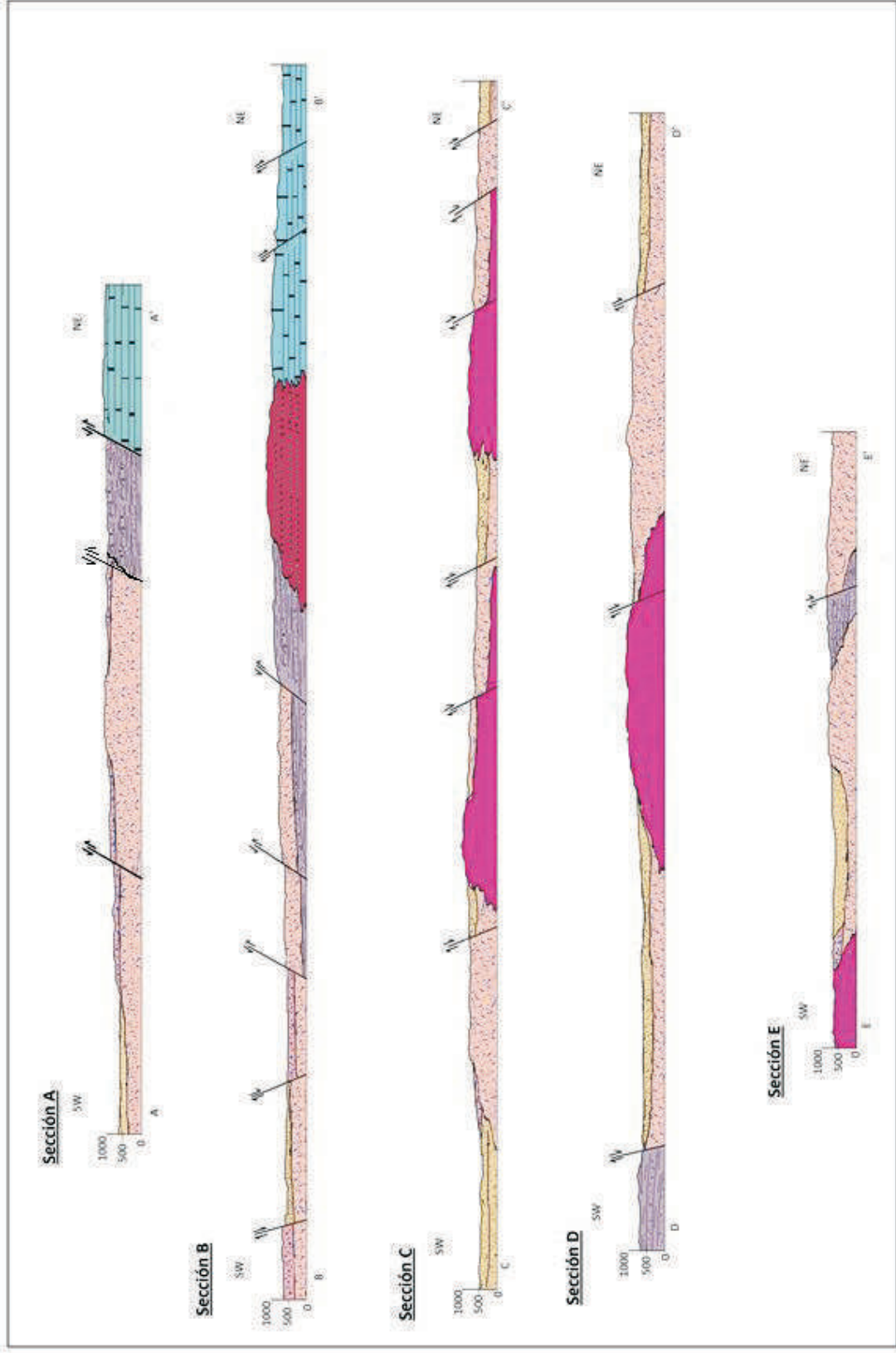


Figura 38. Secciones Geológicas elaboradas a partir del Mapa de Geología Superficial y la ubicación de perfiles gravimétricos datos INEGI.

▪ **Sección A**

En la figura 38a, en esta sección se muestra una gran secuencia de rocas volcánicas de la Formación Tarahumara representadas por andesitas y tobas andesíticas del Cretácico superior, la cual; se encuentra en contacto con rocas del Grupo Barranca y estas con rocas del Ordovícico medio (calizas), asimismo se presentan andesitas y riolitas de la Formación Lista Blanca de edad Cenozoico.

▪ **Sección B**

En esta sección también se observa en la parte SW, una secuencia de rocas andesíticas de la Formación Tarahumara, la cual se sobrepone al Grupo Barranca del Mesozoico (arenisca, lutita, conglomerado). También se muestra al grupo Barranca y a las rocas del Ordovícico medio (calizas) intrusionadas por rocas de composición diorítica (Figura 38b).

▪ **Sección C**

En la sección C de la figura 38c, se muestran rocas andesíticas de la Formación Tarahumara que se encuentra instrusionada en dos zonas por granito-granodiorita. Le sobreyacen rellenos de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

▪ **Sección D**

En la figura 38d, en la parte SW de la sección se presenta el contacto entre rocas del Grupo Barranca y rocas volcánicas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior, estas últimas instrusionadas por granito-granodiorita. Se tienen rellenos de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

▪ **Sección E**

En esta sección se observan rocas volcánicas andesíticas de la Formación Tarahumara intrusionadas en la parte SW por granito-granodiorita y en la parte SE de la sección, en contacto con el Grupo Barranca (areniscas, lutitas, conglomerados). Se presentan rellenos de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario (Figura 38e).

### 6.2.2. Modelado Bidimensional con Método de Talwani

Como se mencionó con anterioridad, se utilizaron los datos de la Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI (2010), los cuales contienen valores promedio estimados de anomalía de gravedad de Bouguer completa sobre el terreno. Se seleccionaron todas las estaciones gravimétricas comprendidas dentro del polígono formado por las coordenadas geográficas  $28^{\circ} 30'$  a  $28^{\circ} 45'$  de latitud norte y  $109^{\circ} 40'$  a  $110^{\circ} 00'$  de longitud oeste, que corresponden a la carta Tecoripa H12-D64. Posteriormente se generó una malla en el paquete de procesamiento geofísico de datos WinGlink, donde se obtuvo la anomalía regional por un ajuste polinomial de primero, segundo y tercer grado.

Después se separó el regional de la Anomalía de Bouguer para obtener la correspondiente anomalía residual. Finalmente se seleccionó la anomalía residual obtenida por ajuste polinomial de primer grado, ya que los datos de INEGI están muy suavizados, y no es conveniente usar un polinomio de grado mayor porque se perdería mucha información.

Sobre el mapa de anomalía residual de primer grado se trazaron 5 perfiles con orientación NE-SW, tal como se muestra en la figura 39. Los perfiles son perpendiculares al rumbo de las estructuras geológicas y se trazaron sobre las estaciones gravimétricas. En este mapa se observa un alto gravimétrico bien definido asociado a intrusivos, el cual está rodeado por bajos gravimétricos relacionados con cuencas o rocas sedimentarias, tal como se describe en las siguientes secciones.

