



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



**Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Departamento de Geofísica**

**Exploración Gravimétrica en la Zona de Tepexi
de Rodríguez, Puebla.**

T E S I S

Para obtener el título de:

INGENIERA GEOFÍSICA

Presenta:

Eloisa Téllez García

Director:

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi

Ciudad Universitaria, México DF, 2008.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice General

Resumen	7
I. Introducción	8
I.1. Objetivos.....	10
II. Zona de Estudio	
II.1. Tepexi de Rodríguez, Puebla.....	11
II.2. Geología Regional.....	16
II.3. Cantera Tlayúa.....	18
II.4. Geología de la Cantera Tlayúa.....	19
II.5. Importancia Paleontológica de la Cantera Tlayúa.....	21
III. Marco Teórico	
III.1. El Método Gravimétrico.....	22
III.2. Principio de Gravedad.....	22
III.3. El Geoide.....	25
III.4. Anomalías de gravedad.....	26
III.5. Correcciones gravimétricas.....	27
IV. Metodología	
IV.1. Parámetros de la exploración gravimétrica.....	29
IV.2. Instrumentos gravimétricos.....	30
V. Desarrollo de la Exploración	
V.1. Adquisición de datos.....	33
V.2. Localización de las estaciones.....	34
V.3. Topografía de la zona.....	36

V.4. Valores de Anomalía de Bouguer.....	38
V.5. Densidades de la Formación Tlayúa.....	41
V.6. Perfiles proyectados	43
VI. Discusión	
VI.1. Perfiles Gravimétricos.....	46
VI.2. Interpretación.....	47
VI.3. Modelos Gravimétricos.....	48
VII. Conclusiones.....	56
Bibliografía.....	59

Índice de Figuras

Capítulo I

Figura I.1.	Reconstrucción del Modelo Paleoambiental propuesto por Espinosa- Arrubarena y Applegate.....	9
--------------------	---	---

Capítulo II

Figura II.1.1.	Localización del municipio de Tepexi de Rodríguez, Puebla.....	11
-----------------------	---	----

Figura II.1.2.	Relieve de la zona de estudio.....	13
-----------------------	------------------------------------	----

Figura II.2.1.	Columna geológica del Estado de Puebla.....	16
-----------------------	---	----

Figura II.2.2.	Mapa geológico de la zona de Tepexi de Rodríguez, Puebla.....	17
-----------------------	--	----

Figura II.3.1.	Localización de la Cantera Tlayúa.....	18
-----------------------	--	----

Figura II.4.1.	Geología de los alrededores de la Cantera Tlayúa.....	19
-----------------------	---	----

Figura II.4.2.	Aspecto general de la Cantera Tlayúa.....	20
-----------------------	---	----

Figura II.4.3.	Lajeamiento de la roca en la Cantera Tlayúa.....	20
-----------------------	--	----

Figura II.5.1.	Estrella de mar fósil.....	21
-----------------------	----------------------------	----

Figura II.5.2.	Tortuga fósil.....	21
-----------------------	--------------------	----

Figura II.5.3.	Pez Picnodonte.....	21
-----------------------	---------------------	----

Figura II.5.4.	Teoichtys Kallistos.....	21
-----------------------	--------------------------	----

Capítulo III

Figura III.3.1.	El Geoide.....	25
------------------------	----------------	----

Figura III.3.2.	Altitudes de un punto sobre la Tierra.....	26
------------------------	--	----

Capítulo IV

Figura IV.2.1.	Gravímetro LaCoste-Romberg.....	31
Figura IV.2.2.	Partes del Gravímetro LaCoste-Romberg.....	32

Capítulo V

Figura V.2.1.	Localización de las estaciones gravimétricas.....	34
Figura V.2.2.	Localización de estaciones gravimétricas en referencia a las curvas de nivel.....	35
Figura V.3.1.	Representación tridimensional de la Topografía de la zona de estudio.....	36
Figura V.3.2.	Rasgos mayores de la topografía en la zona de estudio.....	37
Figura V.4.1.	Anomalía de Bouguer en relación a las curvas de nivel de la zona de estudio.....	38
Figura V.4.2.	Representación Tridimensional de la Anomalía de Bouguer.....	39
Figura V.4.3.	Valores de la Anomalía de Bouguer ordenados en forma ascendente.....	40
Figura V.4.4.	Valores de la Anomalía de Bouguer en el orden original de las estaciones.....	40
Figura V.5.1.	Densidad promedio de las muestras de roca caliza de la Cantera Tlayúa.....	41
Figura V.5.2.	Densidades de las muestras de roca Caliza.....	42
Figura V.5.3.	Histograma de densidades de roca Caliza.....	42
Figura V.6.1.	Perfil Río Axamilpa.....	43
Figura V.6.2.	Perfil Progreso.....	44
Figura V.6.3.	Perfil Naranjos.....	44
Figura V.6.4.	Perfil Tlayúa.....	45
Figura V.6.5.	Perfil Tepexi Centro.....	45

Capítulo VI

Figura VI.1.1.	Localización de los perfiles gravimétricos seleccionados.....	46
Figura VI.3.1.	Modelo 01a. Tepexi Centro.....	48
Figura VI.3.2.	Modelo 01b. Tepexi Centro.....	49
Figura VI.3.3.	Modelo 01c. Tepexi Centro.....	50
Figura VI.3.4.	Modelo 01d. Tepexi Centro.....	51
Figura VI.3.5.	Modelo 02a .Tlayúa.....	52
Figura VI.3.6.	Modelo 02b. Tlayúa.....	53
Figura VI.3.7.	Modelo 02c. Tlayúa.....	54
Figura VI.3.8.	Modelos del perfil regional.....	55

Capítulo VII

Figura VII.1.	Esquema del modelo propuesto para la zona de Tepexi de Rodríguez durante el Cretácico.....	58
----------------------	---	----

Resumen

Se presentan los resultados del estudio geofísico de la zona de Tepexi de Rodríguez, Puebla. Las secuencias sedimentarias del Mesozoico se caracterizan por su riqueza fosilífera y han sido investigadas por varios años. Las formaciones sedimentarias fueron depositadas en el sector occidental del antiguo mar de Tethys. En la zona, el basamento está constituido por rocas metamórficas del Complejo Acatlán del Paleozoico temprano. Sobre las unidades metamórficas se tienen rocas sedimentarias del Paleozoico tardío, Jurásico medio-tardío, Cretácico y Cenozoico. De particular interés dentro de las secciones sedimentarias es la secuencia carbonatada del Cretácico de la Formación Tlayúa, que contiene peces fósiles, organismos terrestres y anfibios, así como insectos, equinodermos, moluscos y plantas.

Como parte de los estudios sobre las características estructurales de las cuencas sedimentarias y los espesores de las secuencias sedimentarias se han realizado mediciones gravimétricas a lo largo de varios perfiles en la zona. En este trabajo se presentan y analizan varios posibles modelos geométricos, generados haciendo uso de variaciones de profundidad y contrastes de densidad que ajustan los datos de anomalías gravimétricas, el análisis de la variación de las profundidades se realizó en dos aspectos; en el de la profundidad total del modelo perfilado y en la variación de los espesores de las distintas unidades, además se efectuó una evaluación de modelos equiespaciados y no equiespaciados de los distintos puntos de medición a fin de observar posibles variaciones un tanto atenuadas por alta frecuencia superficial en la zona.

Los modelos perfilados sugieren la ocurrencia de dos cuencas sedimentarias, en concordancia con el modelo de reconstrucción paleoambiental de Applegate et al. (2006). Estudios de la secuencia de Tlayúa, los conjuntos de fósiles terrestres, marinos y de agua dulce, y las características sedimentológicas apoyan un ambiente de cuenca restringida con influencias marinas y de agua dulce.

CAPITULO I

Introducción

El estudio objeto de esta tesis se llevo a cabo en la región circundante al poblado de Tepexi de Rodríguez, Puebla, esta zona reviste un gran interés científico dadas sus características estratigráficas, sedimentológicas, estructurales y paleontológicas. En particular destacan los conjuntos fósiles de las secuencias sedimentarias del Cretácico y del Terciario (Applegate et al., 2006).

Entre los factores especiales en las secuencias Cretácicas se encuentra un “ambiente somero de depósito con granulometría fina de los sedimentos, presencia y abundancia ocasional de biota arrecifal en ambiente lagunar de postarrecife con fluctuaciones intermareales, fenómenos causales de tanatocenosis, acciones preservadoras de los fósiles y, finalmente, una meteorización reciente que permite el lajeamiento de la roca sin destrucción de la paleofauna al extraerla de su lecho rocoso.” (Pantoja-Alor, 1992).

Esta descripción de ambientes se ilustra en la zona de la Cantera Tlayúa, y en la zona circundante a la localidad de Tepexi de Rodríguez.

Uno de los elementos más importantes en el estudio de la Cantera Tlayúa ha sido dilucidar el contexto paleoambiental que sucitó esta extraordinaria asociación paleontológica. Los intentos para interpretar los paleoambientes representados en Tlayúa incluyen investigaciones que sugieren modelos en base a información paleoecológica y sedimentológica derivada de investigaciones realizadas anteriormente e investigaciones recientes.

Modelos Paleoambientales de Tlayúa

Estas investigaciones incluyen varias ideas contrastantes.

Uno de los modelos interpretativos postula una laguna costera de ambiente somero, situada detrás de una barrera arrecifal que de acuerdo a Pantoja-Alor (1992) estaba conectada con mar abierto.

En el mismo sentido, Espinosa-Arrubarena y Applegate (1996) propusieron una doble laguna cerrada en la cual el ambiente sedimentario era considerado con aguas estancadas, anaerobias e hipersalinas en un ambiente extremadamente somero (Applegate et al., 2006).

La paleogeografía propuesta para estos modelos implica la existencia de tierras áridas hacia el occidente y por el otro lado una barrera bordeando una laguna más profunda y mejor oxigenada. (Figura I.1).

Por otro lado Kashiyama et al. (2004) propone una reconstrucción paleogeográfica y ambientes de depósito de mar abierto, con profundidades mayores. En este modelo las secuencias carbonatadas no se acumulan en los ambientes someros de cuencas de los modelos anteriores.

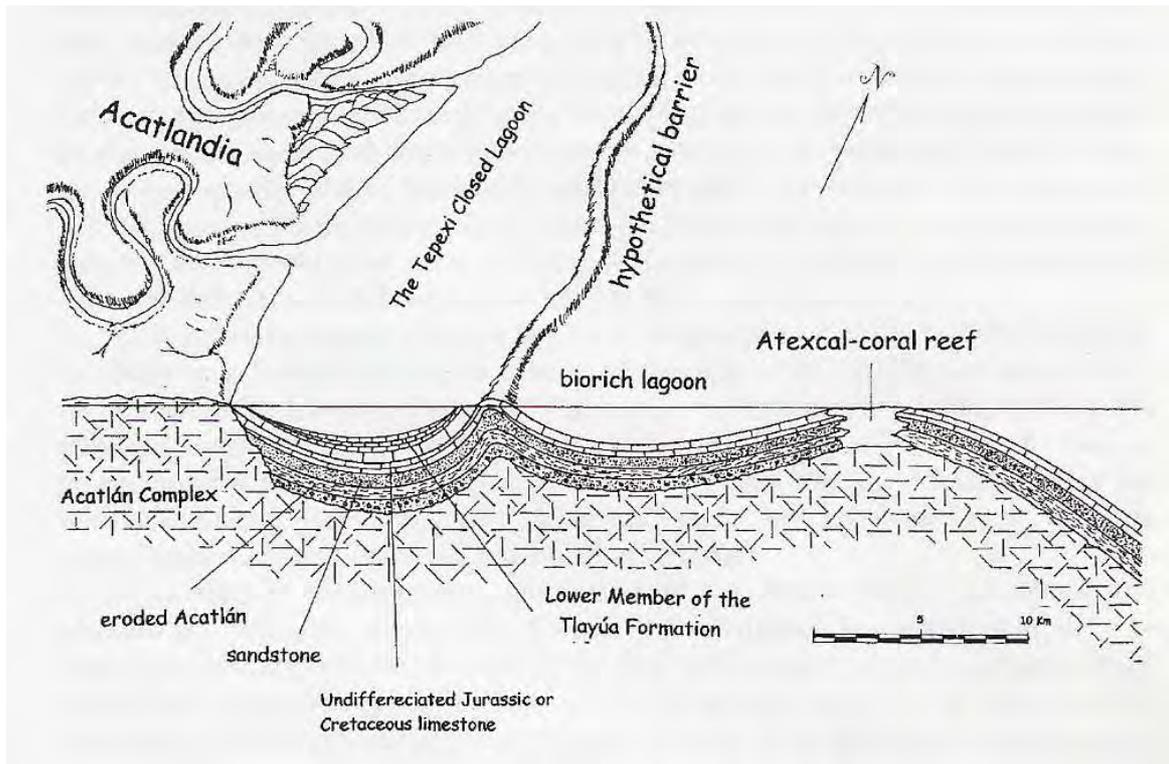


Fig. I.1. Reconstrucción de uno de los posibles modelos propuestos por Espinosa-Arrubarena y Applegate para explicar la génesis de la Cantera Tlayúa.¹

La conservación excepcional de Tlayúa se debió a un limitado sistema de circulación de agua que produjo un ambiente anaerobio y/o hipersalino; es decir, un fondo tóxico sin especies bentónicas, de acuerdo con Applegate (1992), se daban temporadas de tormentas en las cuales la retrolaguna se poblaba de una rica comunidad de plancton que producía grandes comunidades de lodo calcáreo que a su vez causaba un largo proceso de sepultamiento. La presencia de organismos terrestres y de agua dulce, incluyendo arácnidos, insectos, lagartos, quelonios y plantas terrestres junto con una biota marina típica sugiere que la laguna de Tlayúa tenía un flujo periódico de agua dulce sumado a la fuerte influencia marina de la laguna arrecifal. (Feldmann et al., 1998).

¹ (Applegate et al., 2006)

1.1. Objetivos.

La Formación Tlayúa contiene uno de los depósitos con excepcional preservación fósil más importantes para el Cretácico en el mundo. La Formación es parte de las secuencias sedimentarias mesozoicas en el Sur de Puebla y Norte de Oaxaca y se tiene interés en investigar con mayor detalle la paleogeografía, ambientes de depósito, características de las cuencas, fallamiento, espesores y distribución de las formaciones. Los depósitos fosilíferos han sido particularmente estudiados en los afloramientos de la Cantera Tlayúa; sin embargo, aún no están bien comprendidos los procesos diagenéticos asociados al depósito, las condiciones geoquímicas que prevalecieron al formarse Tlayúa y los factores que propiciaron la formación de un depósito de tal naturaleza.

Este trabajo tiene como objetivos:

- Investigar las estructuras de cuencas sedimentarias en la región de Tepexi de Rodríguez por medio de exploración gravimétrica.
- Analizar los posibles modelos geofísicos, con atención particular a las estructuras de falla para delimitar los contornos de la o las cuencas sedimentarias, que constituyen factores importantes para las condiciones de depósito y acumulación de los sedimentos en la zona.
- Estimar espesores de las secuencias sedimentarias en la región de Tepexi de Rodríguez, a partir de los modelos geofísicos de las cuencas sedimentarias.
- Acrecentar el conocimiento que se tiene sobre la zona, ya que toda investigación, y más aún cuando es de naturaleza básica, es propensa y muy proclive a incentivar nuevas investigaciones que contribuyen en aplicaciones de interés general.

CAPITULO II

Zona de estudio

II.1. Tepexi de Rodríguez, Puebla

Localización y características generales

La población de Tepexi de Rodríguez se ubica en la porción Sur del estado de Puebla, entre las coordenadas geográficas 18°20'24" y 18° 37'42" de latitud Norte y los meridianos 97° 46'00" y 98° 03'18" de longitud Occidental, en una sección del estado muy cercana a ser colindante con el estado de Oaxaca. (Figura II.1.1). Colinda al Norte con Molcaxac y Todos Santos Xochitlán, al Sur con Ahuatempan y San Jeronimo Xayacatlán, al Oriente con San Juan Ixcaquixtla, Juan N. Méndez y Coyotepec y al Poniente con Zacapala y Ahuatempan.