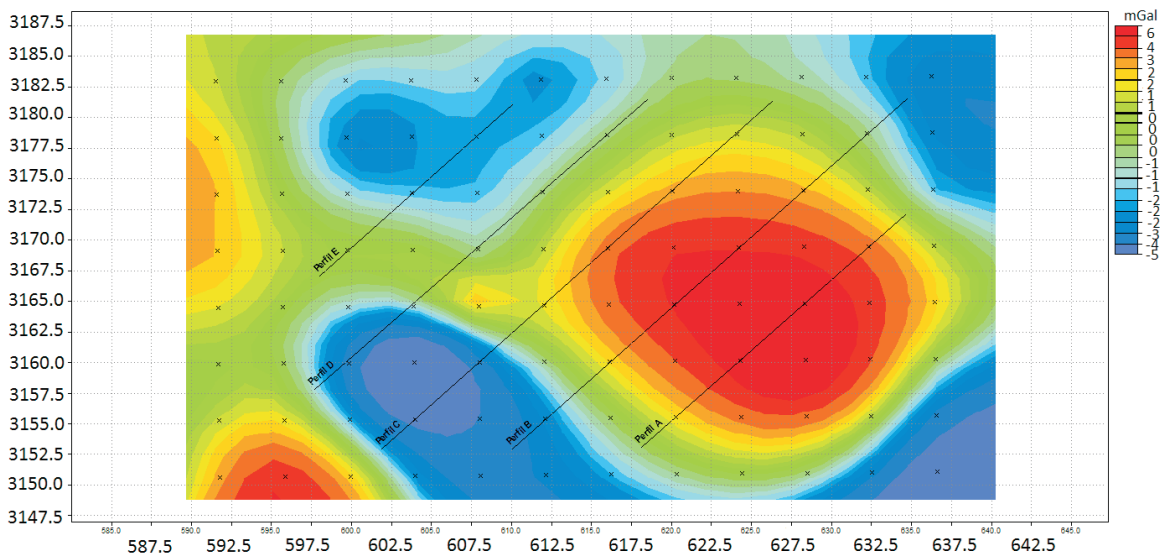


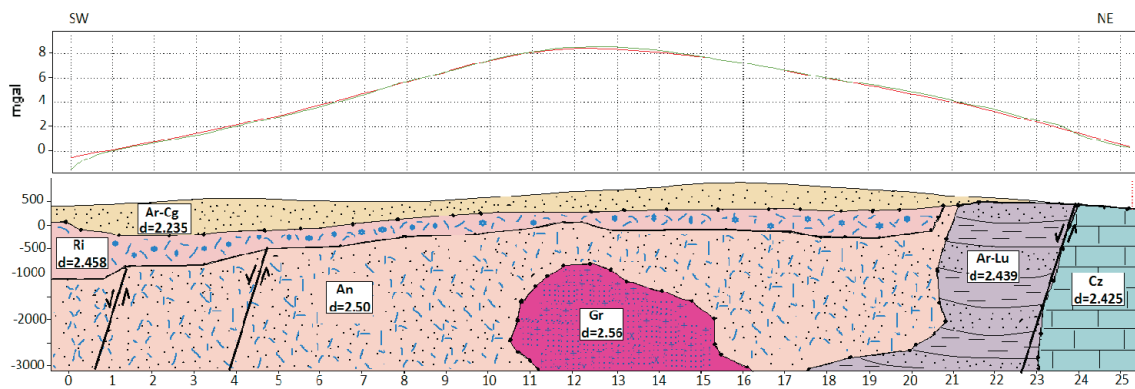
Figura 39. Mapa de Anomalía Residual datos de INEGI y ubicación de perfiles.

La modelación de los perfiles se realizó con el método de Talwani. Para ello es necesario definir un número de cuerpos, así como sus densidades asociadas. Como en la sección anterior, se utilizaron las mismas densidades mostradas en la tabla 2.

A continuación se muestran los modelos geológicos obtenidos para cada perfil gravimétrico.

### 6.2.2.1. Perfil A

En la figura 40 se presenta el modelo geológico para el perfil A con una extensión de 25 Km. En la gráfica superior se observa un alto gravimétrico, asociado a un intrusivo granítico que no aflora en la superficie, el cual se encuentra intrusionando a las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara. Estas rocas están en contacto con el Grupo Barranca el cual a su vez se encuentra en contacto con las calizas del Ordovícico medio. Les sobreyacen rocas volcánicas de la Formación Lista Blanca, la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

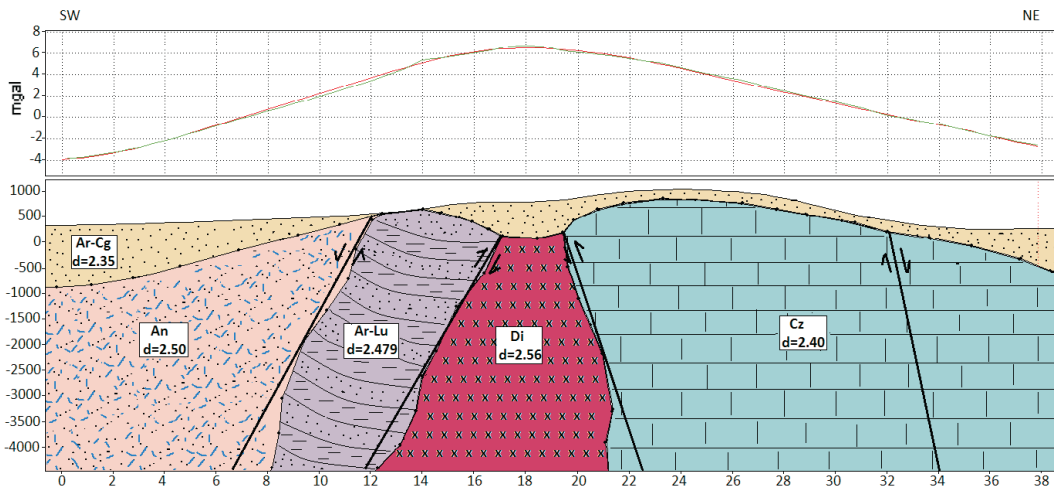


**Figura 40.** Modelo Geológico para el perfil A. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

### 6.2.2.2. Perfil B

El modelo geológico del perfil B se muestra en la figura 41 con una extensión de 38 km. Como en el caso anterior, se observa en la gráfica superior, un alto gravimétrico, el cual se interpretó, de acuerdo a la geología superficial, como un intrusivo de composición diorítica,

que esta intrusionando al Grupo Barranca y a las calizas del Ordovícico medio. En la porción SW de la sección geológica tenemos en contacto rocas volcánicas de la Formación Tarahumara con rocas del Grupo Barranca, y sobre de ellas rellenos de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

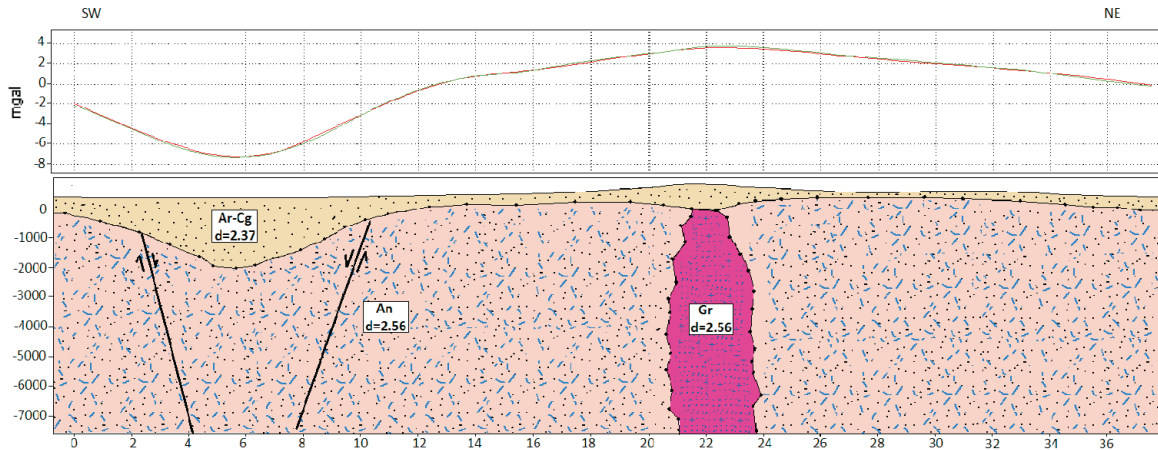


**Figura 41.** Modelo Geológico para el perfil B. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

### 6.2.2.3. Perfil C

El perfil gravimétrico mostrado en la parte superior de la figura 42 está caracterizado por un bajo gravimétrico asociado a un graben relleno por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario. También se muestra una secuencia de rocas volcánicas de la Formación Tarahumara que son intrusionadas por un cuerpo de composición granítica; la extensión del perfil C es de 36 km.

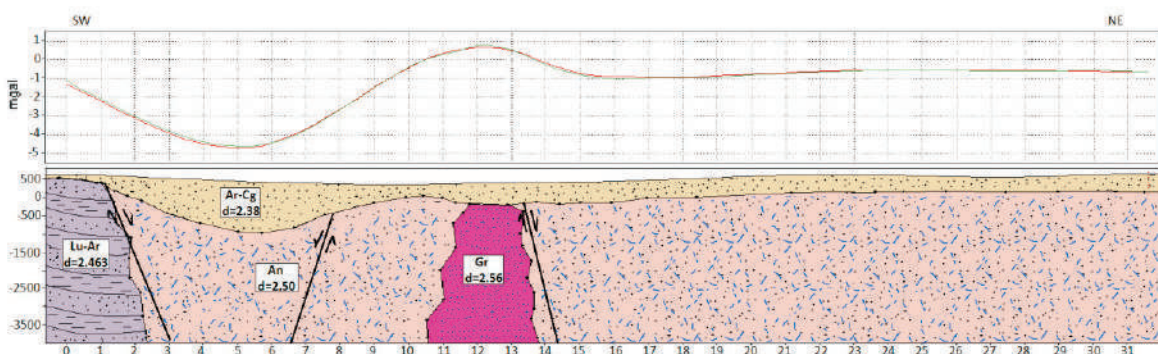




**Figura 42.** Modelo Geológico para el perfil C. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

#### 6.2.2.4. Perfil D

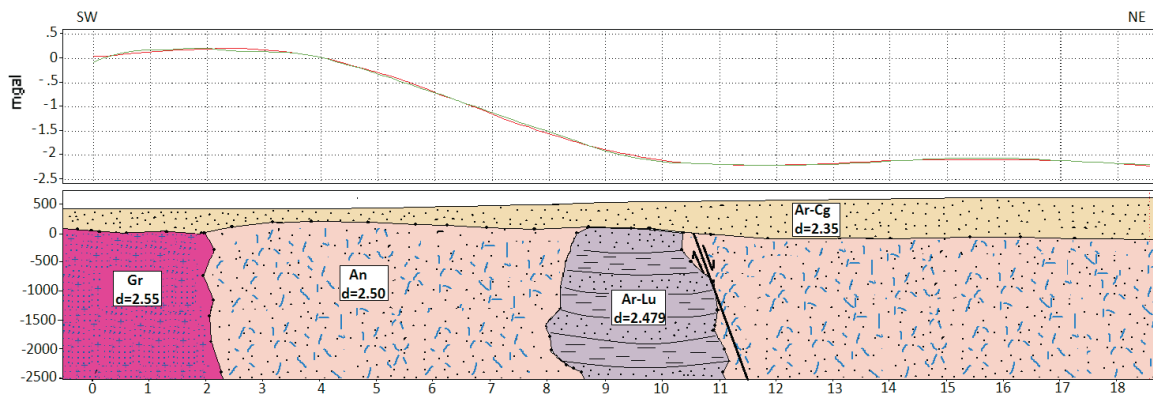
El modelo geológico para el perfil D se muestra en la figura 43. En la parte superior de la figura se observa un bajo gravimétrico asociado a una cuenca rellena por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario. El alto gravimétrico está relacionado con un cuerpo granítico que intrusión a rocas volcánicas de la Formación Tarahumara. En la parte SW del modelo se presenta el Grupo Barranca en contacto con rocas volcánicas; la extensión del perfil D es de aproximadamente de 31 km.



**Figura 43.** Modelo Geológico para el perfil D. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

### 6.2.2.5. Perfil E

En la figura 44 se muestra el modelo geológico para el perfil E con una extensión de 18 km. El alto gravimétrico de la gráfica superior está asociado a un cuerpo granítico que intrusión a rocas volcánicas de la Formación Tarahumara. En la parte central se observa un contacto entre las rocas volcánicas y el Grupo Barranca, que origina el bajo gravimétrico. Les sobreyacen rocas de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

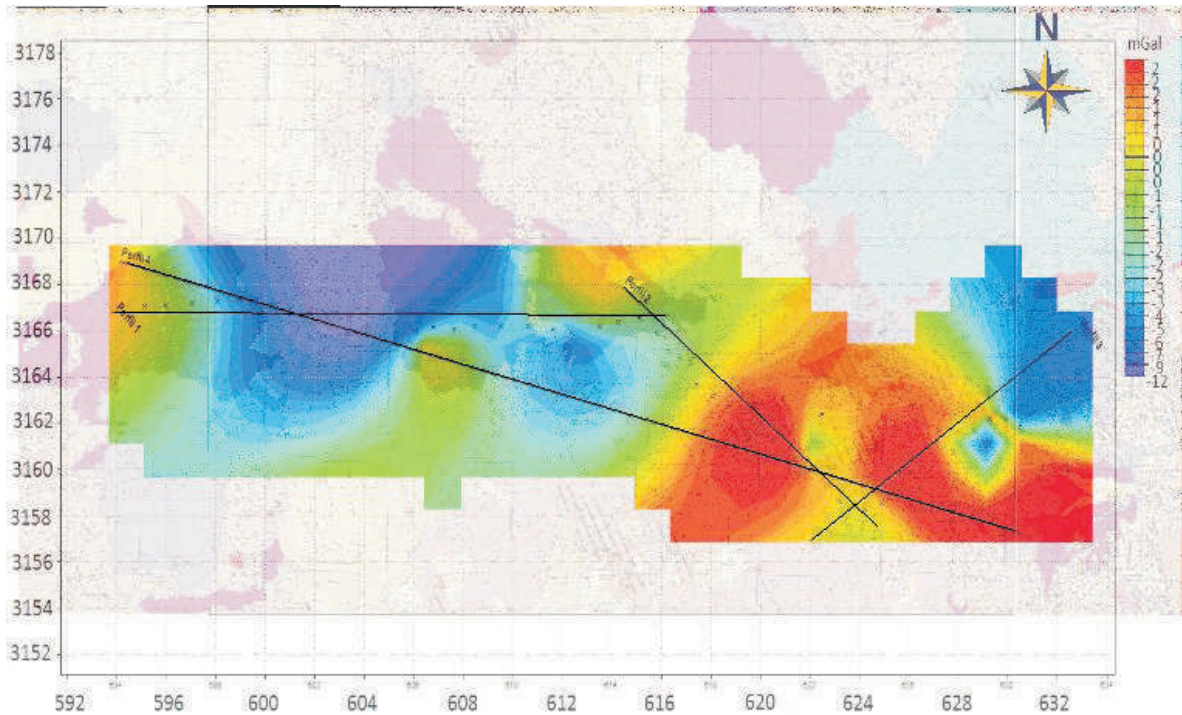


**Figura 44.** Modelo Geológico para el perfil E. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

## 6.3. Correlación de información geológica-geofísica

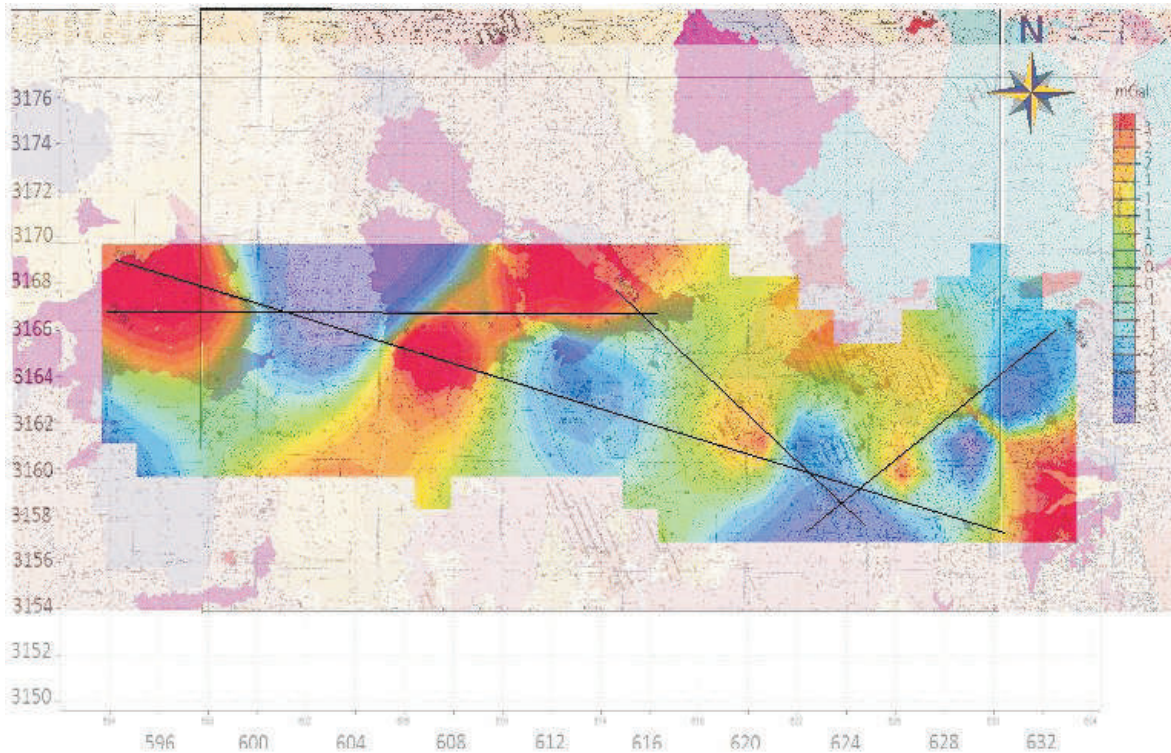
### 6.3.1. Correlación de Perfiles Gravimétricos Medidos en Campo con la Geología

La figura 45 muestra una correlación que se realizó sobreponiendo el mapa de Anomalía de Bouguer completa (el cual contiene rasgos geológicos profundos y someros) con la geología superficial del área de estudio. En este mapa se observan dos zonas anómalas bien definidas. Al oeste de los perfiles se distingue un bajo gravimétrico con orientación casi N-S con un rango de valores de -12 a -2 mGal, el cual se asocia con una cuenca rellena por la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario. En la parte este se observa un alto gravimétrico que correlaciona con cuerpos intrusivos profundos que afloran parcialmente. En general, el rango de valores obtenidos en los perfiles es de -12 mGal a +2 mGal.



**Figura 45.** Correlación de la Geología Superficial del área de estudio con la Anomalia de Bouguer Completa obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (Modificado SGM, 2003).

También se realizó una correlación sobreponiendo el mapa de Anomalia Residual de tercer grado (donde se han eliminados estructuras geológicas profundas) con la geología superficial del área de estudio, la cual se muestra en la figura 46. En esta figura se observan varios bajos gravimétricos asociados a cuencas y rocas sedimentarias del Grupo Barranca, Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario. Los altos gravimétricos están asociados a cuerpos intrusivos, con un rango de valores de -5 a +3 mGal.