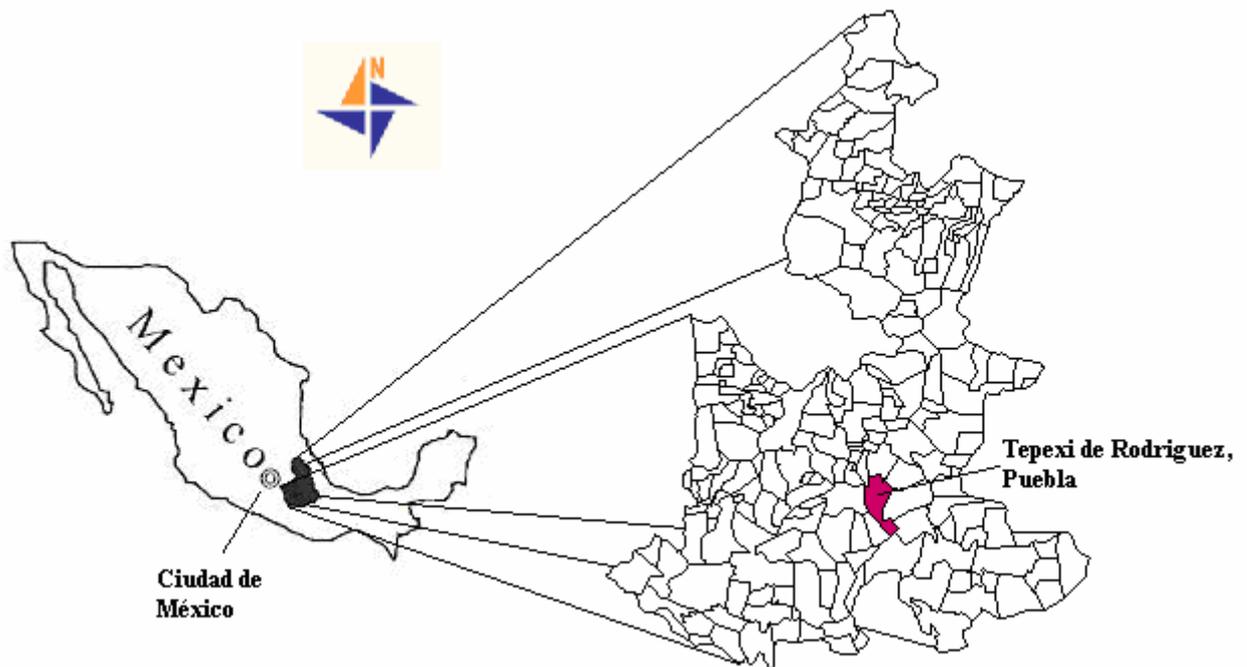


Fig. II.1.1. Localización del municipio de Tepexi de Rodríguez.¹

¹ (Kashiyama et al., 2004)

Historia

La palabra Tepexi tiene la siguiente significación: Tetl: piedra, cerro, y pexic: partir, cortar, palabras que unidas forman el nombre de Tepexic, el cual fue dado por los toltecas y significa: “roca partida o escarpada o cerro partido”, lo que se traduce como despeñadero. Otra acepción es en el “lugar barrancoso” y una tercera acepción: “lugar de precipicios”.

En la zona de exploración existe un conjunto arquitectónico prehispánico denominado Tepexi el Viejo, población fundada por los popolocas y mixtecos en la margen izquierda del río Axamilpa, en el siglo XV eran tributarios de los aztecas.

Posteriormente los españoles implantaron el sistema de encomiendas y la población fue trasladada al lugar que actualmente ocupa. En el siglo XVI se cultivó la morera y se crió el gusano de seda y a esto se debe que le hayan nombrado Tepexi de la Seda.

Extensión

Tiene una superficie de 412.05 kilómetros cuadrados que lo ubica en el 15º lugar con respecto a los demás municipios del Estado.

Orografía

El municipio presenta un relieve accidentado en general; al Noreste se alzan las últimas estribaciones septentrionales de la Sierra de Zapotitlán, formada por montañas de plegamiento donde la erosión ha cortado barrancos profundos por la vertiente Occidental.

El municipio de Tepexi de Rodríguez se localiza dentro de la región morfológica de los llanos de Tepexi, extensa llanura que limita al Norte con el Valle de Tepeaca, al Sur con la sierra de Acatlán, al Este con la Sierra de Soltepec y el Valle de Tehuacán, y al Oeste con el Valle de Atlixco, de Matamoros y la depresión de Valsequillo.

En la zona destacan los cerros La Pila, Tlacuacintepec, Masahuale, Petlasontepec, Celotzi, y Gordo. Al Centro-Oeste y Sureste se alza un larga y alineada sierra de más de 15 kilómetros de extensión que se inicia al Norte de San Pablo Ameyaltepec y culmina al Sur de Tula, la cual no alcanza más de 100 metros de altura, aunque destacan los cerros Alotín, Palmón, La Tortuga, Telele, Cochino, Quemado, El Grande, Pata de Mula, Chocolin, El Guaje y Tetele Moctezuma, así como Las Lomas, El Orégano, El Cincho, El Águila, y Palo Grande. Al centro, se levanta un altiplano,

única zona del municipio que presenta una topografía más o menos plana a una altitud promedio de 1,890 metros.



Fig. II.1.2. Relieve de parte de la zona de estudio.²

Al Occidente el relieve muestra un declive constante e irregular en dirección Este-Oeste, desde 1,800 a 1,500 metros sobre el nivel del mar, la altura del municipio oscila entre 1,440 y 2,380 metros sobre el nivel del mar. (Fig. II.1.2).

Hidrografía

El municipio de Tepexi de Rodríguez se ubica dentro de la cuenca del río Atoyac, una de las más importantes del Estado, cuenta con algunos ríos que en general tienen poco caudal, entre los que se cuentan los siguientes:

- El Río Axamilpa, que nace al Noreste del municipio, en las estribaciones de la Sierra de Zapotitlán, baña el Norte del territorio de Este a Oeste para unirse posteriormente al río Atoyac.
- El Río Carnero, que nace al Sur de Tula, recorre el centro del municipio de Norte a Sur por más de 10 kilómetros, formando posteriormente el Río Ramales, afluentes del Acatlán y a su vez es tributario del Mixteco, que desagua en el Atoyac.

² (Dra. Ligia Pérez Cruz)

También cuenta con algunos arroyos intermitentes que se unen a los ríos mencionados, destacan la presa Tula y los bordos Ixtlahuatongo, Rancho Nuevo y Pixtiopan.

Clima

En el municipio se presenta la transición de los climas cálidos del Suroeste del Estado, a los templados de los valles centrales pasando por los semicálidos; se identifican tres climas:

- Clima templado subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 12 °C y 18°C; precipitación del mes más seco menor de 40 milímetros; por ciento de lluvia invernal con respecto a la anual menor de 5; temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C. Ocupa la porción Oriental del municipio.
- Clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 18°C y 22°C; temperatura del mes más frío mayor de 18°C; precipitación pluvial del mes más seco menor de 60 milímetros; por ciento de lluvia invernal con respecto de la anual menor de 5. Es el clima predominante, cubre la zona occidental.
- Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual mayor de 22°C; temperatura del mes más frío mayor de 18°C; precipitación pluvial del mes más seco menor de 60 milímetros; por ciento de lluvia invernal con respecto a la anual menor de 5. Se identifica en un área reducida al Centro-Oeste.

Ecosistemas

El municipio de Tepexi de Rodríguez presenta gran diversidad de vegetación. Al Noreste existen extensas zonas de matorral crasicaule, asociado a cardonal; cuenta con especies tales como sotol, cucharillo, peistón, crotón, gigante, garambullo, nopal, cholla, cacalosuchil y orégano.

Al Norte, Noreste y extremo Sur existe selva baja caducifolia donde se encuentran las especies siguientes: copal, cuajilote, gigante, orégano, coyotillo, tullidora, palma, cacahuete, granjero, jarrilla, etc. También existen amplias zonas de chaparrales al Suroeste y palmares por todo el territorio. Al Centro Oeste, cuenta con pequeños bosques de encino y pastizales.

Recursos naturales

Minería, canteras de mármol, travertino, laja y ónix; minas de carbón, y de plomo.

Vías y medios de Comunicación

Como en toda exploración, los medios de comunicación y de acceso revisten una importancia capital, y a este respecto se enuncia que la zona cuenta con una carretera estatal que pasa por la cabecera del municipio y la comunica con Ixcaquixtla, Coyotepec y Toltepec de Guerrero hacia al Sur, y con Molcaxac, Huitziltepec, Santo Tomás Hueyotlipan, Mixtla y Cuapiaxtla, en ese último punto entronca con la carretera estatal número 39, de la cabecera parte una carretera secundaria que llega hasta Santa Inés Ahuatempan.

Varias carreteras secundarias y de terracería comunican a los poblados del municipio entre sí y con su cabecera, además existe un amplio sistema de brechas, las cuales son intransitables a bordo de vehículos, pero accesibles a pie, lo cual redundo en beneficio de la exploración de esta zona con gravimetría, ya que si bien se trata de recorridos arduos, posibilita el realizar mediciones gravimétricas en una extensión muy a propósito del objetivo de dicha exploración, es decir, se puede medir casi a voluntad en cualquier sitio, siendo pocos los impracticables con medios convencionales.

En la zona se cuenta con servicio telefónico, de correo y de telégrafo, aunque a la fecha no hay recepción de telefonía celular.

II.2. Geología Regional

En cuanto a las generalidades geológicas de Tepexi de Rodríguez, se puede mencionar que la secuencia estratigráfica comprende rocas que varían en edad del Paleozoico al Cuaternario. (Figura II.2.1).

ESTADO DE PUEBLA						
ERA	PERIODO	EPOCA	UNIDAD EN MAPA	LITOSTRATIGRAFIA	LITOLOGIA	
CENozoico	CUATERNARIO	HOLOCENO		Conglomerados, arenas, arcillas, sedimentos lacustres, depósitos de talud y aluvión, así como calizas lacustres, travertino, arcillas lacustres. Formaciones Agua de Luna y Pie de vaca.		
		PLEISTOCENO	Qal			
	Terciario	PLIOCENO		Tc	Conglomerado, caliza, arcilla, yeso, limolita, depósitos pseudo-estratificados de tobas. Fm. Tehuacán, Fm. Huajuapam, sedimentos Tlaxcala	
				Ige	Basalto, tobas líficas, andesita, dacita y depósitos piroclásticos	
		MIOCENO		Tm	Lutitas, margas y areniscas interestratificadas. Fm. Velasco, Fm. Guayabal, Fm. Chapopote. Fm. Tantoyuca	
		OLIGOCENO		To	Lutita, arenisca, caliza coralina y conglomerado. Fm. Mésón, Fm. Alazán, Fm. Coatzintla, Fm. Palma Real, Fm. La Laja	
	EOCENO		Te	Marga arenosa, arenisca, conglomerado y marga con caliza. Fm. Chicontepec Superior y Lutitas Nanchital		
	PALEOCENO		Tpal	Lutita, marga arenosa con arenisca compacta. Fm. Chicontepec Inferior y Chicontepec Medio		
MESozoico	CRETACICO	SUPERIOR		Ks	Caliza arcillosa, marga y lutita calcárea. Fm. Méndez, Fm. San Felipe, Fm. Agua Nueva, Fm. Caliza Maltrata, Fm. Atoyac, Fm. Soyatal, Fm. Mexcala y Fm. Cuautla	
		INFERIOR		Ki	Caliza con bandas de pedernal, caliza micrítica, caliza cástica. Fm. Morelos, Fm. Tamaulipas Inferior, Fm. Orizaba, Fm. Capolucán, Caliza Sierra Madre, Fm. Xonamanco y Fm. Zapotitlán	
	JURASICO	SUPERIOR		Js	Caliza y lutita, calcarenita oolítica, lutita pizarrosa y lutita bentonítica. Fm. Pimienta, Fm. Tamán, Fm. San Andrés, Fm. Tepexi, Fm. Tenexcate, Fm. Chinameca, Fm. Mapache, Fm. Santiago, Fm. San Pedro	
		MEDIO		Jm	Limolita, arenisca y conglomerado. Fm. Cahuasas, Gpo. Tecocoyunca y Fm. Tenexcate, ocasionalmente presenta rocas volcánicas andesíticas	
		INFERIOR		Ji	Lutita, limonita bandeada, arenisca y lutita bituminosa. Fm. Huayacocotla, Fm. Rosario, Fm. Tecomazúchil	
TRIASICO	SUPERIOR		Ti-s	Arenisca compacta, arenisca cuarcítica, conglomerado, arcilla y lechos rojos. Fm. Huizachal		
	INFERIOR			No aflora.		
PALEozoico	PERMICO		Pzs	Secuencia tipo flysch de lutita y arenisca en estratos delgados con pliegues en chevrón. Fm. Guacamaya, Fm. Malzilzi		
	CARBONIFERO			No aflora.		
	DEVONICO					
	SILURICO		Pz-met	Rocas metamórficas de bajo grado caracterizadas por metasedimentos, así como migmatita, gneis, esquisto, filita, pizarra, y rocas metaígneas, tales como roca verde y milonita. Complejo Acatlán		
	ORDOVICICO					
	CAMBRICO			No aflora.		
PRECAMBRICO			Pe	Ortogneis, anortosita, rocas metamórficas de la facies de granulita, troncos intrusivos y diques de composición ácida. Complejo Oaxaqueño.		

Fig. II.2.1. Columna geológica generalizada del Estado de Puebla.³

³ (Tomada de la Monografía Minera del Estado de Puebla)

La roca más antigua que aflora en los alrededores de Tepexi de Rodríguez consiste en esquisto perteneciente al Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978) de edad paleozoica temprana, sobre los que descansa discordantemente un paquete de calizas pertenecientes a la Formación Orizaba del Cretácico inferior. Sobre las rocas cretácicas, se tiene un paquete de conglomerados y areniscas pertenecientes al Grupo Balsas de edad Terciaria (Figura II.2.2), el cual se encuentra cubierto discordantemente por una serie de calizas travertinosas, calizas lacustres, arcillas y conglomerados del Plioceno correspondientes a las Formaciones denominadas informalmente Agua de Luna y Pie de Vaca, las cuales afloran localmente en el área de Tepexi de Rodríguez. Estas Formaciones se encuentran cubiertas por suelos y material aluvial del Cuaternario. La zona está cubierta por rocas calizas, que sólo en algunas secciones interactúan con esquistos provenientes de la Formación Acatlán, núcleo de la paleopenínsula de Oaxaca. (Pantoja- Alor, 1992).

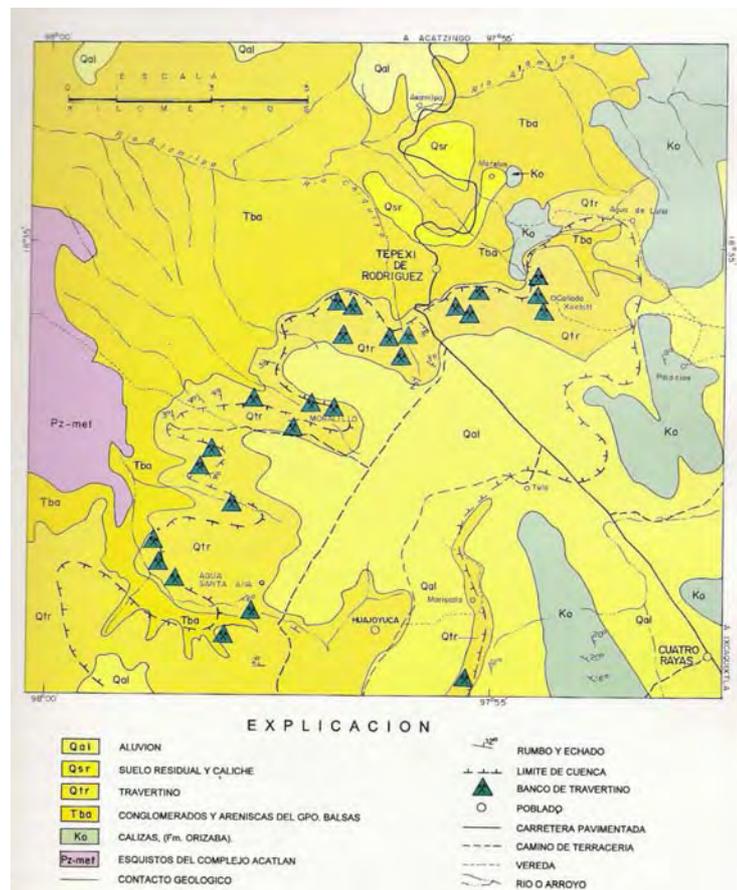


Fig. II.2.2. Mapa geológico de la zona de Tepexi de Rodríguez.⁴

⁴ (Tomada de la Monografía Minera del Edo. de Puebla)

II.3. Cantera Tlayúa

Cantera Tlayúa; palabra náhuatl que significa “lugar de oscuridad” ó “del crepúsculo”. Propiedad de la Familia Aranguty es una localidad investigada desde 1959 por la abundancia, variedad y conservación de su paleobiota, representa el primer “*Konservat Fossil-Lagerstätten*” en México y probablemente uno de los más importantes de América del Norte.

Ubicación

Localizada aproximadamente a 60 kilómetros al Sur de la Ciudad de Puebla, la Cantera Tlayúa esta ubicada a 2 km. al SE de la Colonia Morelos inmediatamente al Norte del Pueblo de Tepexi de Rodríguez (Figura II.3.1), sus coordenadas geográficas son: 97°54'W y 18°53'N. (Pantoja- Alor, 1992).

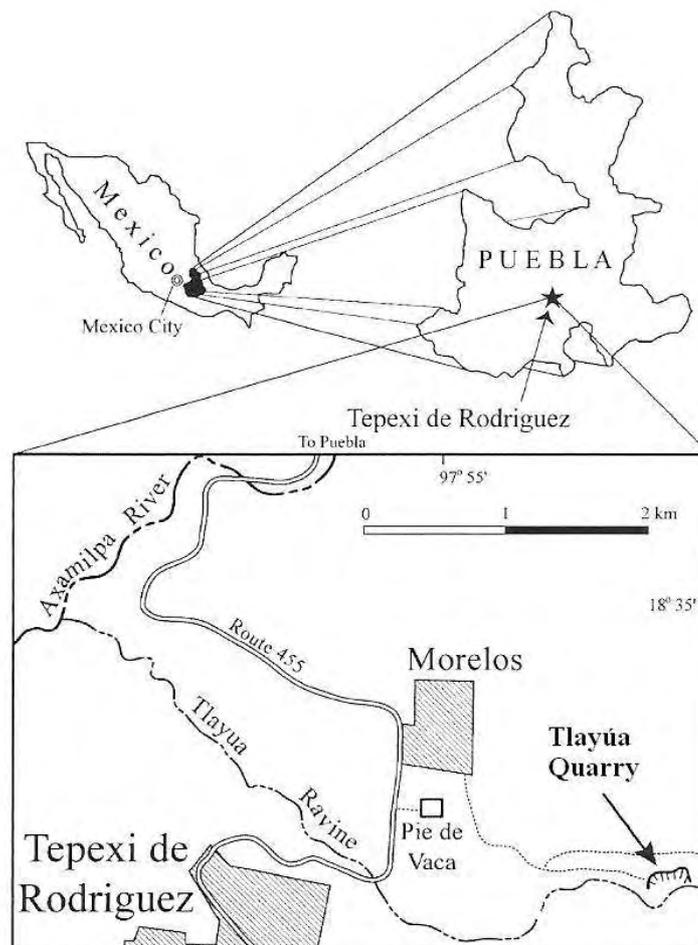


Figura II.3.1. Localización de la Cantera Tlayúa.⁵

⁵(Kashiyama, et al., 2004)

II.4. Geología de la Cantera Tlayúa

El nombre de Formación Tlayúa es propuesto para la caliza albiana que aflora en la Cantera y a lo largo de la Barranca Tlayúa, que comprende un área no mayor a 1.5 hectáreas con una antigüedad de 105 a 115 millones de años, perteneciente al periodo Cretácico. (Pantoja-Alor, 1992).

La Formación Tlayúa comprende una secuencia incompleta de aproximadamente 300 metros de espesor dividida en tres miembros:

-**Miembro inferior**; Es una secuencia de caliza micrítica tipo mudstone o wakestone con algunos lentes de pedernal oscuro. (Figura II.4.1).

-**Miembro medio**; Está conformado por una secuencia de caliza micrítica tipo mudstone de 48 a 50 metros de espesor, de estratificación delgada, laminada y de color crema con tonalidades rojizas. (Figura II.4.1).

-**Miembro superior**; Consiste en una secuencia incompleta de capas medianas a gruesas de dolomía y caliza dolomítica de color gris con tonalidades claras y oscuras, de acuerdo a la clasificación de Pantoja – Alor (1992). (Figura II.4.1).

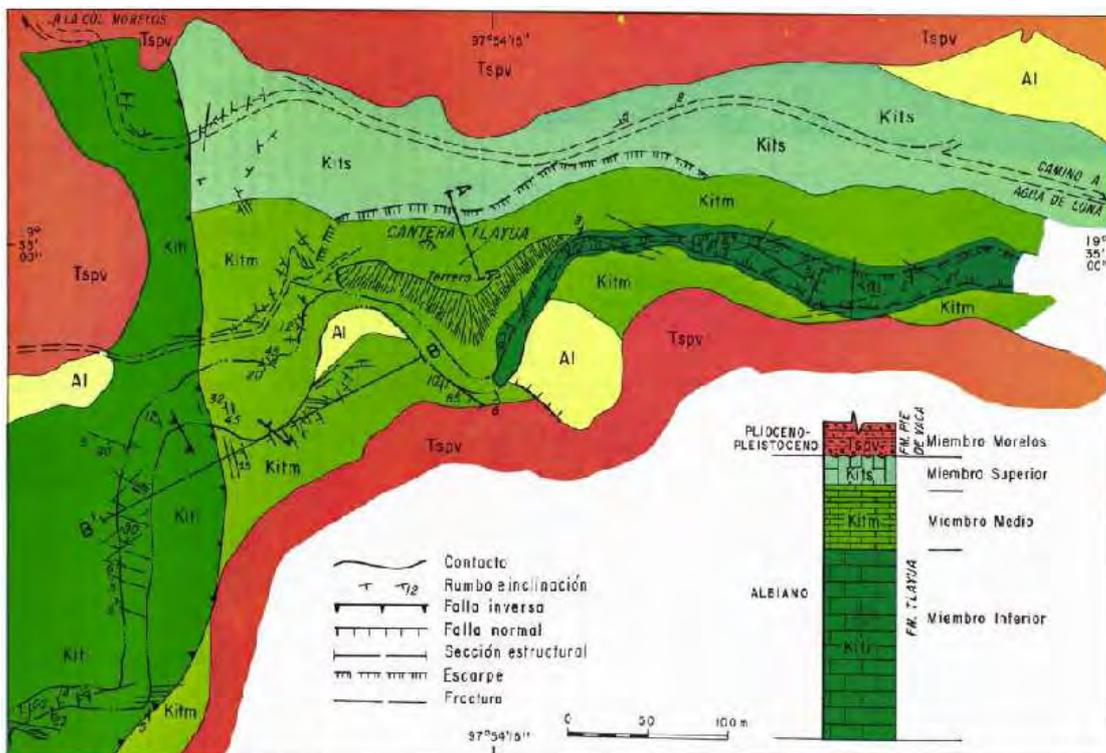


Figura II.4.1. Diagrama con las características geológicas de los alrededores de la Cantera Tlayúa.⁶

⁶ (Pantoja-Alor, 1992)

En la figura (II.4.2) se observa el aspecto general de la zona de Tlayúa. En la figura (II.4.3) se muestra la separación de la roca en lajas, debido a la meteorización reciente, y se aprecian las múltiples laminaciones de la roca.



Figura II.4.2. Aspecto general de la zona de Tlayúa.⁷

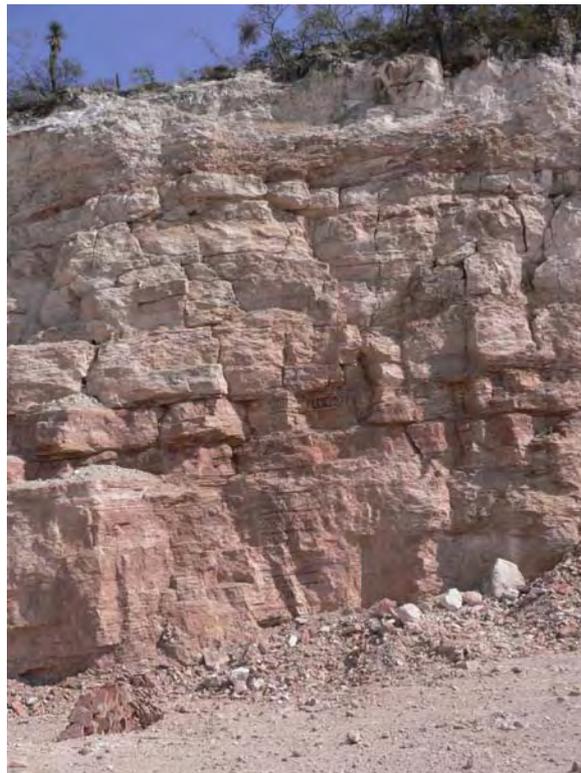


Figura II.4.3. Lajeamiento de la roca en la Cantera Tlayúa.⁸

⁷ (Dra. Ligia Pérez Cruz)

⁸ (Dra. Ligia Pérez Cruz)

II.5. Importancia Paleontológica

En una visión geológica de mayor escala, se tiene que la región se sitúa en la zona limítrofe entre la paleopenínsula de Oaxaca y el ambiente marino o lacustre, de lo cual hay múltiples evidencias en las inmediaciones de la zona, entre las cuales destaca la profusa y diversa variedad de fósiles preservados en un estado excepcional, entre ellos destacan: estrella de mar fósil (*Fig. II.5.1*), tortuga fósil (*Fig. II.5.2*), pez picnodonte (*Fig. II.5.3*) y *Teoichtys kallistos* (*Fig. II.5.4*).



*Figura II.5.1. Estrella de mar fósil.*⁹



*Figura II.5.2. Tortuga fósil.*¹⁰



*Figura II.5.3. Pez Picnodonte.*¹¹



*Figura II.5.4. Teoichtys kallistos.*¹²

Esta zona con cualidades únicas, tiene uno de los acervos fosilíferos más notorios a nivel mundial, cuyos fósiles han sido comparados con los de la localidad de Solnhofen en Baviera, Alemania.

⁹ (Instituto de Geología)

¹⁰ (Instituto de Geología)

¹¹ (<http://biblioweb.dgsca.unam.mx/>)

¹² (<http://biblioweb.dgsca.unam.mx/>)

CAPITULO III

Marco Teórico

III.1. El método gravimétrico

El método de prospección gravimétrica se basa en la medición en superficie de las pequeñas variaciones o anomalías de la componente vertical y de los gradientes horizontal y vertical del campo de gravedad terrestre. Estas variaciones son debidas a una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades y conociendo aquéllas 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. (Cantos, 1974).

III.2 Principio de Gravedad

Ley de Gravitación de Newton

La fuerza de gravitación es expresada por la ley de Newton: La fuerza entre dos partículas de masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los centros de masas:

$$F = \gamma \times \left[\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \right] r_1 \quad 3.2.1$$

Donde:

F = Fuerza sobre m_2

r_1 = vector unitario dirigido de m_2 hacia m_1

r = distancia entre los centros de los cuerpos de masa m_1 y m_2

m_1, m_2 = masa del cuerpo 1 ó 2 respectivamente,

γ = Constante de Gravitación Universal

La fuerza F es siempre atractiva, en el SI de unidades el valor de γ es $6,672 \times 10^{-11} \left[\frac{Nm^2}{kg^2} \right]$, y en unidades CGS $6,672 \times 10^{-8} \left[\frac{dinacm^2}{g^2} \right]$

Aceleración de la gravedad

La aceleración de m_2 debido a la presencia de m_1 puede ser encontrado dividiendo F por m_2 en la ecuación (3.2.1), esto es:

$$g = \left(\frac{\gamma m_1}{r^2} \right) r_1 \quad 3.2.2a$$

La aceleración g es igual a la fuerza gravitacional por unidad de masa debido a m_1 . Si m_1 es la masa de la Tierra, M_e , g se convierte en la *aceleración de gravedad* y esta dada por:

$$g = \left(\frac{\gamma M_e}{R_e^2} \right) r_1 \quad 3.2.2b$$

Siendo R_e el radio de la Tierra y r_1 descendiendo hacia el centro de la Tierra. (Es usual usar el mismo símbolo g si es debido a la Tierra o a una masa m).

La aceleración de gravedad fue primero medida por Galileo en su famoso experimento en Pisa. El valor numérico de g sobre la superficie de la Tierra es alrededor de $980 \left(\frac{cm}{s^2} \right)$. En honor de Galileo la unidad de aceleración de gravedad, $1 \left(\frac{cm}{s^2} \right)$ es llamada el galileo ó Gal. (Telford, 1990.)

Gravedad Teórica

La gravedad normal g_0 ó dicho de otra forma, el campo gravitacional normal de la Tierra se refiere a la atracción de la gravedad producida por el elipsoide de revolución, y se calcula con la fórmula siguiente llamada Formula Internacional de la Gravedad:

$$g_o = 9.78049[1 + 0.0052884\text{sen}^2 \lambda - 0.0000059\text{sen}^2 (2\lambda)] , \quad 3.2.3$$

Donde:

g_0 Está en $m \cdot s^{-2}$

λ = latitud

La formula fue adoptada por la Unión Internacional de Geodesía y Geofísica en 1930. En 1967 un nuevo elipsoide fue adoptado, llamado Sistema de Referencia Geodésico 1967, proporcionando así la Formula Internacional de Gravedad 1967,

$$g_o = 9.78031846(1 + 0.0053024\text{sen}^2 \lambda - 0.0000058\text{sen}^2 (2\lambda)) . \quad 3.2.4$$

Recientemente la Asociación Internacional de Geodesia ha adoptado el sistema de referencia geodésico 1980, el cual eventualmente ha sido guiado hacía el campo de referencia actual, Sistema Geodésico Mundial 1984; En conclusión, la formula esta dada por:

$$g_o = 9.7803267714 \frac{1 + 0.00193185138639\text{sen}^2 \lambda}{\sqrt{1 - 0.00669437999013\text{sen}^2 \lambda}} . \quad 3.2.5$$

La cantidad g_0 expresada por la ecuación (3.2.5) ó sus antecesoras son comúnmente referidas como gravedad teórica ó gravedad normal.(Blakely, 1994).

Esta formula, llamada formula internacional de gravedad se basa en un valor absoluto de

$$g = 981,274 \left[\frac{cm}{s^2} \right] (Gal) \quad 3.2.6$$

III.3. El Geoide

El elipsoide de referencia es la superficie equipotencial de una Tierra uniforme, el geoide es la superficie equipotencial actual llevada a nivel del mar. Las diferencias de altura entre esas dos superficies raramente exceden 100 m. y generalmente cae debajo de 50 m.

La forma del geoide es dominada por amplias ondulaciones con dimensiones laterales de escala continental pero con correlaciones no obvias con los continentes. Ellas aparentemente son causadas por extensos movimientos de convección en el manto. Comparada con esas amplias ondulaciones la respuesta del geoide sobre la topografía y las variaciones de densidad dentro de la litosfera son efectos de segundo orden, ambos bajos en amplitud y cortos en longitud de onda (Blakely, 1994).

Una ondulación de geoide positivo indica un exceso de masa, una ondulación de geoide negativo implica un déficit de masa.

El geoide es un modelo físico que busca representar la verdadera forma de la Tierra calculándola como una superficie del campo de gravedad con potencial constante y es utilizada como referencia para determinar la elevación del terreno. (Fig. III.3.1).

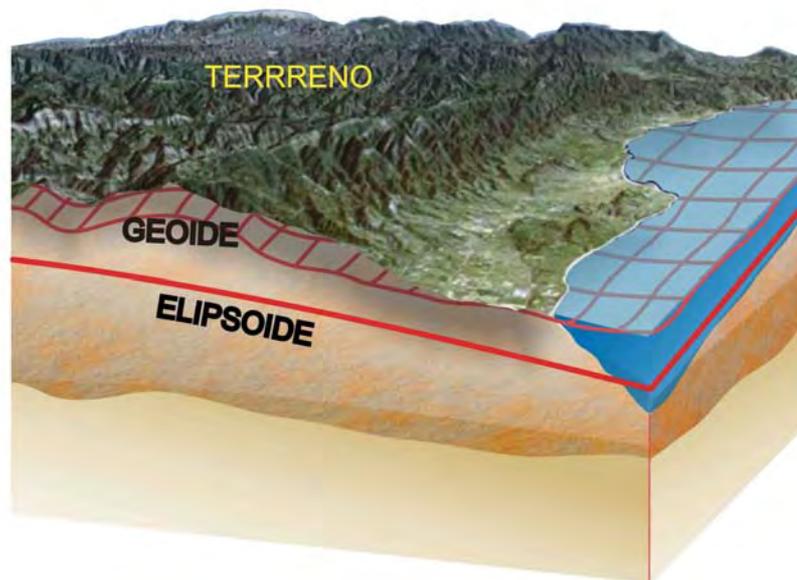


Figura III.3.1. El Geoide.¹

¹ (<http://mapserver.inegi.gob.mx/>)

La utilidad principal del geode es establecer la superficie de referencia de la altura ortométrica, conocida también como altura sobre el nivel medio del mar. Combinando información de un modelo de alturas geoidales con alturas geodésicas obtenidas mediante técnicas de posicionamiento satelital es posible obtener alturas ortométricas de cualquier punto sobre el terreno. La manera de transformar el valor de altura geodésica (h) que proporciona un receptor GPS en un valor de altura ortométrica (H), es mediante la resta del valor de altura geoidal (N) dada por un modelo digital de elevación geoidal. La Ecuación (3.3.1) muestra la relación entre estas tres alturas.

$$H = h - N, \quad 3.3.1.$$

Con el siguiente esquema se muestra la relación entre estas tres superficies y los tres tipos de altitudes de un punto sobre la Tierra. (Fig. III.3.2).