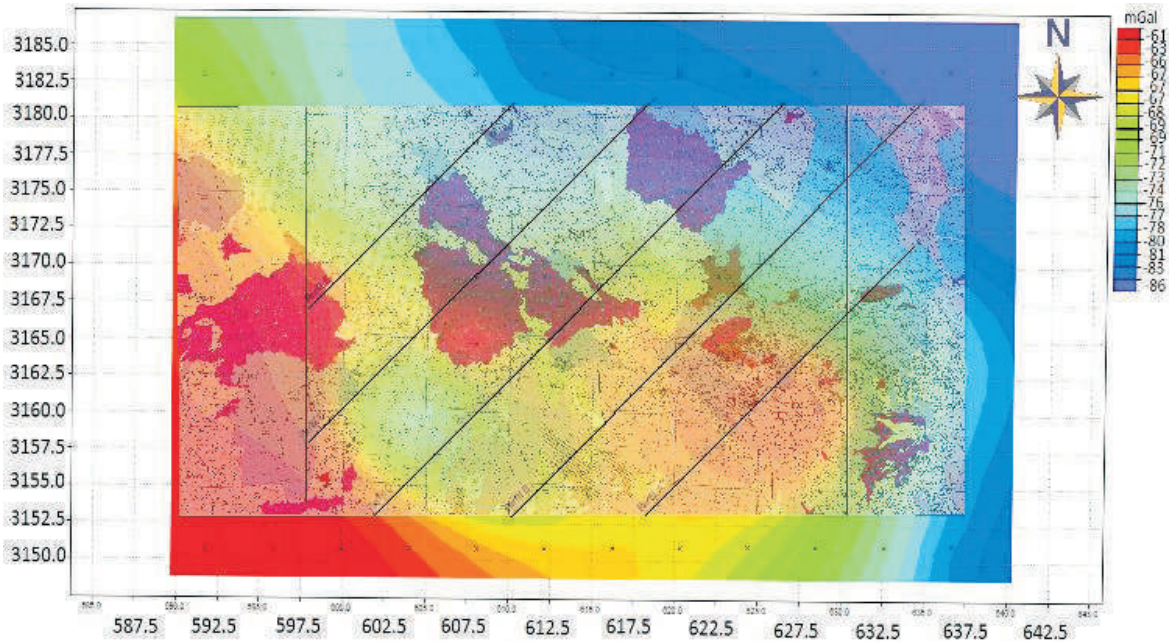


**Figura 46.** Correlación de la Geología Superficial del área de estudio con la Anomalía Residual obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (Modificado SGM, 2003).

### 6.3.2. Correlación de Anomalía de Gravedad de Bouguer Completa de INEGI con Geología

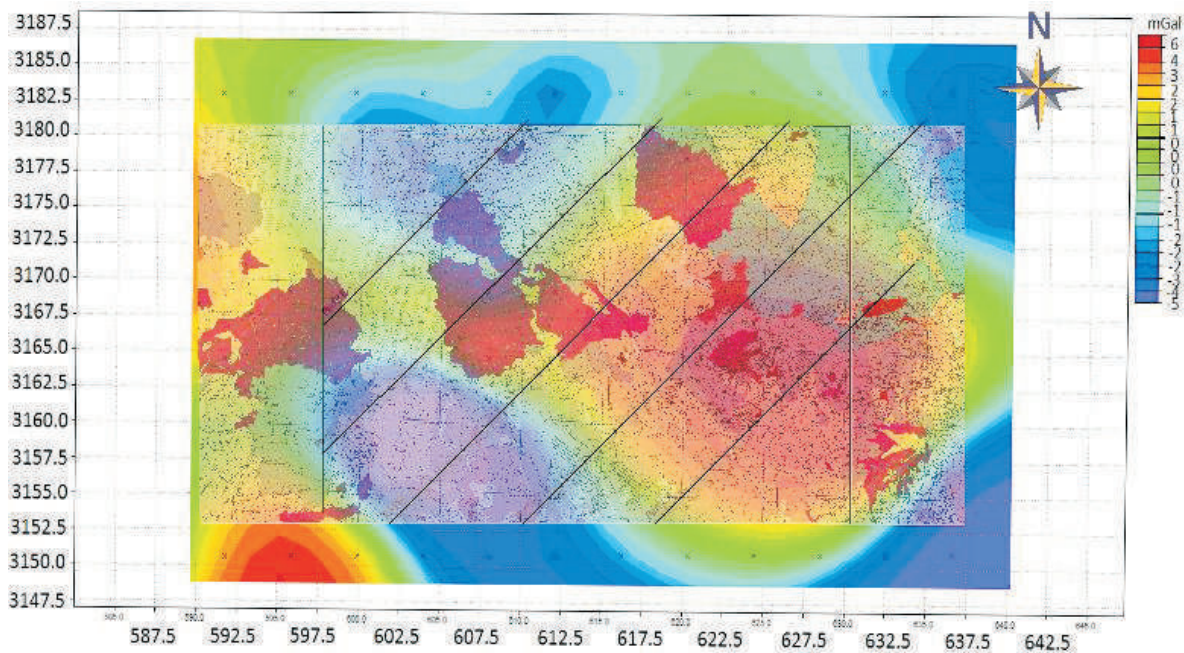
La figura 47 muestra una correlación que se realizó sobreponiendo el mapa de anomalía de Bouguer completa de INEGI con la geología superficial de la carta Tecoripa, cabe mencionar que las estaciones de INEGI están espaciadas a cada 4 Km, por lo cual esta información representa el comportamiento regional del área de estudio.

Aquí se observan dos altos gravimétricos bien definidos, uno al SW de la carta y otro en la parte central, los cuales se asocian a intrusivos. También se distingue en la parte NE de la carta un bajo gravimétrico asociado a rocas sedimentarias.



**Figura 47.** Correlación de la Geología Superficial de la carta Tecoripa H12-D64 con la Anomalía de Bouguer Completa datos INEGI (Modificado SGM, 2003).

La figura 48 muestra la correlación que se realizó al empalmar el mapa de anomalía residual (donde se eliminaron rasgos geológicos regionales) con la geología superficial de la carta Tecoripa. Como en los casos anteriores, los bajos gravimétricos están asociados a cuencas y rocas sedimentarias del Grupo Barranca, Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario con rango de valores que van de -5 a -1 mGal. Los altos gravimétricos están asociados a cuerpos intrusivos con rango de valores de +2 a +6 mGal.



**Figura 48.** Correlación de la Geología Superficial de la carta Tecoripa H12-D64 con la Anomalia Residual datos INEGI (Modificado SGM, 2003).

Finalmente en la figura 49 se muestra la configuración en 3D de la anomalía residual correspondiente a los perfiles medidos en campo (obtenida por ajuste del polinomial de tercer grado) la cual fue generada en Surfer. También se presenta en la figura 50 la configuración en 3D de la anomalía residual obtenida con datos de INEGI.

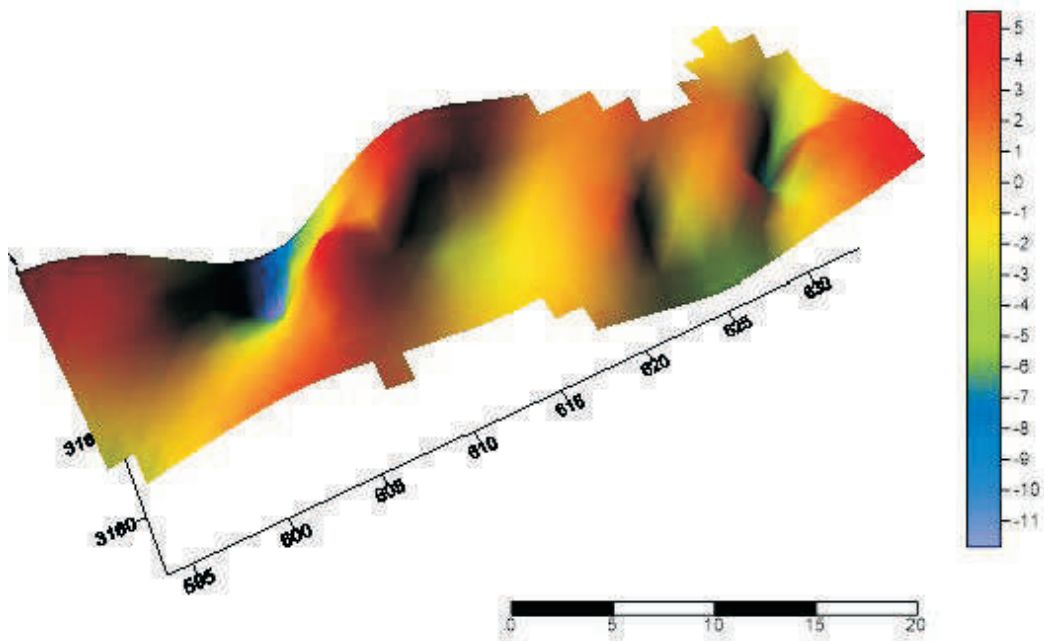


Figura 49. Configuración 3D de la Anomalia Residual de datos medidos en el área de estudio.

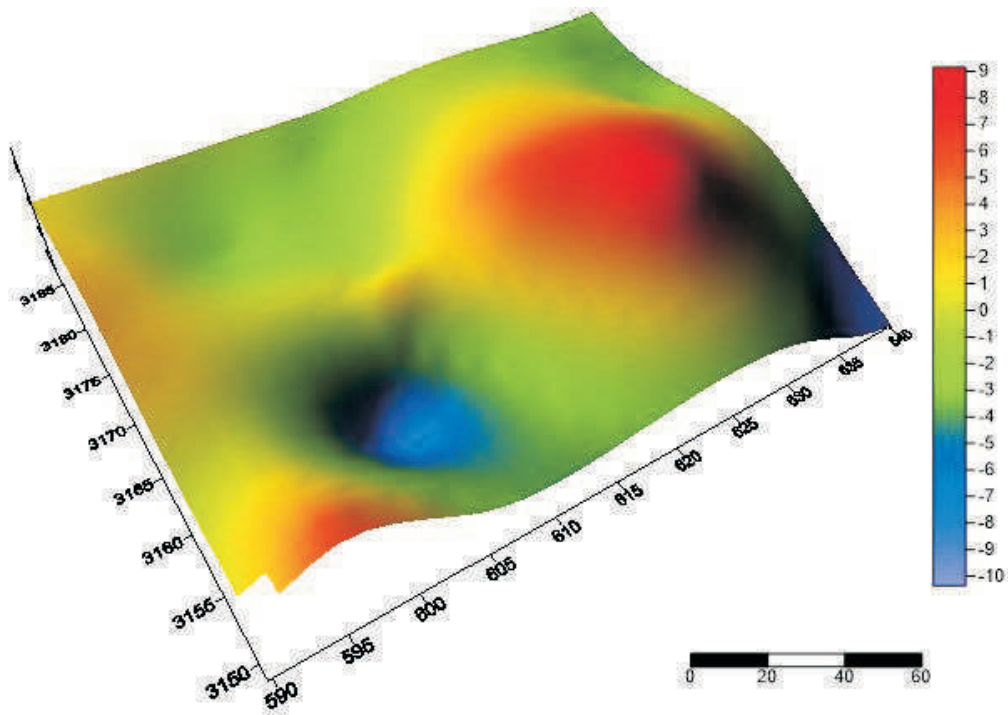


Figura 50. Configuración 3D de la Anomalia Residual de datos INEGI de la carta Tecoripa.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El mapa de Anomalía de Bouguer correspondiente a los perfiles medidos en campo, (espaciamiento entre estaciones a de 600 a 1,200 m) muestra dos anomalías principales, un alto y un bajo gravimétrico que correlacionan con el alto y bajo observados en el mapa de anomalía residual de INEGI. El mapa de anomalía residual obtenido con un ajuste polinomial de tercer grado, muestra altos y bajos gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos y rocas sedimentarias respectivamente.

Los modelos geológicos obtenidos a partir de 4 perfiles trazados sobre el mapa de anomalía residual muestran el basamento representado por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior que se encuentran en contacto con rocas sedimentarias del Grupo Barranca del Triásico superior y calizas del Ordovícico medio. Ambas rocas, volcánicas y sedimentarias, son intrusionadas por granitos-granodioritas, dioritas, pórfidos cuarzomonzoníticos, andesíticos y riolíticos, con edades del Terciario-Oligoceno. En base a la geología superficial así como a la configuración del basamento y modelo estructural obtenido se puede inferir la existencia de fallas con orientación NW-SE que originan estructuras de tipo Horst y Graben. Las cuencas tienen profundidades de 2,000 a 4,000 m. con rellenos sedimentarios de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

Los datos de la anomalía de gravedad de Bouguer completa de INEGI, correspondientes a la carta Tecoripa, muestran datos muy suavizados que representan el comportamiento regional del área de estudio, (espaciamiento entre estaciones a cada 4,070 m). La correspondiente anomalía residual (de -6 a +5 mGal) obtenida por ajuste polinomial de primer grado, presenta un alto gravimétrico bien definido de forma circular asociado a cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas. También se observa un bajo gravimétrico con orientación NW-SE asociado a cuencas sedimentarias.

Los modelos geológicos obtenidos a partir de 5 perfiles con orientación NE-SW trazados sobre el mapa de anomalía residual muestran altos gravimétricos asociados a cuerpos que intrusionan a rocas volcánicas de la Formación Tarahumara. En general, los bajos gravimétricos están asociados a cuencas y rocas sedimentarias.



En ambos datos (medidos e INEGI), los bajos gravimétricos asociados a rocas sedimentarias del Grupo Barranca corresponden a los eventos de depósitos (Orogenia Nevadiana de edad Jurásica) relacionados a la apertura del golfo de México. Los altos gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, se relacionan a eventos ocurridos a principios del Eoceno hasta el Oligoceno (Orogenia Larámide), donde se genera un arco magmático evidenciado por cuerpos graníticos y dacitas así como pórfidos de tipo cuarzomonzonítico, andesíticos, riolítico. Las estructuras de tipo Horst y Graben presentes en los modelos están relacionadas al evento distensivo Basin and Range, donde las cuencas presentan rellenos con depósitos principalmente de la Formación Báucarit y Sedimentos del Cuaternario. También se presenta la formación Lista Blanca originada por vulcanismos de tipo fisural.

Se considera que la realización de este estudio es importante porque fue posible modelar los tipos de estructuras y cuerpos presentes en un área de gran importancia minera, principalmente en el área de San Javier. Sin embargo, se recomienda complementar el estudio incorporando más estaciones gravimétricas, así como correlacionar y calibrar estos resultados con otros métodos geofísicos.

## 8. REFERENCIAS

Abadie, V.H., III, 1981. Geology of part of the Sierra de Moradillas, Sonora, México; Stanford, California, Stanford University, M. Sc. Thesis, 87 p.

Aguilera (1896), En Wilson I. T., Rocha V. S., 1946. Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, municipio de San Javier, Sonora. Comité directivo para la investigación de los recursos minerales de México, Bol. NO. 9, p108.

Alencaster De Cerna, Gloria., 1961. Paleontología del Triásico superior de Sonora: U.N.A.M., Inst. de Geología, parte 1- 18 p.

Amaya, M. R., González, C. M., Roldán, Q.J., 1992. Nuevas consideraciones estratigráficas de la Formación Tarahumara en la porción centro oriental de Sonora.

Amaya, M, R., Roldán, Q, J., Mcdowell, F.W.; 1993. Sobre la Edad de la Formación Tarahumara en la Región del Rio Yaqui, Sonora. Simposio Del XX Aniversario Del Departamento De Geología, Universidad De Sonora, 1-2

Amaya, M.R., Roldán, Q.J., Mcdowell, F.W., 1994. Sobre la edad de la Formación Tarahumara en la Región del rio Yaqui, Sonora. XX aniversario del departamento de Geología, Hermosillo, Sonora.

Anderson T. H. Y Silver, L.T., 1979. Precambric and Paleozoic rocks of the Caborca región, Sonora, México. En: Geology of norther Sonora, Anderson, T. H. y Roldán Quintana, (editores): Geological Society of American, libro guía de excursiones, p.122.

Bartolini, C., Morales, M., Damon, P. And Shafiqullah, M., 1991. Geology and Geocronology of the Sierra de Lista Blanca, central Sonora, México: Bol. Depto. de Geology UNI-SON., V 8, n, 1. Hermosillo, Sonora México.

Bartolini, C., Morales, M., Damon, P. Anda Shafiqullah, 1992. K-Ar ages of tilted Tertiary volcanic rocks associated with continental conglomerates, Sonora Basin and Range Province, México. Geol. Soc. Am. Abstracts with programs, 24, n.5.

Bartolini, C., Damon, P.E., Shafiqullah, M., Morales, M., 1994. Geochronologic contribution to the Tertiary sedimentary–volcanic sequences (Báucarit Formation) in Sonora, México: *Geofísica Internacional*, 33, 67–77.

Barrera Moreno E. Y Domínguez Perla J. E., 1987. Geología de la carta Tonichi (H12D65), con énfasis en el Paleozoico, porción central del estado de Sonora, Tesis UNISON.

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>

Cantos Figueroa. J. 1974. Tratado de Geofísica Aplicada. 2ª. Edición. Litoprint, España, Capítulo II, Método Gravimétrico, p. 35-104.

Cochemé, 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 á un régime distensif. Thèse de Doctorat d’ Etat, Univ .d’ Aix-Marseille, France.

Cojan I., Potter P. 1991. Depositional environment, petrology and provenance of the Santa Clara Formation, upper Triassic Barranca Group, Eastern Sonora, México, *The Geological Society America, Special Paper No. 254*, p. 37-50.

Coney, P. J., and Campa, M. F. 1983. Tectonostratigraphic Terranes and mineral resource distribución in México: *Canadian Journal of Earth Sciences*, V.20, p. 1040- 1050.

Coney, P.J. and Campa M.F. 1987. Lithotectonic Terrane Map of México (West of the 91st Meridian). U.S. Geological Survey, miscellaneous field studies map MF-1874-D.

Damon, P.E., Shafiqullah, M., Clark, K., 1981. Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis: *Revista del Instituto de Geología*, 5, 223–238.

Damon, P.E., 1983. El batolito Laramídico (90-40 Ma), de Sonora. Convención nacional 15, A.I.M.M.G.M, memoria técnica P-71.

Dickinson, W.R., 1979. Cenozoic plate setting of the Cordilleran región 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.

Dumble, E. T., 1900. Notes on the Geology of Sonora, México, American Instituto of Mining Engine, Transcations, p. 122-152.

Dumble, E.T., 1901. Cretaceus of Obispo Canyon, Sonora, México: Texas Academy Sciences, Vol. 4.

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 México, in Elston, W. E., and Northrop, S. A. (eds.), Cenozoic volcanism in southwestern New México: New México Geological Society, Special Publication no. 5, p. 93 102.

González L. C. (1980). La Formación Antimonio (Triásico superior–Jurásico inferior) en la sierra del Álamo, Estado de Sonora. Inst. de Geol. U.N.A.M., Revista, Vol. 4, No. 1., p. 13-18.