Figura III.3.2. Altitudes de un punto sobre la Tierra.²

III.4. Anomalías de Gravedad

Los valores de gravedad son generalmente influenciados por varios factores como la altitud y las variaciones de densidad en el subsuelo, la exploración gravimétrica es concerniente con anomalías debido a estos factores, de manera que se pueden hacer correcciones para reducir los valores de las lecturas de gravedad a datos de superficie equipotencial como el geode (ó una superficie paralela a él en todas partes). (Blakely, 1994).

² (<http://mapserver.inegi.gob.mx/>)

III.5. Correcciones gravimétricas

Corrección de Aire Libre

Las mediciones de la gravedad pueden ser comparadas directamente con el campo de referencia g_0 porque el geoide corresponde al nivel del mar, las mediciones de gravedad sobre la Tierra, sin embargo, pueden ser ajustadas por elevación sobre o debajo del nivel del mar, g_r representa la atracción de la gravedad sobre el geoide. (Blakely, 1994).

El valor de la gravedad a una distancia pequeña h sobre el geoide está dada por una serie de expansión de Taylor.

$$g(r+h) = g(r) + h \frac{\partial}{\partial r} g(r) + \dots$$

En términos de orden mayor y reacomodando el término restante tenemos:

$$g(r) = g(r+h) - h \frac{\partial}{\partial r} g(r).$$

Si asumimos que la Tierra es uniforme y esférica, entonces:

$$g(r) = -\gamma M / r^2$$

Y la ecuación anterior se convierte en:

$$g(r) = g(r+h) - \frac{2g(r)}{r} h.$$

El término anterior de esta ecuación es considerado para la diferencia en elevación entre $g(r)$ y $g(r+h)$. Esto es conocido como la *corrección de aire libre* g_{fa} porque es el único ajuste de elevación requerido si no hay masas existentes entre el punto de observación y el nivel del mar. Usando valores de g y r a nivel del mar proporciona:

$$g_{fa} = -0.3086 \times 10^{-5} h \quad , \quad 3.5.1$$

Donde h es la altura sobre el nivel del mar. La ecuación (3.5.1) es la misma para ambas en el SI de unidades (g_{fa} en $m \cdot \text{seg}^{-2}$, h en m) y

en unidades CGS (g_{fa} en *Gal*, h en *cm*), porque g_{fa}/h tiene unidades de seg^{-2} .

Corrección de Bouguer

La corrección de aire libre y la gravedad teórica ignoran masas que pueden existir entre el nivel de observación y el nivel del mar. La corrección de Bouguer es considerada para esta masa adicional, la corrección simple de Bouguer aproxima todas las masas sobre el nivel del mar con una losa homogénea, extendida infinitamente de igual espesor para la altura del punto de observación sobre el nivel del mar. (Blakely, 1994). La atracción de una losa infinita es descrita por la ecuación:

$$g_{sb} = 2\pi\gamma\rho h,$$

Donde h es el espesor de la losa. Usando una densidad de corteza típica de $2670kg \cdot m^{-3}$, la corrección simple de Bouguer se convierte en:

$$g_{sb} = 0.1119 \times 10^{-5} h, \quad 3.5.2$$

Para ambas en el SI de unidades (g_{sb} en $m \cdot seg^{-2}$, h en m) y en unidades CGS (g_{sb} en *Gal*, h en *cm*), donde h es la altura sobre el nivel del mar. (Blakely, 1994).

Entonces, la *Anomalía Simple de Bouguer* esta dada por:

$$\Delta g_{sb} = g_{obs} - g_{fa} - g_{sb} - g_0 \cdot \quad 3.5.3$$

Donde:

- g_{obs} = Gravedad observada
- g_{fa} = Corrección de Aire Libre
- g_{sb} = Corrección de Bouguer
- g_0 = Gravedad teórica.

CAPITULO IV

Metodología

IV.1. Parámetros de la exploración gravimétrica

El método gravimétrico se basa en mediciones de los campos de potencial natural. El campo de potencial natural observado se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que construyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método gravimétrico que comprenden la corteza y el manto superior, midiendo las variaciones laterales de la atracción gravitatoria.

La corteza terrestre esta formada por capas de diversos materiales con propiedades físicas y características que varían según los componentes del material que constituye las rocas en la corteza.

Una de las características más importantes de las rocas es su densidad, mientras más densa, mayor es su masa en cierto volumen, es decir; proporciona una atracción gravitatoria mayor que una roca de menor densidad, ocupando un mismo espacio o volumen. Las diferencias subterráneas de densidad son registradas como diferencias en la aceleración de gravedad.

Por medio del método gravimétrico se pueden estudiar las rocas que hay en el subsuelo, permitiendo detectar contrastes de densidad existentes en la corteza terrestre debido a los distintos tipos de rocas que la constituyen. La mayoría de las rocas sedimentarias por ejemplo es menos densa en comparación a las rocas que forman el basamento. En consecuencia, con el método gravimétrico se puede delinear la interfase o el límite entre las rocas sedimentarias y las rocas del basamento subyacentes o las dimensiones de cuencas sedimentarias.

Con los datos obtenidos se elabora un “mapa” del subsuelo que permitirá observar las características del área de estudio.

IV.2. Instrumentos gravimétricos

Generalmente se distinguen dos métodos fundamentales: La determinación del valor absoluto de gravedad en un cierto lugar (mediciones absolutas) y la determinación de la diferencia en la magnitud de gravedad entre dos lugares diferentes (mediciones relativas).

Los aparatos para mediciones absolutas son el péndulo, el aparato de caída o bien de lanzamiento libre y los instrumentos para mediciones relativas son los "gravímetros".

Los gravímetros nos permiten determinar la componente vertical de la aceleración de la gravedad (g_z) en un cierto lugar.

Se distinguen dos tipos de gravímetros:

1. Gravímetros estables
2. Gravímetros inestables

1. Gravímetros Estables

Los gravímetros estables poseen un solo elemento para equilibrar la fuerza gravitatoria con otra fuerza mensurable a través de un desplazamiento de tipo lineal, angular o eléctrico y que se puede amplificar y medir directamente. Para un resorte sencillo por ejemplo el desplazamiento se refiere a una variación en su longitud.

2. Gravímetros Inestables

En los gravímetros inestables la fuerza gravitatoria está mantenida en un equilibrio inestable con una fuerza restauradora. La inestabilidad se debe a una tercera fuerza la cual intensifica el efecto de cualquier variación en la gravedad con respecto al valor correspondiente a su equilibrio. Para variaciones pequeñas la tercera fuerza generada por una variación con respecto al equilibrio es proporcional a la magnitud de la variación y actúa en la misma dirección.

Gravímetro La Coste-Romberg

El gravímetro LaCoste-Romberg fue el primero en emplear un resorte de longitud cero, un resorte de longitud cero es aquel en el cual la tensión es proporcional a la longitud actual del resorte, esto es, si todas las fuerzas externas fueran removidas el resorte podría colapsar a longitud cero. La ventaja del resorte de longitud cero es que si este soporta el brazo y la masa M (Fig. IV.2.1.) en la posición horizontal, esto podría soportarlo en esa posición. (Telford, 1990)

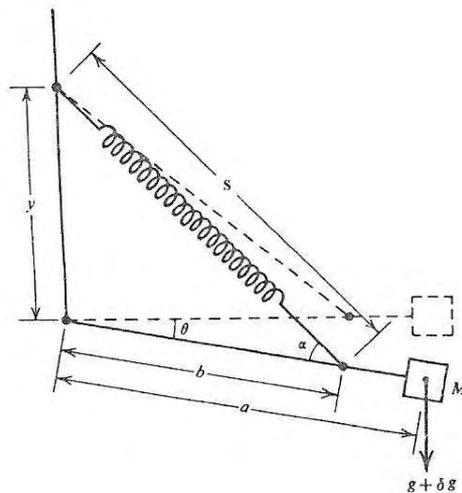


Figura IV.2.1. Gravímetro LaCoste-Romberg.¹

En la ecuación (4.2.1) el $\cos \theta$ se anula completamente y $g = K(1 - c/s)$, el cual siempre tiene solución pues g es finito. Los resortes de longitud cero son construidos con una tensión inicial así que en principio la fuerza es requerida antes de comenzar la extensión del resorte.

Para derivar la expresión para la sensibilidad del gravímetro LaCoste-Romberg se escribe $k[(s - c)]$, para la tensión en el resorte cuando esta longitud es s , así c es una pequeña corrección para el factor ya que el resorte no es exactamente de longitud cero y k es la constante del resorte. Tomando momentos alrededor del pivote en la figura (IV.2.1) se obtiene:

$$\begin{aligned} Mga \cos \theta &= k(s - c)bsen\alpha \\ &= k(s - c)b(y \cos \theta) / s \end{aligned} \quad 4.2.1$$

¹ (Telford, 1990)

Usando la ley de senos, entonces;

$$g = \left(\frac{k}{M}\right)\left(\frac{b}{a}\right)\left(1 - \frac{c}{s}\right)y$$

Cuando g incrementa por ∂g la longitud del resorte incrementa por ∂s donde;

$$\partial g = \left(\frac{k}{M}\right)\left(\frac{b}{a}\right)\left(\frac{c}{s}\right)\left(\frac{y}{s}\right)\partial s \quad 4.2.2$$

Para un cambio dado en la gravedad ∂g podemos hacer ∂s tan grande como se desee por la disminución de uno o varios factores sobre el lado del brazo derecho; además, el más cercano al resorte es el resorte de longitud cero, el más pequeño es c y el más grande se convierte en ∂s .

En operación este es un instrumento nulo, siendo usado un segundo resorte, el cual puede ser ajustado para restaurar el brazo hacia la posición horizontal (*Figura IV.2.2*). La sensibilidad de los gravímetros usados en la superficie de exploración es generalmente 0.01 mGal. El instrumento requiere una temperatura ambiente constante, usualmente realizada manteniéndolo a una temperatura constante más alta que el ambiente. (Telford, 1990).

Gravímetro LaCoste-Romberg Modelo G:

Rango = 200 mgal

Precisión = 0.01 mgal

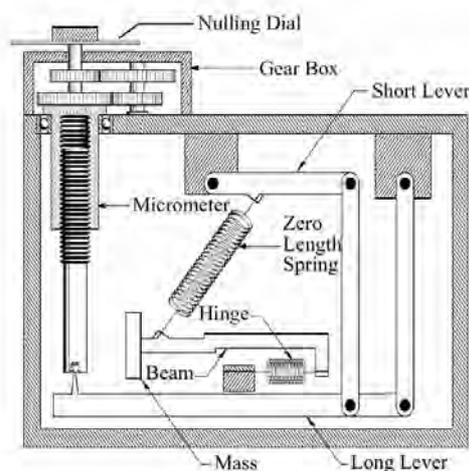


Figura IV.2.2. Partes del Gravímetro LaCoste-Romberg.²

² (Instruction Manual Model G & D gravity meters, 2004)

CAPITULO V

Desarrollo de la exploración

Para esta exploración se utilizó el método potencial gravimétrico que permite localizar contrastes de densidades en secuencias sedimentarias, lo cual es adecuado para delimitar bordes de cuencas así como la posible ocurrencia de otro tipo de estructuras.

V.1. Adquisición de datos

Para adquirir los datos se utilizó un Gravímetro LaCoste-Romberg Modelo G, del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional, con una constante de 2.9.

Durante todo el levantamiento la temperatura interna de operación del gravímetro se mantuvo constante a 55° C.

Para obtener la ubicación geográfica se utilizó un aparato receptor G.P.S. marca Garmin Etrex Legend, empleando el elipsoide de referencia WGS 84.

La presente exploración gravimétrica fue realizada en una zona sustancialmente mayor a las inmediaciones del poblado de Tepexi de Rodríguez a fin de lograr una mejor caracterización de la zona mediante el perfilaje gravimétrico.

V.2. Localización de las estaciones

En la figura (V.2.1) se muestra la localización de las estaciones para los perfiles medidos en la zona de Tepexi de Rodríguez. Los símbolos indican los diferentes rangos de altura (en metros sobre el nivel del mar). A pesar de las dificultades de acceso en algunas partes de la zona de estudio, se trato de tener una cobertura espacial lo más completa posible para poder investigar las características y geometría de la cuenca sedimentaria.

Estaciones Gravimétricas

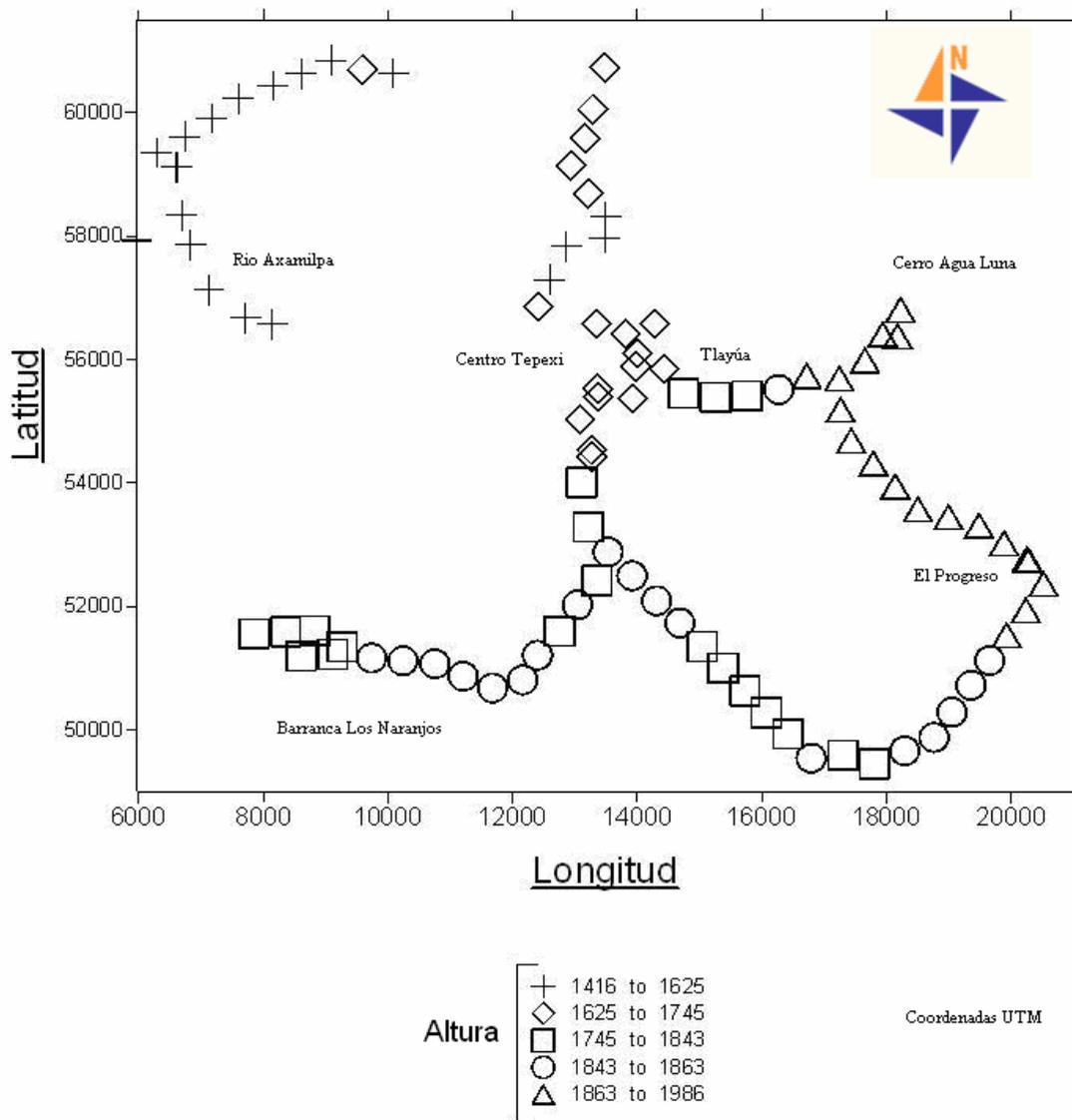


Figura V.2.1. Localización de las estaciones gravimétricas.

Estaciones sobre las curvas de nivel

Los perfiles observados cruzan gran parte de las estructuras superficiales representadas en la topografía (Fig. V.2.2).