González L. C., Y Roldan Q. J., (1985). Notas sobre el Triásico superior de la sierra de la Flojera, Sonora. 111 Congreso Latinoamericano de Paleontología. Simposio sobre sobre floras del Triásico tardío, su Paleogeología y Paleoecología, Memoria del Inst. de Geología U.N.A.M., p 83-85.

González León, C.M; Lawton, T.F.; Y Weber, Reinhard, 2011. Estratigrafía del Triásico y el Jurásico Inferior de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, Capitulo 3, p. 57-80.

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

Instituto Nacional De Estadística Geografía E Informática [en línea]: Modelos y Cartas Gravimétricas [fecha de consulta: 15 enero 2015]. Disponible en: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos\\_cartas.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos_cartas.aspx)

King, R. E., 1939. Geological reconnaissance in north Sierra Madre Occidental of México. Geol. Soc. Americana, Bull. 50.

Martínez, R. 1984. Prospección geológica del grafito microcristalino del Triásico del Municipio de Álamos, Sonora. Unpublished thesis. Instituto Politécnico Nacional.

McDowell, F.W., Clabaugh, S.E., 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western México, in Chapin, C.E., Elston, W.E., eds., Ash-flow tuffs: Geological Society of America Special Paper 180, p. 113-124

McDowell, F. W., 1993. Geocronología mesozoica-Cenozoica magmatism, in south-central de Sonora. Simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes, P. 77-80.

McDowell, F.W.; Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., y González-León, C.M, 1994. The Tarahumara Formation—A Neglected Component of the Laramide Magmatic Arc in Sonora: Eos, V. 14, núm. 5, p. 76 (Resumen).

McDowell, F.W.; Roldán-Quintana, J., y Conelly, J.N., 2001. Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 113, p. 521–531.

Milton B. Dobrin, 1975. Introducción a la prospección geofísica. 2ª. Edición. Ediciones OMEGA, Barcelona España, Capítulos del 8 al 12, p. 194-293.

Morales-Montaña, M., Bartolini, C., Damon, P., Shafiqullah, M., 1990. K–Ar dating, stratigraphy and extensional deformation of Sierra Lista Blanca, Central Sonora, México: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 22 (6), p. 73.

Murray R. Spiegel, 1991. Estadística. 2ª. Edición. Impresora y Maquiladora de Libros MIG, S.A. de C.V; Capitulo 13, Ajuste de Curvas y Método de Mínimos Cuadrados, p. 289-322.

Noll, J. H., 1981. Geología del Picacho Colorado, área northern de Cobachi, Central de Sonora, México. Thesis of Northern Arizona University.

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.

Poole F. G. and Madrid R. J., 1986. Paleozoic Rocks in Sonora (México) and their relation to the southwestern continental margin of North America: *Geology of America Abstracts With Program*, v 18, 720-721.

Radelli, L. y Otros, 1987. Allochthonous Paleozoic bodies of Central Sonora. *Bol. Depto. De Geología de la UNI-SON*, V4, No. 1y 2. Hermosillo Son. México.

Radelli, L., 2005. Oligo-Miocene evolution of Sonora-Baja California, México—a segment of the North American margin. *Bol. Depto. Geol. Unisón*, 2005, Vols. 18 y 19, p. 153–174.

Raisz E. 1964. Landforms of México. Morphological map prepared for the geography Branch of the Office of Naval Research. Cambridge Mass, U.S.A.4

Rangin C, 1974. Reconocimiento estructural de Sonora centro-oriental, en relación con los yacimientos de Carbón, Artículo de revista de geología de la UNAM.

Rangin C. 1982. Contribution a l'étude géologique du système cordilleran du nord-ouest du Mexique. Thèse de doctorat état es scienses. Acad. Paris. Univ. Pierre et Marie Curie, p. 588.

Montiel R. Y Lobrado J., 2009. Distribución de la Formación Tarahumara y sus Relaciones con la Mineralización, XXVIII Convención Minera Internacional, AIMMGM AC, Veracruz.

Roldán Quintana J. 1982. Evolución Tectónica del Estado de Sonora, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, Vol. 5 núm. 2, p. 178-185.

Roldán Quintana J. 2002. Caracterización Geológica-Geoquímica y Evolución del Arco Magmático Mesozoico-Terciaria entre San Carlos y Maycoba, Sur de Sonora, Universidad Autónoma de México.

Scintrex LTD., 2006. CG-5 Scintrex Autograv System, Operation Manual. DocumentPart N°. 867700. Revisión 4, Canadá.

Servicio Geológico Mexicano, (SGM), 2003. Carta Geológica-Minera Tecoripa, H12-D64.

Silva-Pineda, A. 1961. Flora fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico) del Estado de Sonora. Universidad del Estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11: 1-37.

Stewart, J., Poole, F.G., Ketner, K.B., Madrid, R.J., Roldán–Quintana, J., 1990. Tectonic and stratigraphy of the Paleozoic and Triassic southern margin of North America, Sonora, México: Arizona Geological Survey, Special Paper 7, 183–202.

Stewart J. H. y Roldan, J., 1991. Grupo Barranca del Triásico superior: depósitos no marino y cuenca marina somera del NW de México., the geological society of American, special paper 254, P-19-36.

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.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., And Keys, D.A., 1976. Applied Geophysics: Cambridge University press, Chapter 2, Gravity Methods, p. 7-103.

Vassallo, L.F. 1985. Sobre la evolución geológica de la parte central del estado de Sonora-México y su relación con los depósitos de grafito, in Weber, Reinhard, ed. Simposio sobre las foras del Triásico tardío; su fitogeografía y paleoecología: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Congreso Latinoamericano de Paleontología, 3rd, Oaxtepec, Morelos, México, Memoria, p. 87-100.

Weber, R., Et Al (1980). Nuevas contribuciones al conocimiento de la flora de la formación Santa Clara (Triásico tardío) de Sonora. Inst. de Geología U.N.A.M., Revista, Vol. 4, No. 2 , 125-137.

Wilson, I.F., Rocha, V.S., 1946. Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Estado de Sonora: México, D.F., Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México, Bol. 49, p. 108.

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.

#### **Citas de Internet**

Figura 8. [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que\\_es\\_geoide.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que_es_geoide.aspx)

Figura 9. <https://paolera.wordpress.com/2013/08/09/>

Figura 10. [http://www.educaplus.org/movi/4\\_2caidalibre.html](http://www.educaplus.org/movi/4_2caidalibre.html)



# APÉNDICE

## Apéndice A

### Corrección Topográfica

Table 2.1. *Terrain corrections*

From Hammer's Tables, but based on average density  $\sigma = 2.67 \text{ g/cm}^3$

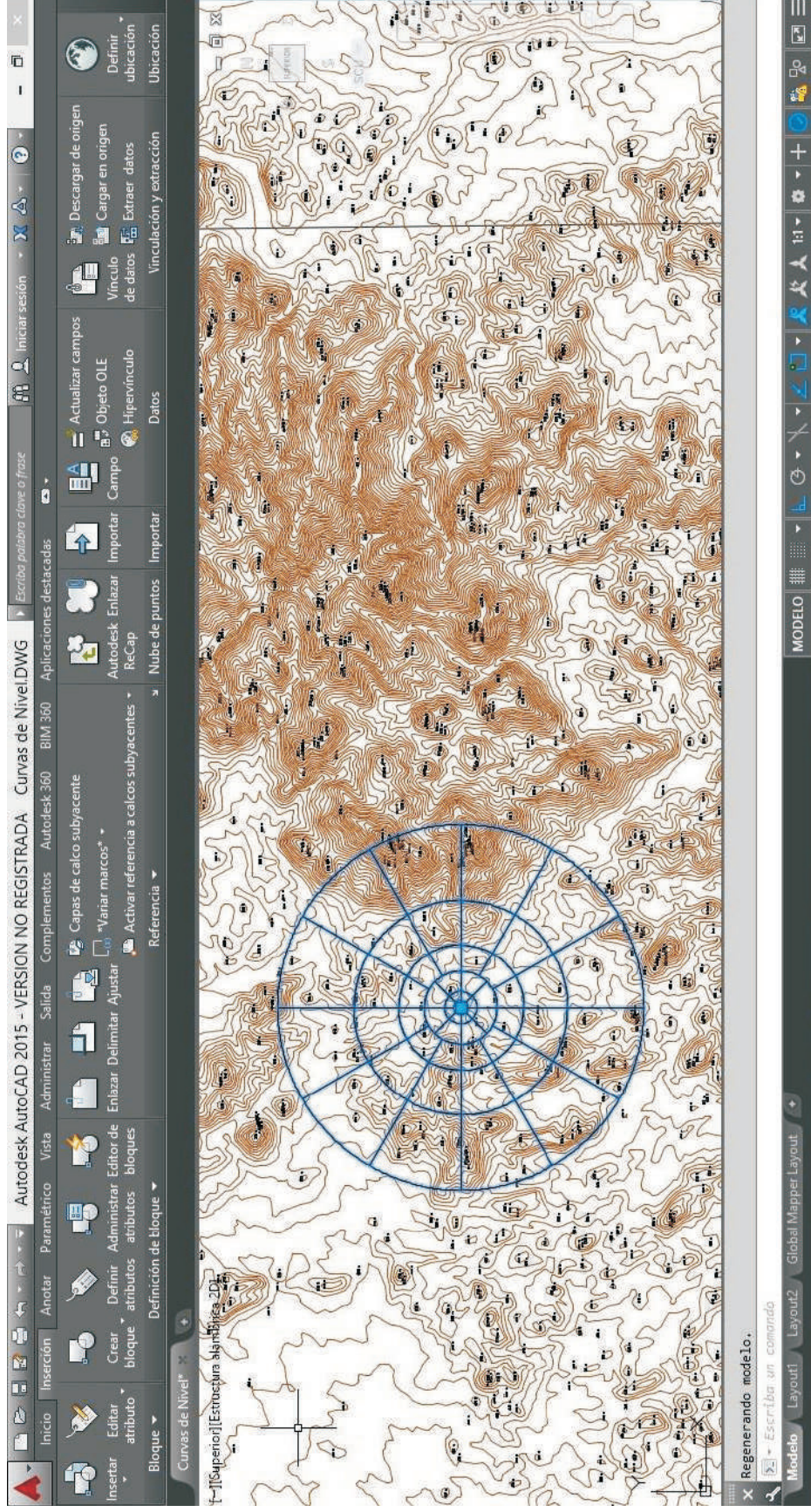
$$dg_T = \theta\gamma\sigma(r_o - r_i + \sqrt{(r_i^2 + z^2)} - \sqrt{(r_o^2 + z^2)}) \quad r_i, r_o = \text{inner, outer sector radii}$$