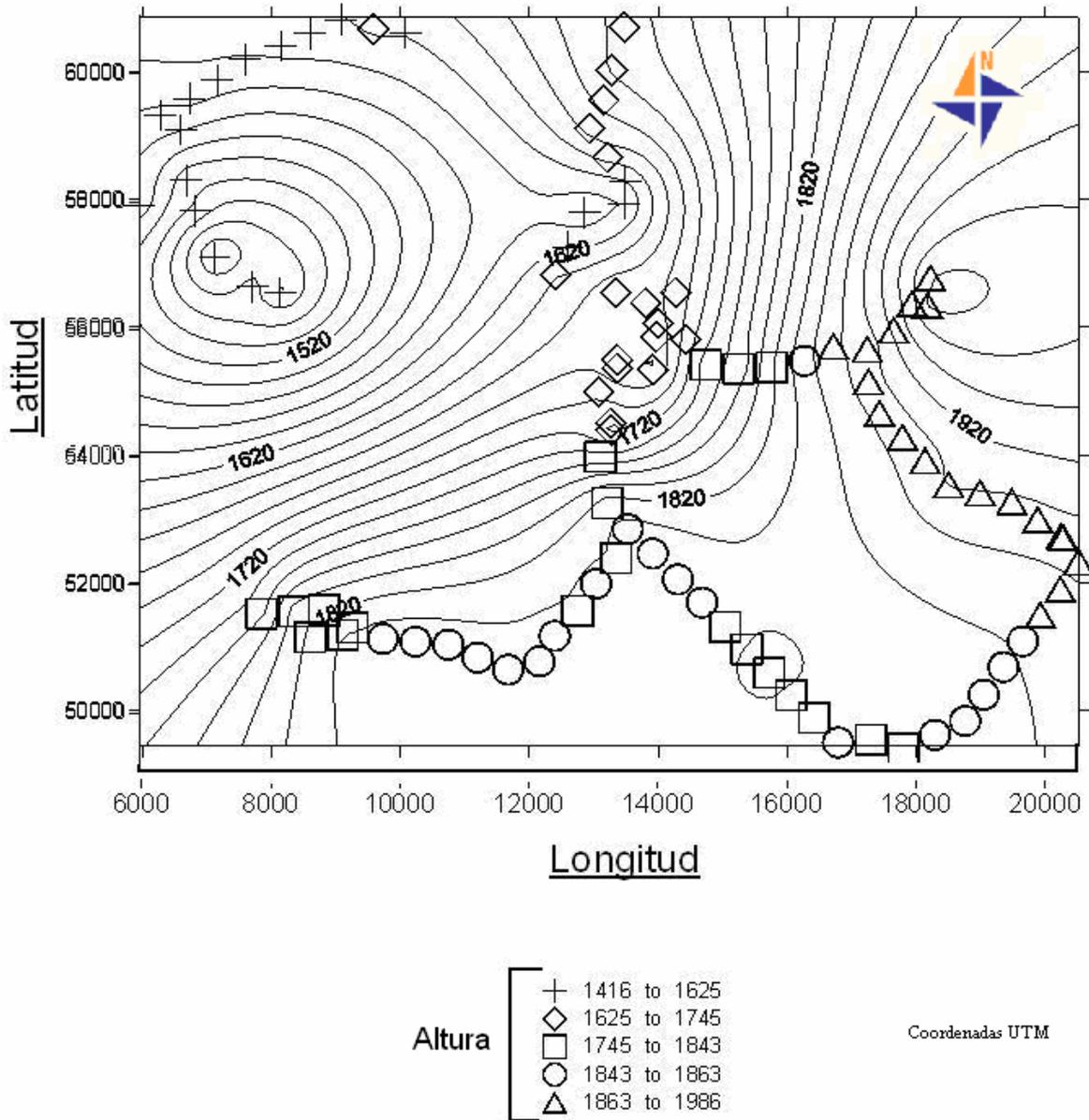


Figura V.2.2. Localización de estaciones gravimétricas en referencia a las curvas de nivel.

V.3. Topografía de la zona

En la figura (V.3.1) se presenta una versión del mapa topográfico que permite visualizar un alto relieve en la zona Este, en la zona central se aprecian algunos rasgos topográficos (valles y crestas), en la zona W se observa una depresión de la superficie terrestre y en la zona Sur se aprecia un relieve más atenuado que el de la zona Este pero de dimensiones mayores.

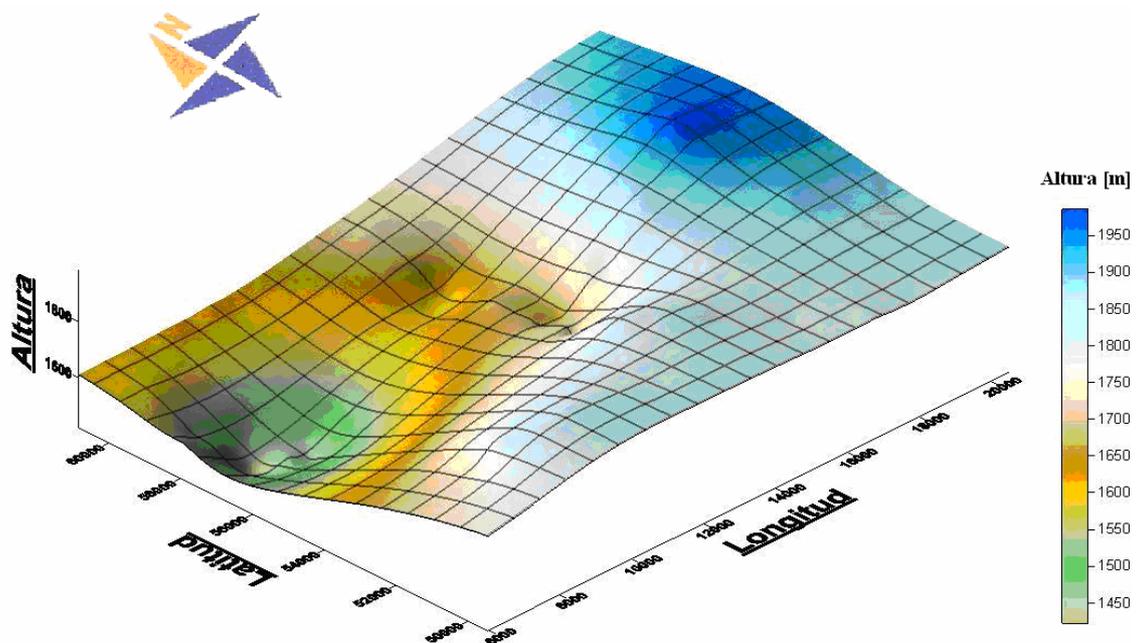


Figura V.3.1. Representación tridimensional de la topografía de la zona de estudio.

Valles y Crestas

En la figura (V.3.2) se observa a mayor detalle los rasgos topográficos de la zona de estudio, como son valles y crestas.

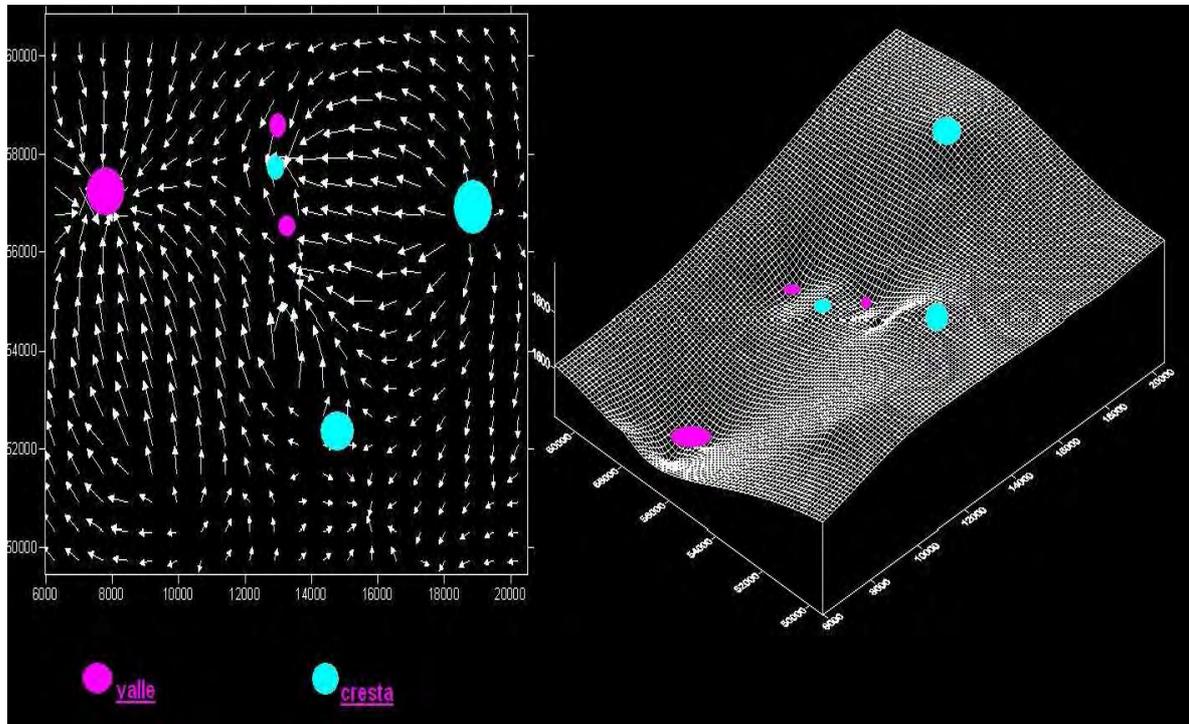


Figura V.3.2. Ilustración esquemática de los rasgos mayores en la topografía de la zona de estudio.

V.4. Valores de Anomalía de Bouguer

Los modelos geofísicos de la zona de Tepexi de Rodríguez se construyeron a partir de los valores de Anomalía de Bouguer.

Los valores de Anomalía de Bouguer en la zona varían entre -160 mGal a -225 mGal, como se muestra en la figura (V.4.1). Los valores de Anomalía de Bouguer son negativos y más altos en la Faja volcánica trans-mexicana, reflejando una corteza de mayor espesor (Urrutia y Flores, 1996).

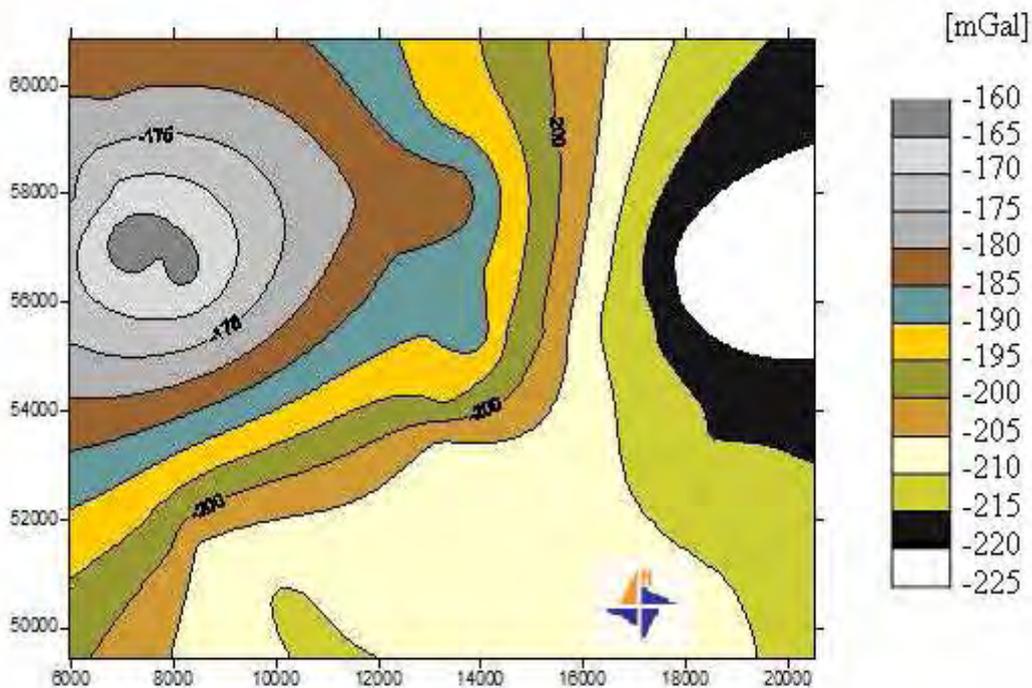


Figura V.4.1. Anomalía de Bouguer en relación a las curvas de nivel de la zona de estudio.

Representación Tridimensional de la Anomalía de Bouguer

En la zona NE del grafico de Anomalía de Bouguer (*Figura V.4.2*) se tienen los valores más altos de la anomalía sugiriendo la estructura de una cuenca.

En la zona Sur del mismo grafico se aprecia la ocurrencia de otra estructura de cuenca de dimensiones mayores a la anteriormente citada.

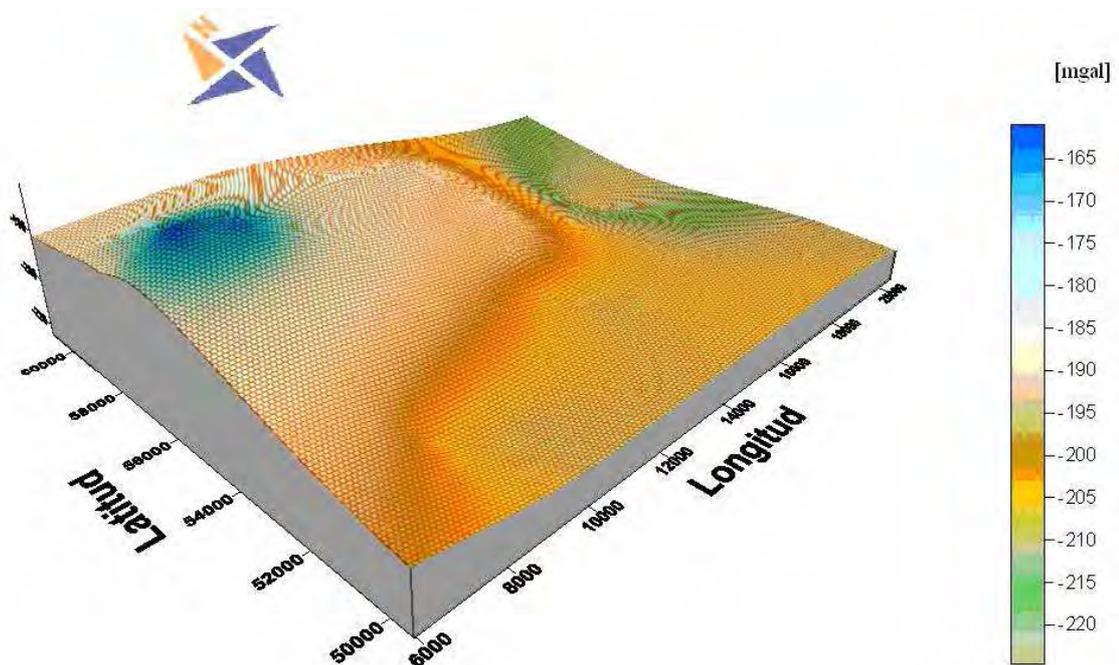


Figura V.4.2. Representación Tridimensional de la Anomalía de Bouguer.

Dispersión de la Anomalía de Bouguer

En la grafica de la figura (V.4.3) se puede observar el rango de valores de Anomalía de Bouguer alrededor de -200 [mgal] ordenados en forma ascendente. En la figura (V.4.4) se tienen los valores de la anomalía de Bouguer en el orden original de las estaciones.

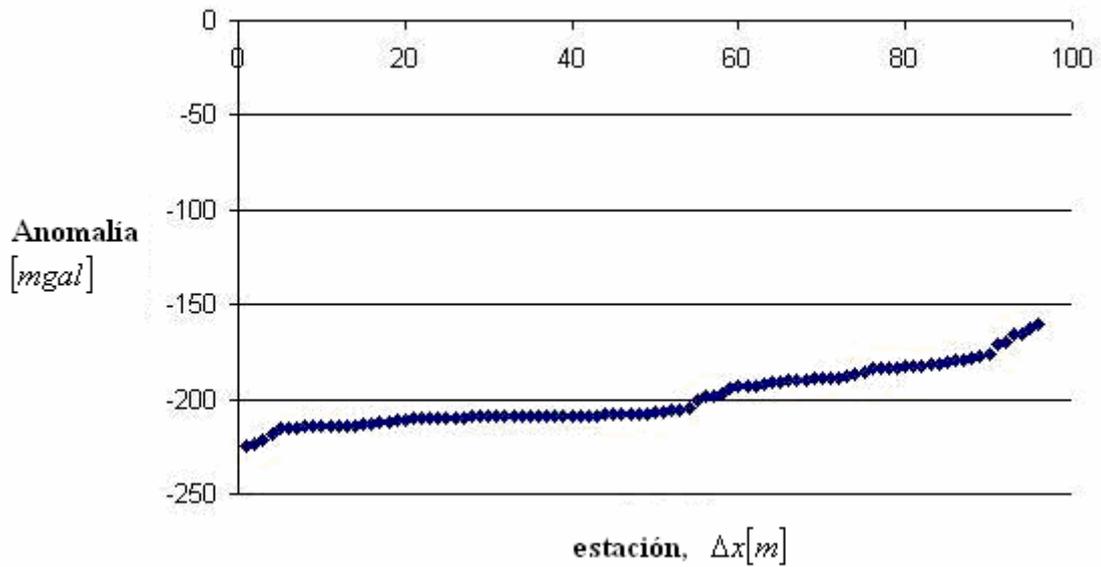


Figura V.4.3. Valores de la Anomalía de Bouguer ordenados en forma ascendente.

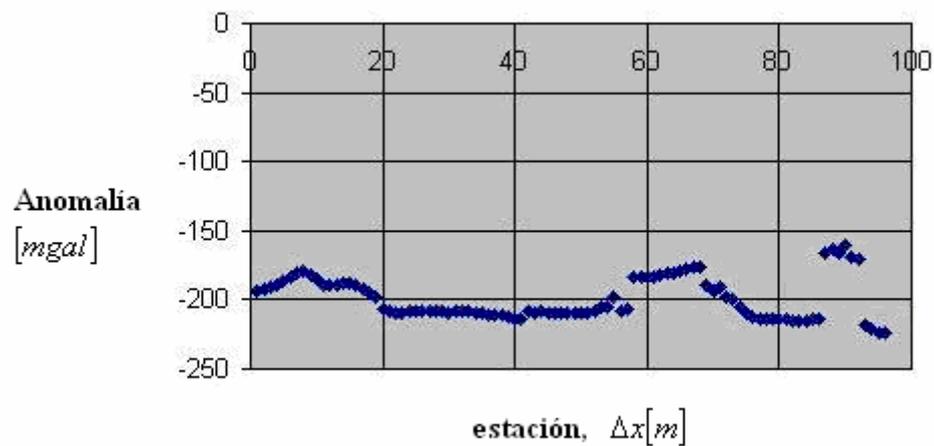


Figura V.4.4. Valores de la Anomalía de Bouguer en el orden original de las estaciones.

V.5. Densidades de la Formación Tlayúa

De manera complementaria a la exploración gravimétrica de la zona se realizaron mediciones de la densidad en una colección de muestras de la secuencia carbonatada en la Cantera de Tlayúa (previamente obtenidos en la localidad).

La importancia de obtener la densidad promedio radica en que dicho dato es importante para estimar los contrastes de densidad y modelar adecuadamente los perfiles de la zona, en la inteligencia de que para ajustar las anomalías es necesario variar el valor de la densidad alrededor de un valor promedio.

La densidad promedio de las muestras se ubica en 2.43 gr/cm^3 . (Figura V.5.1)

Estadística de la densidad de las muestras de roca caliza:

<u>DENSIDAD</u>	
Error típico	0,01
Media	2,43
Desviación estándar	0,16
Varianza de la muestra	0,03
Curtosis	6,62
Coefficiente de asimetría	1,18
Rango	1,26
Mínimo	2,02
Máximo	3,28
Suma	396,26
Cuenta	164

Figura V.5 .1. Densidad promedio de las muestras de roca caliza de la Cantera Tlayúa.

En las figuras (V.5.2) y (V.5.3) se puede observar de manera grafica la densidad promedio de la roca caliza, la cual oscila alrededor de 2.43 g/cm^3 .

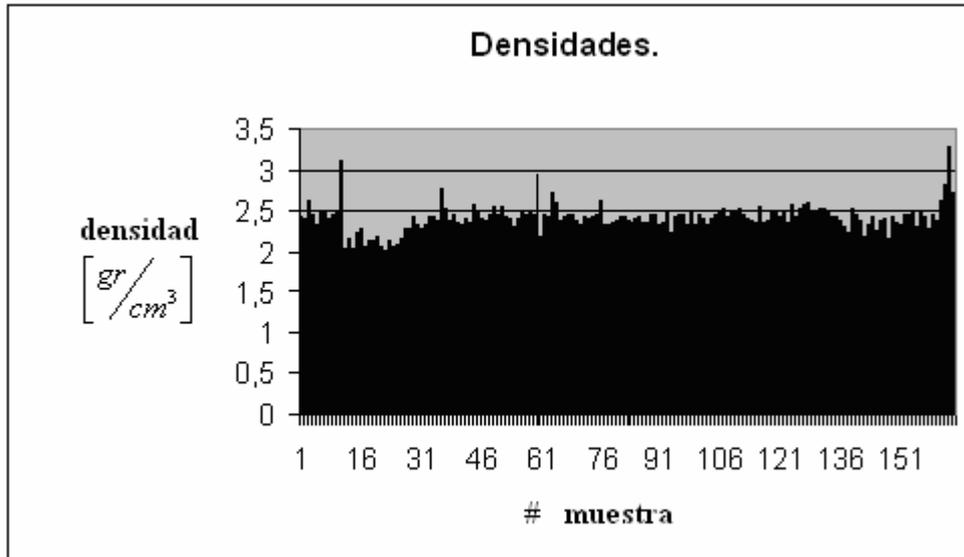


Figura V.5.2. Densidades de las muestras de roca Caliza.

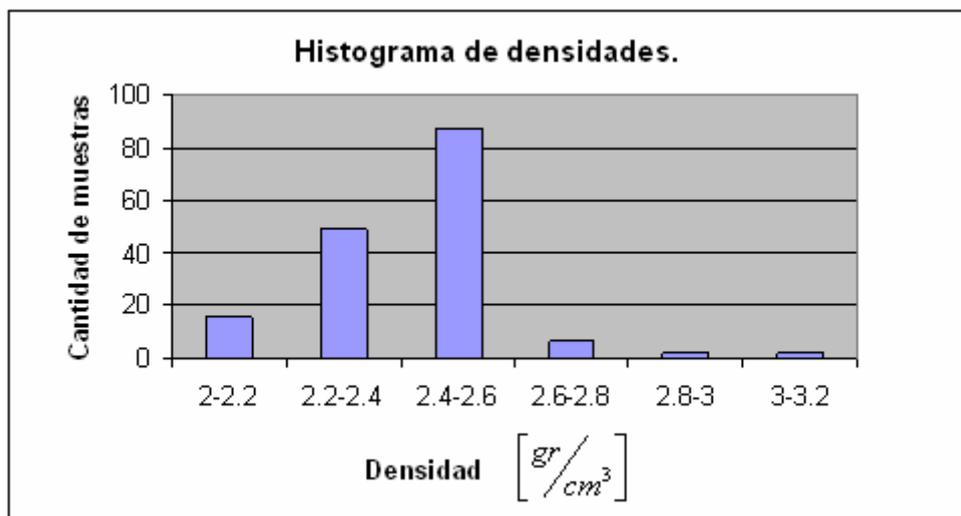


Figura V.5.3. Histograma de densidades de roca Caliza.

V.6. Perfiles proyectados

En el desarrollo del levantamiento gravimétrico se graficaron los perfiles de las estaciones gravimétricas de la zona de estudio (Figura V.2.1). A continuación se muestran las graficas respectivas en atención a los valores de las lecturas de gravedad. Los perfiles observados son: Río Axamilpa (Figura V.6.1), Progreso (Figura V.6.2), Naranjos (Figura V.6.3), Tlayúa (Figura V.6.4) y Tepexi Centro (Figura V.6.5).

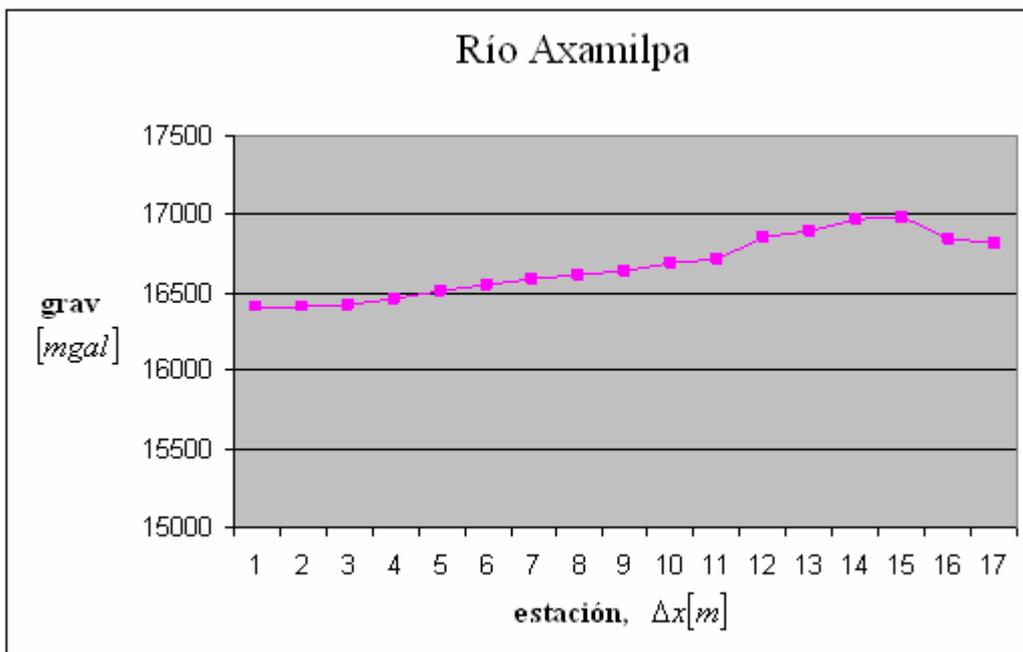


Figura V.6.1. Perfil Río Axamilpa.

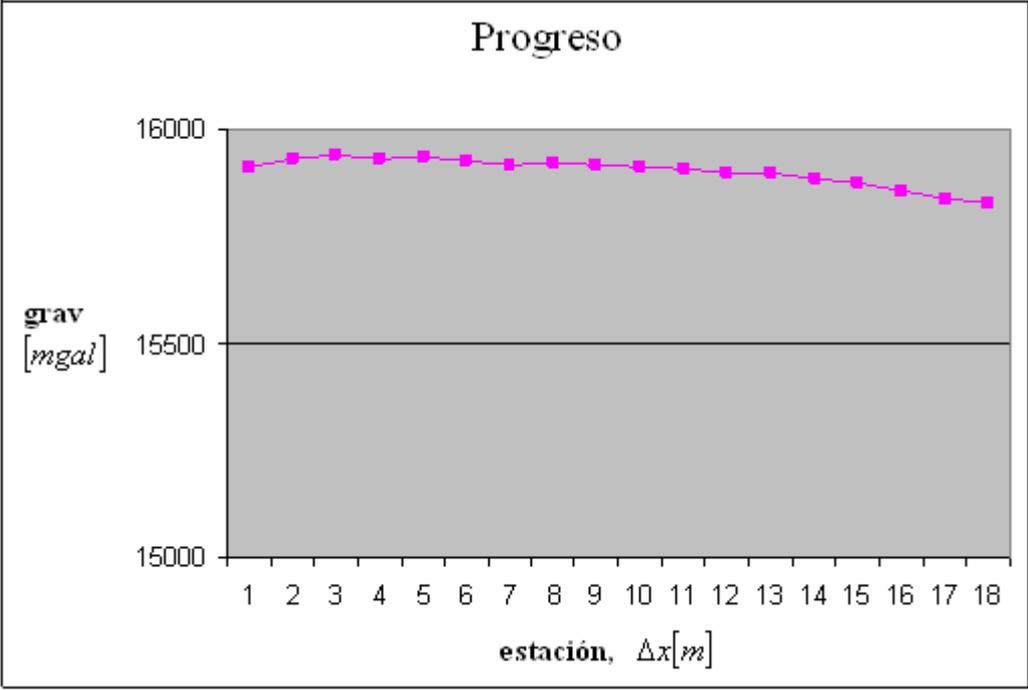


Figura V.6.2. Perfil Progreso.

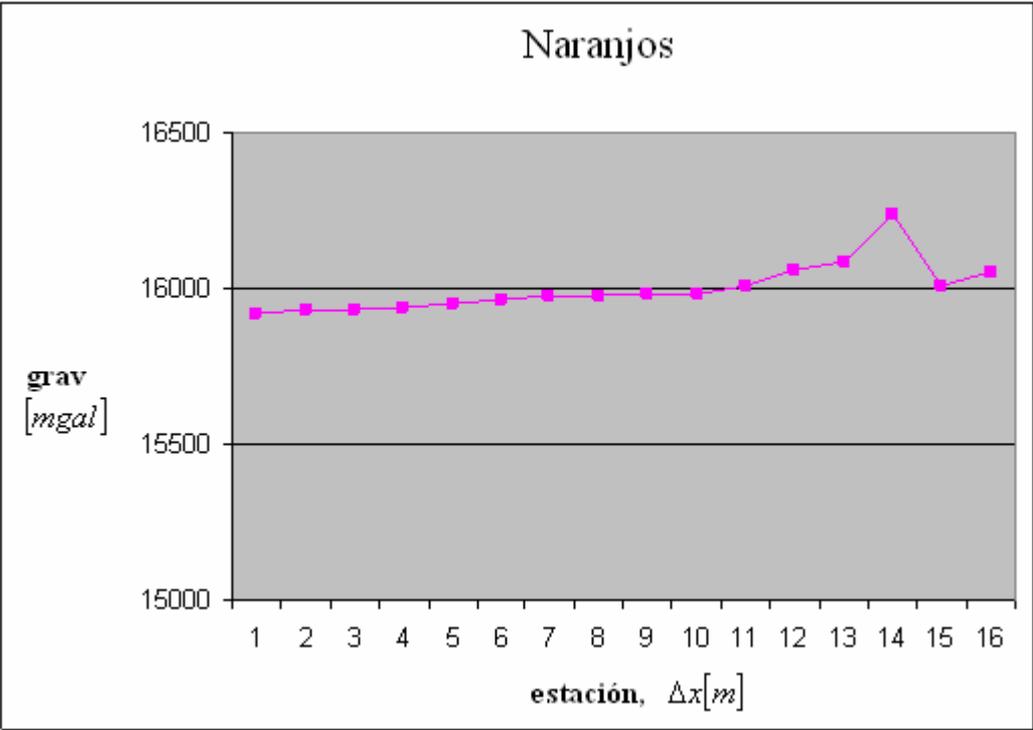


Figura V.6.3. Perfil Naranjos.

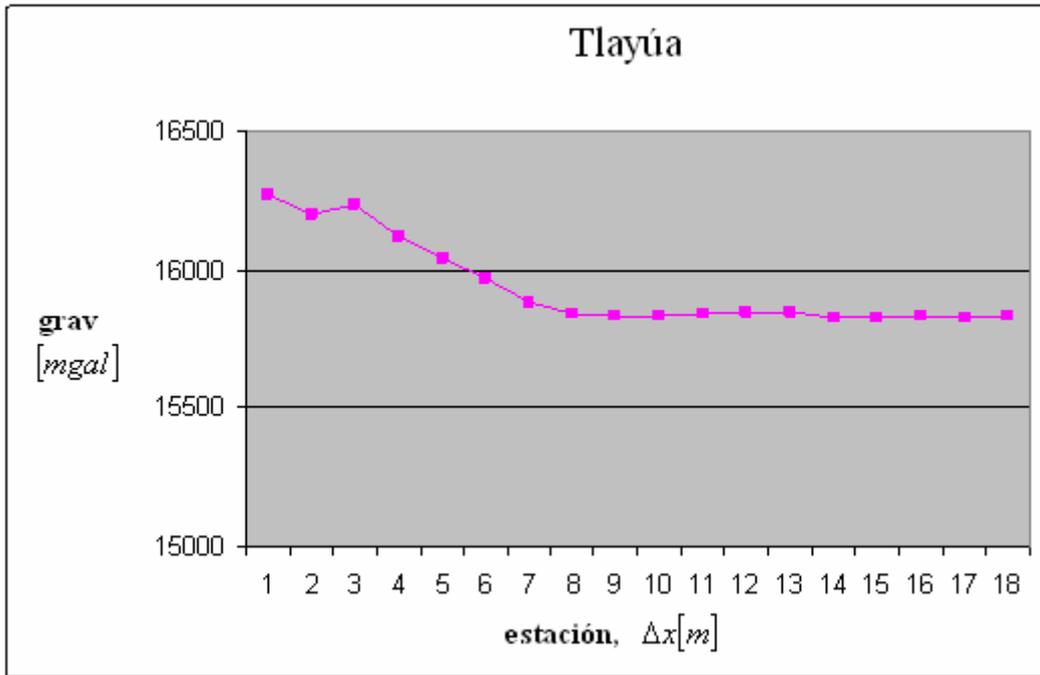


Figura V.6.4. Perfil Tlayúa.