$$\gamma = 6.67 \times 10^{-8}, dg_T \text{ in milligals, } z, r_i, r_o \text{ in feet; } z = \text{average sector elevation}$$

Zone B 4 sectors 6'56"-54'6"		Zone C 6 sectors 54'6"-175'		Zone D 6 sectors 175'-558'		Zone E 8 sectors 558'-1280'		Zone F 8 sectors 1280'-2936'		Zone G 12 sectors 2936'-5018'		Zone H 12 sectors 5018'-8578'		Zone I 12 sectors 8578'-14612'	
$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$	$\pm z$	$dg_T$
0-0-1-1	0-00000	0-0-4-3	0-00000	0-0-7-7	0-00000	0-18	0-00000	0-27	0-00000	0-58	0-00000	0-75	0-00000	0-99	0-00000
1-1-1-9	0-00133	4-3-7-5	0-00133	7-7-13-4	0-00133	18-30	0-00133	27-46	0-00133	58-100	0-00133	75-131	0-00133	99-171	0-00133
1-9-2-5	0-00267	7-5-9-7	0-00267	13-4-17-3	0-00267	30-39	0-00267	46-60	0-00267	100-129	0-00267	131-169	0-00267	171-220	0-00267
2-5-2-9	0-00400	9-7-11-5	0-00400	17-3-20-3	0-00400	39-47	0-00400	60-71	0-00400	129-153	0-00400	169-200	0-00400	220-261	0-00400
2-9-3-4	0-00533	11-5-13-1	0-00533	20-5-23-2	0-00533	47-53	0-00533	71-80	0-00533	153-173	0-00533	200-226	0-00533	261-296	0-00533
3-4-3-7	0-00667	13-1-14-5	0-00667	23-2-25-7	0-00667	53-58	0-00667	80-88	0-00667	173-191	0-00667	226-250	0-00667	296-327	0-00667
3-7-7	0-01133	14-5-24	0-01133	25-7-43	0-01133	58-97	0-01133	88-146	0-01133	191-317	0-01133	250-414	0-01133	327-540	0-01133
7-9	0-0267	24-32	0-0267	43-56	0-0267	97-126	0-0267	146-189	0-0267	317-410	0-0267	414-535	0-0267	540-698	0-0267
9-12	0-040	32-39	0-040	56-66	0-040	126-148	0-040	189-224	0-040	410-486	0-040	535-633	0-040	698-827	0-040
12-14	0-053	39-45	0-053	66-76	0-053	148-170	0-053	224-255	0-053	486-552	0-053	633-719	0-053	827-938	0-053
14-16	0-067	45-51	0-067	76-84	0-067	170-189	0-067	255-282	0-067	552-611	0-067	719-796	0-067	938-1038	0-067
16-19	0-080	51-57	0-080	84-92	0-080	189-206	0-080	282-308	0-080	611-666	0-080	796-866	0-080	1038-1129	0-080
19-21	0-0935	57-63	0-0935	92-100	0-0935	206-222	0-0935	308-331	0-0935	666-716	0-0935	866-931	0-0935		
21-24	0-107	63-68	0-107	100-107	0-107	222-238	0-107	331-353	0-107	716-764	0-107	931-992	0-107		
24-27	0-120	68-74	0-120	107-114	0-120	238-252	0-120	353-374	0-120	764-809	0-120	992-1050	0-120		
27-30	0-133	74-80	0-133	114-120	0-133	252-266	0-133	374-394	0-133	809-852	0-133	1050-1105	0-133		
		80-86	0-147	120-127	0-147	266-280	0-147	394-413	0-147	852-894	0-147				
		86-91	0-160	127-133	0-160	280-293	0-160	413-431	0-160	894-933	0-160				
		9-97	0-174	133-140	0-174	293-306	0-174	431-449	0-174	933-972	0-174				
		97-104	0-187	140-146	0-187	306-318	0-187	449-466	0-187	972-1009	0-187				
		104-110	0-200	146-152	0-200	318-331	0-200	466-483	0-200	1009-1046	0-200				

## Apéndice A

### Corrección Topográfica y Plantilla de Hammer



## Apéndice B

### Anomalía de Bouguer Perfiles Medidos en Campo

ESTACIÓN	LONGITUD (X)	LATITUD (Y)	ELEVACIÓN (Z)	GRAVEDAD OBSERVADA	SD	Hora	C.E.	C.B.	C.C.	C.Deriva	C.LAT.	C.TOPO	AB
EB	595134	3167029	470	3016.661	0.075	12:17	0	0	0	0	0	0.83194	0
1	596001	3167086	455	3018.447	0.042	12:24	-4.6275	1.678095	-2.949405	0.001851385	-0.0388227	0.49367	-0.706706315
2	597067	3167181	442	3020.33	0.08	12:31	-8.638	3.132444	-5.505556	0.003702771	-0.1035272	0.77027	-1.166110429
3	598099	3167279	432	3021.527	0.057	12:37	-11.723	4.251174	-7.471826	0.005289673	-0.170275	0.07589	-2.694921327
4	598968	3167382	421	3022.508	0.03	12:46	-15.1165	5.481777	-9.634723	0.007670025	-0.2404283	0.70767	-3.312811275
Amarre 5	599754	3167480	428	3017.905	0.071	13:00	-12.957	4.698666	-8.258334	0.011372796	-0.3071761	0.09181	-7.218327304
6	600456	3167194	410	3019.497	0.036	13:16	-18.51	6.71238	-11.79762	0.015604534	-0.1123815	0.06263	-8.995766966
7	601811	3166723	382	3020.213	0.037	13:23	-27.148	9.844824	-17.303176	0.017455919	0.2084166	0.73156	-12.79374348
8	602512	3166578	402	3014.647	0.045	13:35	-20.978	7.607364	-13.370636	0.020629723	0.3071761	0.72022	-14.33661018
9	603372	3166517	384	3015.858	0.074	13:46	-26.531	9.621078	-16.909922	0.023539043	0.3487232	0.45264	-16.88801976
10	604123	3166260	384	3017.27	0.03	13:51	-26.531	9.621078	-16.909922	0.024861461	0.5237659	0.45393	-15.29836464
11	605101	3166451	408	3020.365	0.059	13:58	-19.127	6.936126	-12.190874	0.026712846	0.3936758	0.17824	-7.888245354
12	606077	3165953	403	3025.935	0.143	14:05	-20.6695	7.495491	-13.174009	0.028564232	0.7328636	0.560929	-2.577652168
13	606775	3166145	405	3025.392	0.065	14:14	-20.0525	7.271745	-12.780755	0.030944584	0.6020924	0.39204	-3.024678016
14	607644	3166072	415	3024.682	0.051	14:19	-16.9675	6.153015	-10.814485	0.032267003	0.6518127	0.41324	-1.696165297
15	608473	3166198	422	3022.657	0.034	14:25	-14.808	5.369904	-9.438096	0.033853904	0.5659941	0.710163	-2.132084996
16	609524	3166198	442	3017.548	0.117	14:31	-8.638	3.132444	-5.505556	0.035440806	0.5659941	0.71414	-3.302981094
17	610616	3166212	463	3014.81	0.049	14:38	-2.1595	0.783111	-1.376389	0.037292191	0.5564587	0.60572	-2.027918109
18	611593	3166011	468	3010.941	0.028	14:46	-0.617	0.223746	-0.393254	0.03940806	0.6933598	0.30636	-5.07412614
19	612366	3165876	492	3008.035	0.039	14:52	6.787	-2.461206	4.325794	0.040994962	0.7853083	0.188147	-3.285755738
20	613495	3166176	507	3006.813	0.065	14:58	11.4145	-4.139301	7.275199	0.042581864	0.5809783	0.45824	-1.491000836
21	614255	3166381	523	3003.757	0.117	15:05	16.3505	-5.929269	10.421231	0.044433249	0.4413528	0.66138	-1.335602951
22	615112	3166560	550	2999.193	0.03	15:12	24.68	-8.94984	15.73016	0.046284635	0.3194359	0.19825	-1.173869465