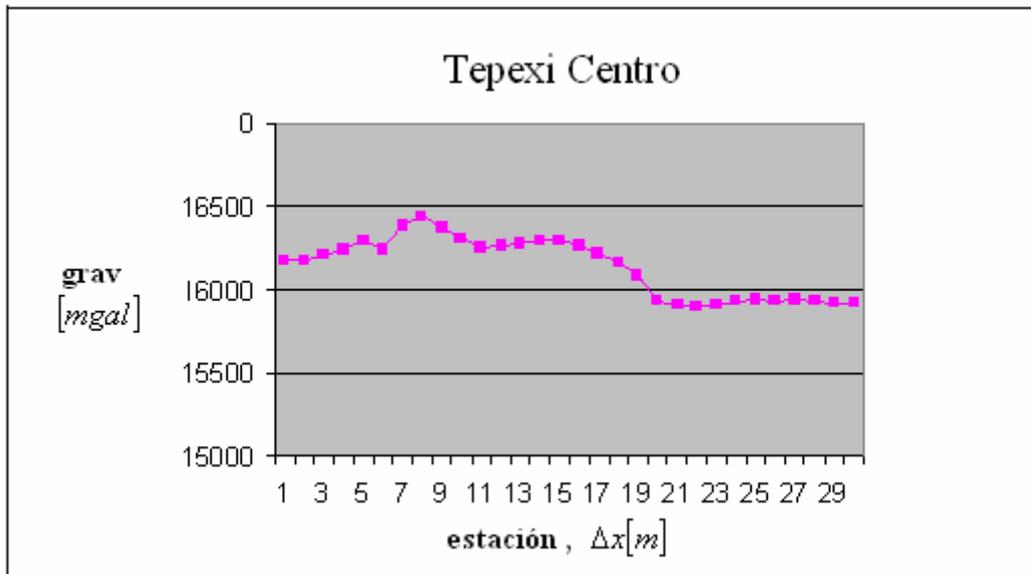


Fig. V.6.5. Perfil Tepexi Centro.

CAPITULO VI

Discusión

VI.1. Perfiles Gravimétricos

Se seleccionaron perfiles a lo largo de dos líneas donde se presenta una marcada anomalía al graficar los datos de las estaciones gravimétricas. Estas líneas corresponden a la que pasa por el centro del poblado de Tepexi de Rodríguez en dirección Norte-Sur, y la que pasa por la zona de la Cantera Tlayúa en dirección W-E.

Asimismo se realizó un perfil regional de la zona en sentido NW-SE con una cantidad limitada de puntos a fin de observar un patrón general de la anomalía gravimétrica de forma transversal en la zona. (Figura VI.1.1.)

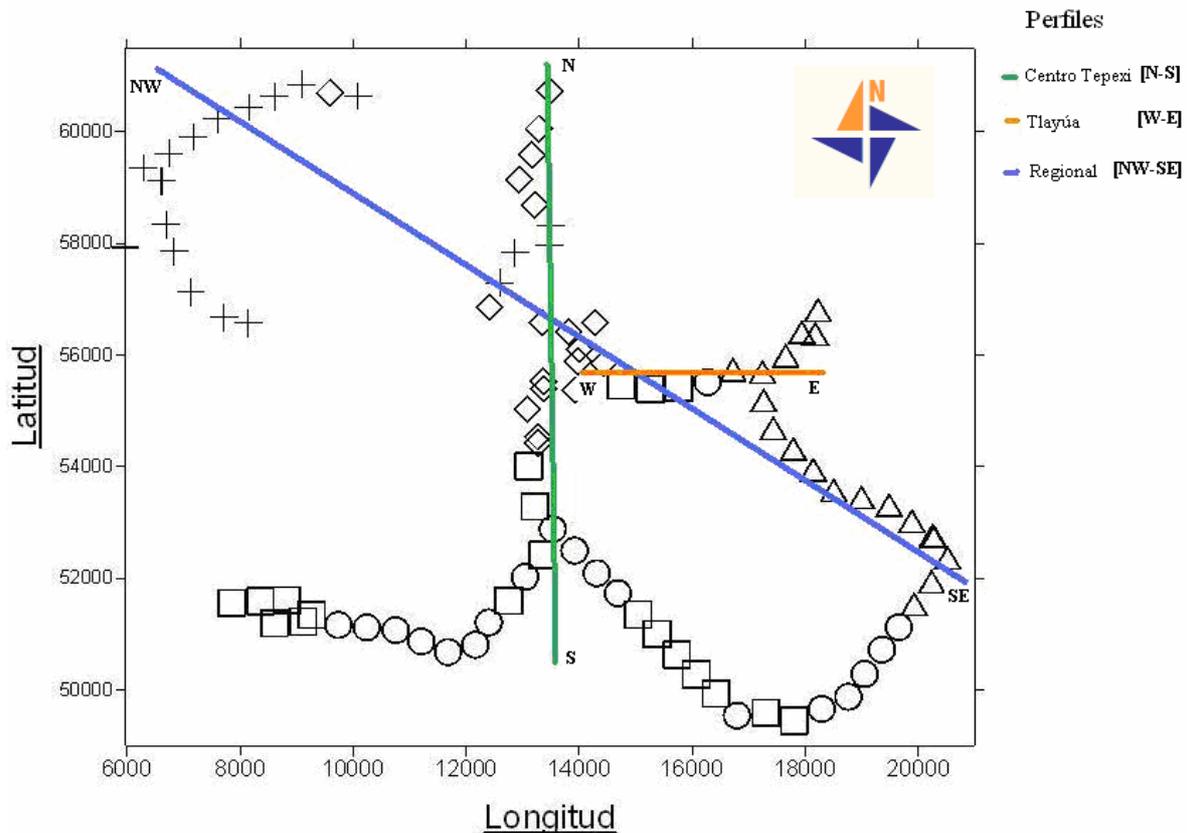


Figura VI.1.1. Localización de los perfiles gravimétricos seleccionados.

VI.2. Interpretación

Se realizó el modelado gravimétrico de los tres perfiles seleccionados para interpretar las características estructurales de la zona de estudio.

Para la adecuada interpretación de los datos se utilizó el programa Oasis Montaj (GM-SYS) versión 4.6 con licencia del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional.

GM-SYS Modelado e interpretación

GM-SYS: Fue desarrollado por Northwest Geophysical Associates, Inc. Y trabaja en la plataforma Oasis Montaj Geosoft para calcular la respuesta gravimétrica de modelos geológicos.

El GM-SYS proporciona una interfase para crear y manipular interactivamente modelos geológicos y así ajustar datos gravimétricos observados en el campo. GM-SYS calcula los cambios en la respuesta instantáneamente acelerando el proceso de interpretación permitiendo probar varias hipótesis de alternativas geológicas.

Los valores de las Anomalías de Bouguer con las que se realizó el modelado oscilan alrededor de -200 [mgal], lo cual es correspondiente a lo que cabría esperarse de la zona, en relación a su altura sobre el nivel del mar.

La modelación fue realizada teniendo en cuenta la geología de la región, donde el basamento esta constituido por las rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Acatlán (Applegate et al., 2006), y las calizas cenozoicas generalmente están encima de las calizas cretácicas, aunque en ocasiones descansan sobre el metamórfico (Martínez y Ramírez, 1999), lo cual da cabida a postular algunas variantes en la densidad de las calizas en el sentido original de su depositación.

Como es sabido, los cuerpos más profundos tienden a generar curvas más suavizadas en los modelos, y los más someros generan curvas más abruptas, de tal manera que en los puntos de inflexión de los distintos modelos, en algunos casos la curva no se ajusta perfectamente al punto de referencia, debido a que ahí subyace una estructura más somera que necesitaría mayor definición (o resolución) de los datos gravimétricos para ajustarla puntualmente.

VI.3. Modelos Gravimétricos

A continuación se analizan varios posibles modelos geométricos, generados haciendo uso de variaciones de profundidad y contrastes de densidad que ajustan los datos de anomalías gravimétricas, el análisis de la variación de las profundidades se realizó en dos aspectos; en el de la profundidad total del modelo perfilado y en la variación de los espesores de las distintas unidades, además se efectuó una evaluación de modelos equiespaciados y no equiespaciados de los distintos puntos de medición a fin de observar posibles variaciones un tanto atenuadas por alta frecuencia superficial en la zona.

Modelos gravimétricos del perfil central de Tepexi

El análisis del perfil que pasa por el Centro de Tepexi se basa en 4 modelos con orientación N-S y una extensión aproximada de 12 km.

Modelo 01a. Perfil Tepexi Centro

El modelo 01a. (Figura VI.3.1) muestra una alternancia de densidades de metamórfico y caliza en una serie de cuencas de depósito con profundidades que oscilan alrededor de los 3 km., con densidad del metamórfico de 2.6 y densidad de la caliza de 2.3 en la parte más superficial y densidad de caliza de 2 en la zona más profunda de esta roca. El ajuste de la gravedad observada con la teórica del modelo es óptimo a excepción de los dos puntos de inflexión principales en el perfil.

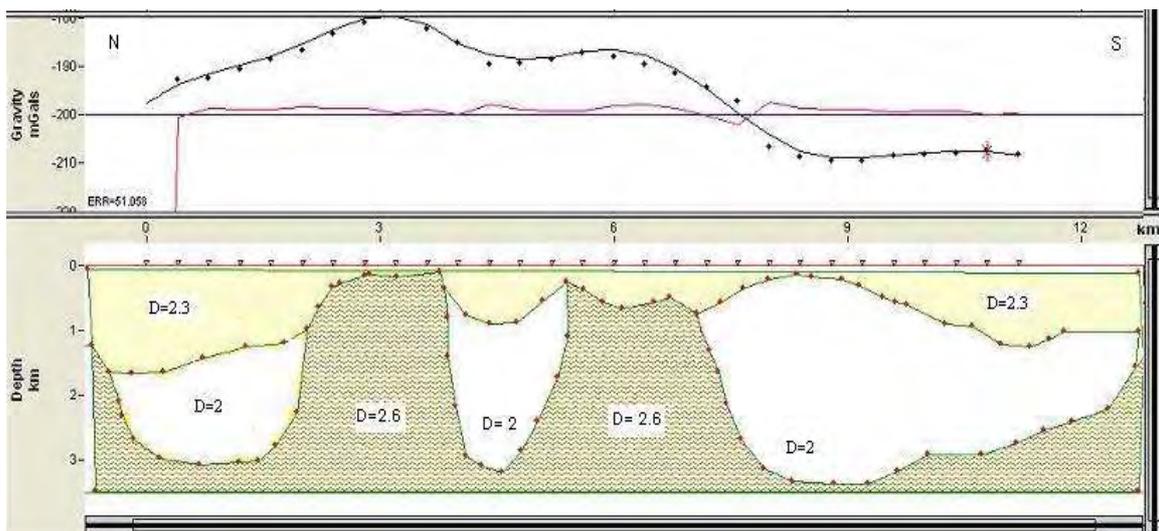


Figura VI.3.1. Modelo 01a. Tepexi Centro.

Modelo 01b. Perfil Tepexi Centro

El modelo 01b (*Figura VI.3.2*) muestra una profundidad de 3.3 km., sugiere una cuenca de depósito en el Sur con profundidad del orden de 2.5 km. con fallamiento y posteriormente erosión regional y depositación con relleno de la topografía pre-existente, con una variación de densidad de 2.0 en la zona más profunda y de 2.3 en la zona más somera para los carbonatos. La densidad del metamórfico se mantiene en 2.6 y en una zona se encuentra muy cerca de la superficie de afloramiento.

El volumen de material calcáreo más profundo que se observa hacia el sur de la línea concuerda con una de las postuladas cuencas arrojadas por la exploración gravimétrica, y dado que las cuencas de la zona se han encontrado activas durante un intervalo de tiempo prolongado (de acuerdo al registro fósil) es viable la existencia de una cuenca con un depósito de material calcáreo de espesor considerable, como se muestra en este modelo.

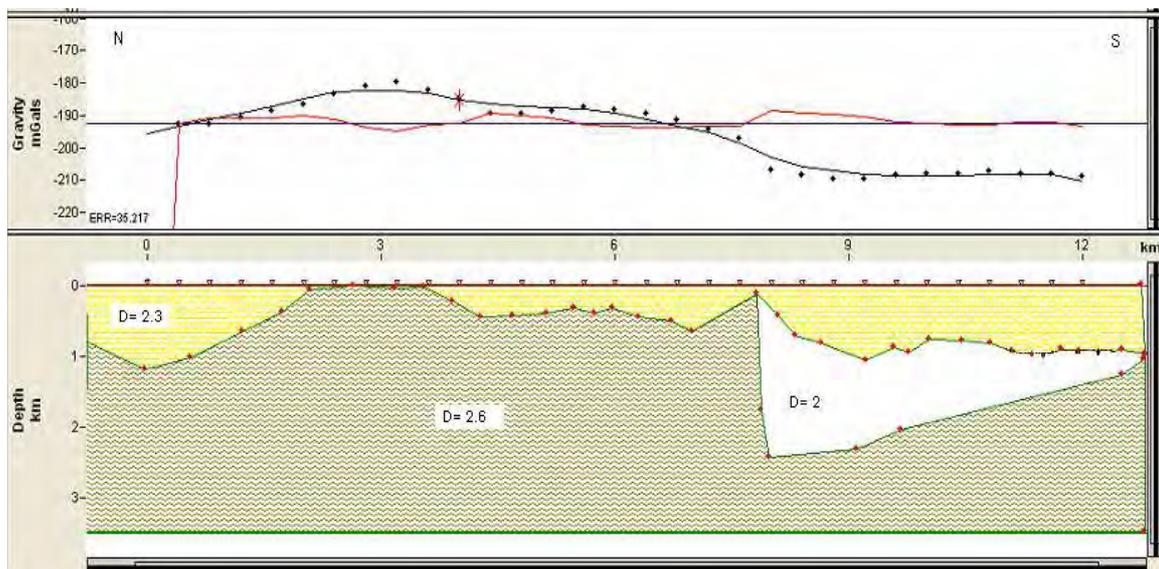


Figura VI.3.2. Modelo 01b. Tepexi Centro.

Modelo 01c. Perfil Tepexi Centro

El modelo 01c (*Figura VI.3.3*) proyectado para una profundidad de 2 km. sugiere una serie de tres cuencas con material calcáreo con profundidades oscilantes entre los 1.5 km. y 1.8 km., en este modelo se ha variado la densidad de los carbonatos en la zona Sur del perfil, donde se aprecia la mayor de las cuencas, asignándosele una densidad de 2.0 a la mayor parte de esta, y de 2.3 al resto de los carbonatos presentes en el modelo y 2.6 para el metamórfico, en la cuenca carbonatada en la zona derecha del modelo se sugiere una estructura de falla para delimitar los contornos de la cuenca. El ajuste de la gravedad teórica del modelo con la observada permanece inalterado, bajo la consideración de bordes fallados o suavizados para la cuenca.

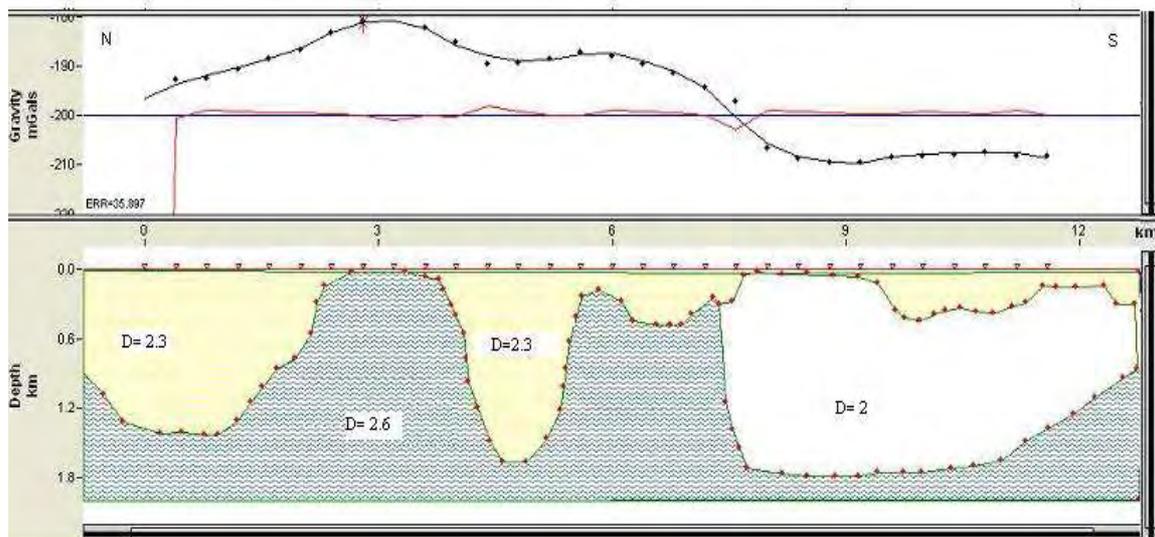


Figura VI.3.3. Modelo 01c. Tepexi Centro.