## Apéndice B

### Anomalía de Bouguer Perfiles Medidos en Campo (Cont.)

23	615797	3165890	533	3000.432	0.038	15:18	19.4355	-7.047999	12.387501	0.047871537	0.7757729	0.61697	-2.400884563
24	616279	3165119	508	3005.5	0.052	15:25	11.723	-4.251174	7.471826	0.049722922	1.300901	0.59237	-1.746180078
25	616747	3164816	514	3004.101	0.046	15:30	13.574	-4.922412	8.651588	0.05104534	1.5072743	0.68813	-1.66196236
26	617161	3164622	529	3001.322	0.019	15:35	18.2015	-6.600507	11.600993	0.052367758	1.6394077	0.37143	-1.674801542
27	617438	3163682	500	3008.103	0.02	15:40	9.255	-3.35619	5.89881	0.053690176	2.2796417	1.332484	1.006625876
28	618048	3163188	494	3009.697	0.025	15:45	7.404	-2.684952	4.719048	0.055012594	2.6161051	0.79987	1.226035694
29	618660	3162719	515	3006.059	0.017	15:51	13.8825	-5.034285	8.848215	0.056599496	2.935541	1.01061	2.248965496
30	619610	3161380	486	3012.408	0.012	15:57	4.936	-1.789968	3.146032	0.058186398	3.8475339	1.15883	3.957582298
31	620601	3161232	525	3005.354	0.02	16:03	16.9675	-6.153015	10.814485	0.0597733	3.9483367	1.41499	4.930585
32	621387	3160475	547	2997.207	0.058	16:08	23.7545	-8.614221	15.140279	0.061095718	4.4639294	1.32863	1.539934118
33	622093	3160105	535	2997.758	0.023	16:13	20.0525	-7.271745	12.780755	0.062418136	4.7159364	2.37459	1.030699536
34	623207	3158610	505	3002.62	0.046	16:21	10.7975	-3.915555	6.881945	0.064534005	5.7341809	1.74931	0.388969905
35	624222	3158314	515	3001.455	0.056	16:29	13.8825	-5.034285	8.848215	0.066649874	5.9357865	1.45742	1.102071374
36	624878	3158594	518	2999.862	0.014	16:41	14.808	-5.369904	9.438096	0.069823678	5.7450785	1.82947	0.283468178
37	626434	3159186	614	2981.873	0.029	16:48	44.424	-16.109712	28.314288	0.071675063	5.3418673	1.11506	0.054890363
38	626930	3160079	587	2997.298	0.027	16:55	36.0945	-13.089141	23.005359	0.073526448	4.733645	1.458	9.907530448
39	627782	3160760	618	2981.303	0.084	17:01	45.658	-16.557204	29.100796	0.07511335	4.2698159	1.74113	-0.17114475
40	628653	3161663	729	2956.265	0.034	17:08	79.9015	-28.975107	50.926393	0.076964736	3.6547826	1.04085	-4.697009664
41	629274	3162166	663	2972.074	0.033	17:14	59.5405	-21.591489	37.949011	0.078551637	3.3121893	2.2647	-0.982548063
42	629917	3162194	632	2974.508	0.016	17:20	49.977	-18.123426	31.853574	0.080403023	3.2931185	3.70477	-3.221134477
Amarre 43	630508	3161976	589	2983.035	0.018	17:27	36.7115	-13.312887	23.398613	0.082254408	3.4415983	2.03232	-4.671214292
44	630534	3161701	570	2990.389	0.015	17:35	30.85	-11.1873	19.6627	0.084370277	3.6289008	2.7128	-0.183228923
INEGI	622501	3162416	813	2941.999	0.047	18:12	105.8155	-38.372439	67.443061	0.095214106	3.1419143	2.44008	-1.541730594
EB	595134	3167025	465	3016.556	0.049	18:53				0.105			

## Apéndice C

### Anomalía de Bouguer Completa INEGI

ESTACIÓN	LONGITUD (X)	LATITUD (Y)	Elevacion (m)	A.B. Completa	ESTACIÓN	LONGITUD (X)	LATITUD (Y)	Elevacion (m)	A.B. Completa
<b>PERFIL 1</b>					<b>PERFIL 5</b>				
1	110.0625	28.77083	647	-70.051	1	110.0625	28.60417	532	-61.514
2	110.02083	28.77083	553	-72.825	2	110.02083	28.60417	500	-64.034
3	109.97917	28.77083	504	-75.353	3	109.97917	28.60417	450	-67.093
4	109.9375	28.77083	583	-76.769	4	109.9375	28.60417	372	-68.296
5	109.89583	28.77083	590	-78.072	5	109.89583	28.60417	422	-66.522
6	109.85417	28.77083	602	-80.4	6	109.85417	28.60417	486	-68.483
7	109.8125	28.77083	749	-80.945	7	109.8125	28.60417	542	-67.456
8	109.77083	28.77083	640	-81.333	8	109.77083	28.60417	773	-66.644
9	109.72917	28.77083	546	-82.613	9	109.72917	28.60417	836	-66.818
10	109.6875	28.77083	275	-84.449	10	109.6875	28.60417	932	-67.857
11	109.64583	28.77083	217	-86.809	11	109.64583	28.60417	405	-71.816
12	109.60417	28.77083	306	-89.612	12	109.60417	28.60417	219	-76.317
<b>PERFIL 2</b>					<b>PERFIL 6</b>				
1	110.0625	28.72917	603	-67.178	1	110.0625	28.5625	537	-60.6
2	110.02083	28.72917	563	-70.749	2	110.02083	28.5625	834	-62.427
3	109.97917	28.72917	467	-74.348	3	109.97917	28.5625	522	-67.657
4	109.9375	28.72917	523	-75.438	4	109.9375	28.5625	378	-73.959
5	109.89583	28.72917	608	-76.542	5	109.89583	28.5625	373	-70.251
6	109.85417	28.72917	681	-77.689	6	109.85417	28.5625	479	-68.453
7	109.8125	28.72917	563	-77.829	7	109.8125	28.5625	493	-67.325
8	109.77083	28.72917	564	-77.93	8	109.77083	28.5625	574	-66.364

## Apéndice C

### Anomalía de Bouguer Completa INEGI (Cont.)

9	109.72917	28.72917	489	-78.918	9	109.72917	28.5625	561	-64.96
10	109.6875	28.72917	425	-80.775	10	109.6875	28.5625	707	-64.348
11	109.64583	28.72917	302	-83.532	11	109.64583	28.5625	438	-70.462
12	109.60417	28.72917	357	-87.128	12	109.60417	28.5625	354	-76.44
<b>PERFIL 3</b>					<b>PERFIL 7</b>				
1	110.0625	28.6875	654	-64.593	1	110.0625	28.52083	662	-57.783
2	110.02083	28.6875	495	-68.105	2	110.02083	28.52083	592	-58.62
3	109.97917	28.6875	442	-71.051	3	109.97917	28.52083	432	-63.52
4	109.9375	28.6875	534	-72.895	4	109.9375	28.52083	346	-68.623
5	109.89583	28.6875	591	-74.359	5	109.89583	28.52083	353	-69.254
6	109.85417	28.6875	619	-74.459	6	109.85417	28.52083	383	-68.308
7	109.8125	28.6875	573	-74.019	7	109.8125	28.52083	385	-67.441
8	109.77083	28.6875	526	-74.062	8	109.77083	28.52083	580	-66.852
9	109.72917	28.6875	799	-75.069	9	109.72917	28.52083	504	-66.486
10	109.6875	28.6875	900	-77	10	109.6875	28.52083	767	-67.545
11	109.64583	28.6875	465	-79.996	11	109.64583	28.52083	452	-71.99
12	109.60417	28.6875	332	-84.124	12	109.60417	28.52083	378	-77.953
<b>PERFIL 4</b>					<b>PERFIL 8</b>				
1	110.0625	28.64583	510	-62.574	1	110.0625	28.47917	475	-54.091
2	110.02083	28.64583	456	-65.347	2	110.02083	28.47917	444	-52.582
3	109.97917	28.64583	423	-67.39	3	109.97917	28.47917	384	-57.524
4	109.9375	28.64583	440	-68.759	4	109.9375	28.47917	326	-63.341
5	109.89583	28.64583	447	-71.224	5	109.89583	28.47917	312	-66.234
6	109.85417	28.64583	508	-71.052	6	109.85417	28.47917	348	-66.971
7	109.8125	28.64583	824	-69.576	7	109.8125	28.47917	346	-67.046

## Apéndice C

### Anomalía de Bouguer Completa INEGI (Cont.)

8	109.77083	28.64583	625	-69.101	8	109.77083	28.47917	402	-67.209
9	109.72917	28.64583	996	-70.378	9	109.72917	28.47917	562	-67.92
10	109.6875	28.64583	1131	-72.226	10	109.6875	28.47917	446	-69.892
11	109.64583	28.64583	576	-75.269	11	109.64583	28.47917	407	-73.864
12	109.60417	28.64583	251	-79.43	12	109.60417	28.47917	402	-79.504