Modelo 01d. Perfil Tepexi Centro

El modelo 01d (*Figura VI.3.4*) tiene la particularidad de haber sido realizado con estaciones espaciadas en un intervalo irregular, a diferencia de los modelos anteriores, pero aún así manteniendo la extensión promedio de 12 km. de longitud en la línea. La diferencia de los espaciamientos esta motivada por la utilidad de realizar una comparación entre perfiles que usan distintos puntos de medición, aunque todos están inmersos dentro de la zona de exploración sus magnitudes varían de acuerdo a su posición.

En este perfil, el 01d (*Figura VI.3.4*), se aprecia una distribución espacial de los cuerpos de roca que es similar en la generalidad a la distribución observada en los modelos anteriores equiespaciados, observándose tres cuencas, la mayor de las cuales se halla hacia la zona Sur del perfil, lo cual corresponde al Sur geográfico, y con densidades para los carbonatos de 2.0 y 2.25, y de 2.6 para el metamórfico. La profundidad de este modelo es de 3 km. y al igual que en los anteriores se sugieren zonas de variación de densidad de los calcáreos hacia la zona superior de las cuencas y un sistema fallado en la cuenca de mayores dimensiones. El ajuste de la gravedad observada con la teórica del modelo cae en el mismo rango de los modelos equiespaciados.

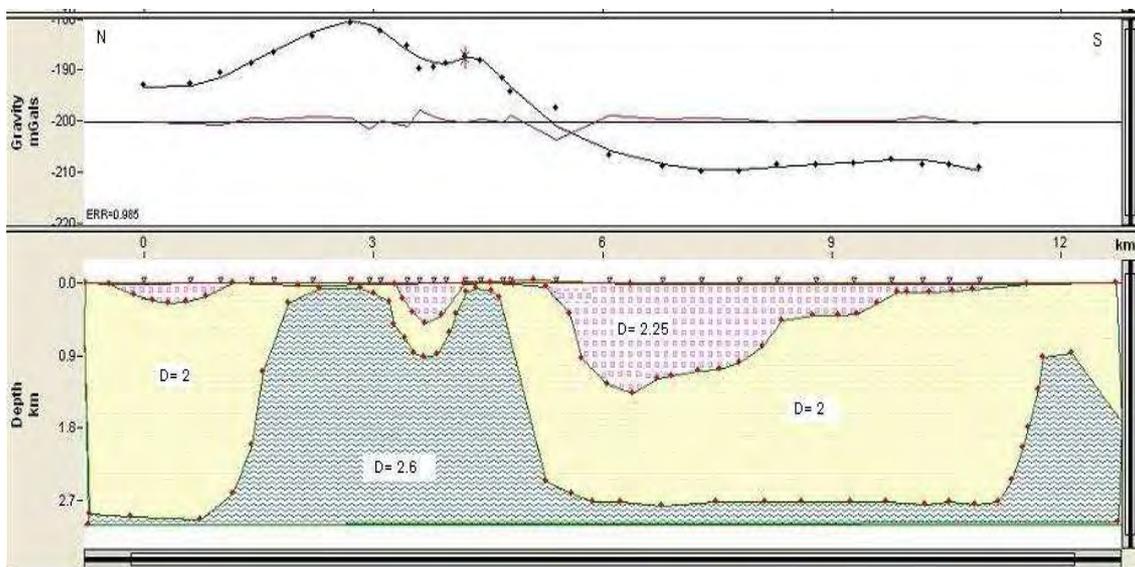


Figura VI.3.4. Modelo 01d. Tepexi Centro.

Modelos gravimétricos del perfil Tlayúa

Para la zona del perfil Tlayúa abarcada por este levantamiento, se presenta una extensión promedio de 8 km. de longitud para la línea W-E con 3 modelos que tienen estaciones de medición irregularmente espaciadas, debido a las características de la zona donde la adquisición de datos gravimétricos se ve dificultada por el terreno agreste.

Modelo 02a. Perfil Tlayúa

En el modelo 02a (*Figura VI.3.5*) se observa la forma general de una cuenca de material calcáreo con un “rebote” hacia el centro de la misma de un material más denso, metamórfico en este caso. El modelo esta perfilado en una extensión de 8 km. lineales y a una profundidad de 3 km., con una densidad de 2.2 para el material calcáreo, a excepción de una zona superficial con densidad de 2.0, y de 2.6 para el metamórfico.

El modelo presenta de manera general la ocurrencia de una cuenca hacia la zona Este del modelo, la cual es consecuente con la cuenca situada al Este de la zona de estudio. El “rebote” o división de dos sub-cuenclas mostradas en el modelo le proporciona a este un ajuste preciso de las curvas (teórica y observada). Dicho ajuste no fue posible conseguirlo mediante el aumento de la densidad del material calcáreo en la misma zona, por lo que este modelo fue seleccionado como con mayor probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a los parámetros empleados por el programa de modelado.

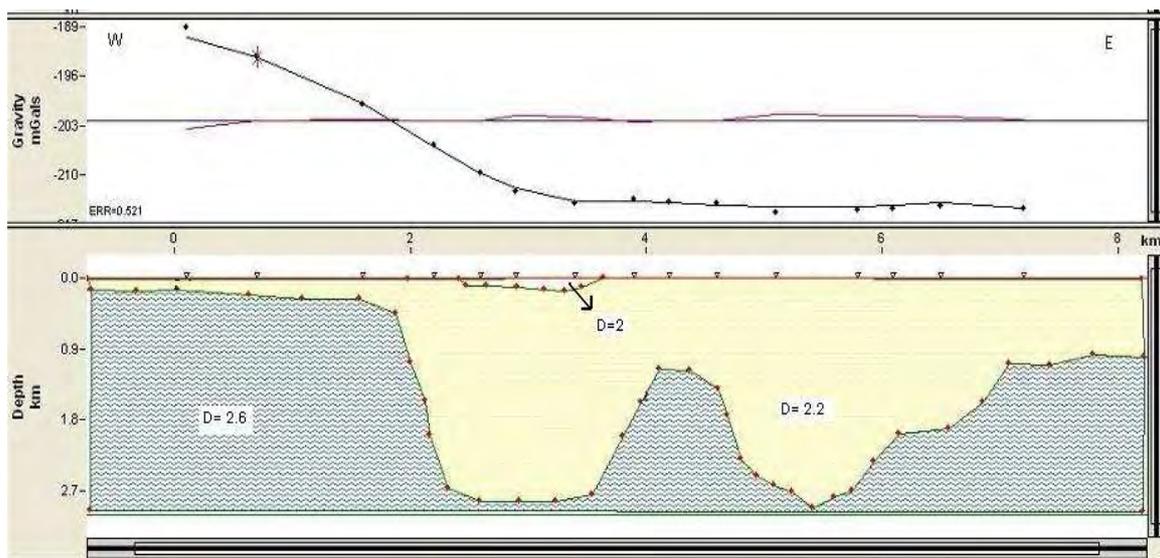


Figura VI.3.5. Modelo 02a .Tlayúa.

Modelo 02b. Perfil Tlayúa

El modelo 02b (*Figura VI.3.6*) con profundidad de 2 km. muestra una distribución de cuerpos de roca de 2.6 para el metamórfico, 2.2 para el material calcáreo con profundidad de 1.8 km. y con la particularidad de sugerir dos cuerpos calcáreos superficiales con densidad menor, y el “rebote” al interior de la cuenca se muestra más atenuado que en el modelo anterior. Conserva la forma general que sugiere la ocurrencia de una cuenca hacia el Este de la zona de estudio.

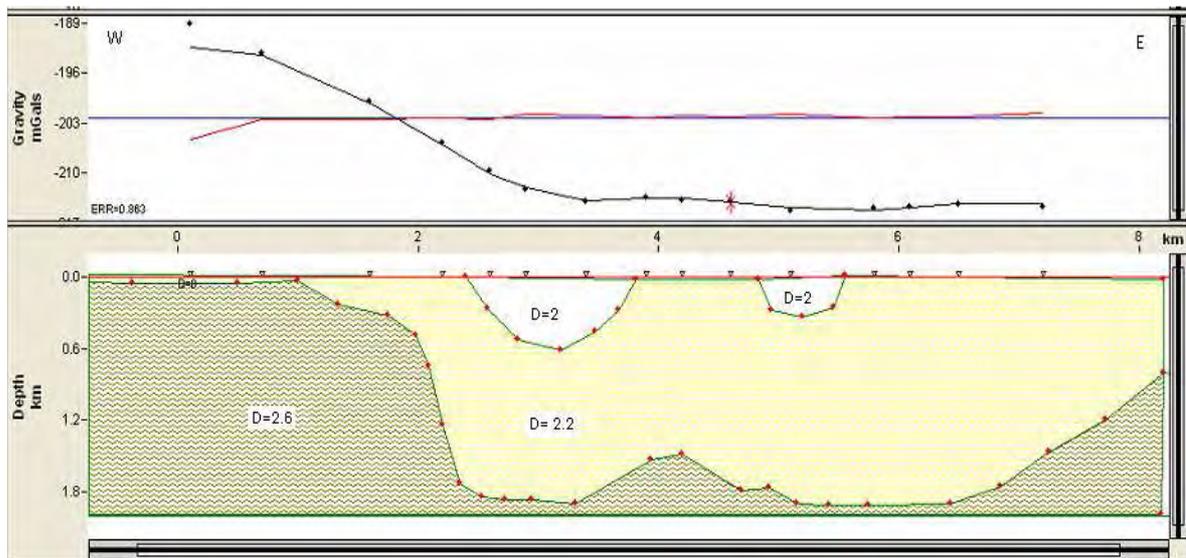


Figura VI.3.6. Modelo 02b. Tlayúa.

Modelo 02c. Perfil Tlayúa

El modelo 02c (Figura VI.3.7), muestra configuración similar a los dos modelos anteriores, con profundidades más someras y variaciones de densidad del material calcáreo más acentuadas, siendo la más profunda de 2.2 y las más somera, y también más extensa de 2.0, la variación de la densidad del material calcáreo observa seguimiento del contorno de la cuenca, únicamente posible mediante un proceso de depósito-erosión-depósito de material calcáreo.

Para el ajuste de la gravedad teórica con la observada el modelo requiere la suposición de una variación de densidad en el cuerpo de roca metamórfico de 2.6 a 2.9 en la zona Oeste del modelo.

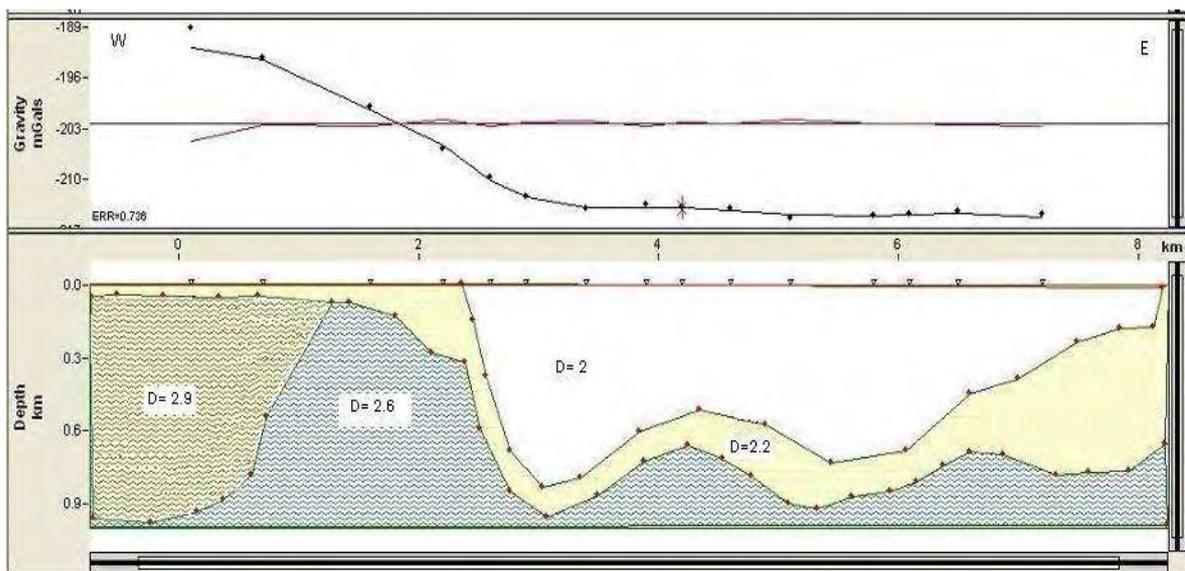
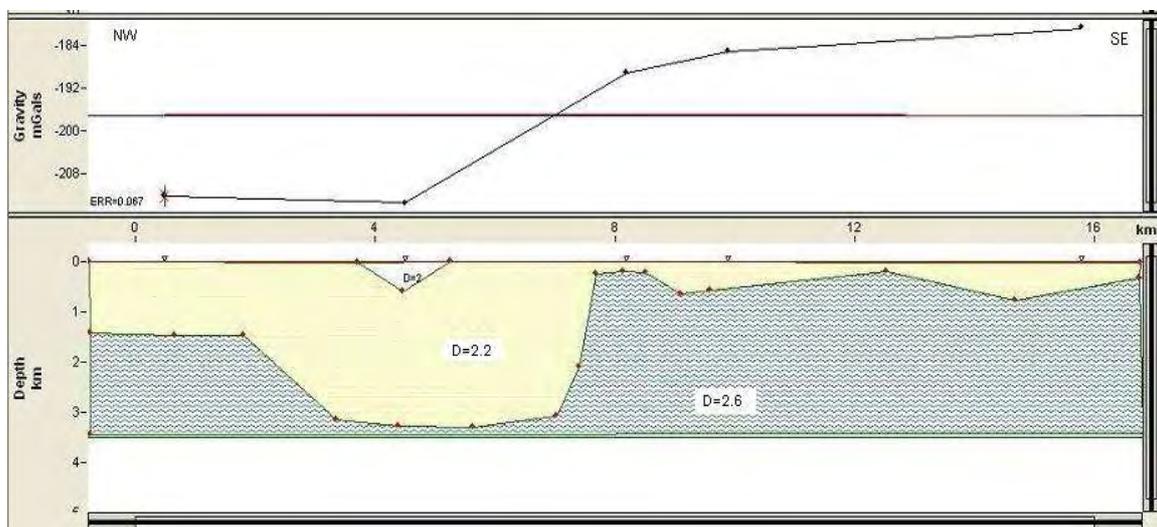


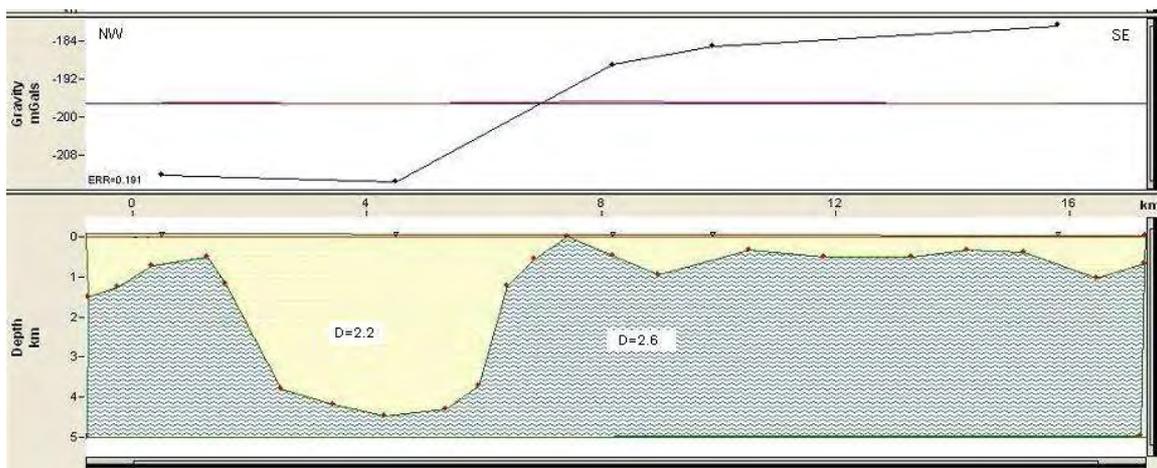
Figura VI.3.7. Modelo 02c. Tlayúa.

Modelos gravimétricos del perfil regional

En las figuras 03a y 03b (*Figura VI.3.8*) se aprecia el perfil general NW-SE de la zona de estudio que comprende una extensión de 16 km. con dos modelos similares en la generalidad, a una profundidad de 3.5 km. y 5 km. respectivamente, los cuales revelan una estructura muy probablemente flanqueada por fallas, y con diferencias en el espesor de los dos principales cuerpos de roca mostrados en el perfil, con densidad de 2.6 para el metamórfico y 2.2 para la caliza. En el modelo 03a (*Figura VI.3.8*) se sugiere la existencia de un cuerpo superficial de menor densidad hacia el centro de la estructura postulada hacia la zona NW del modelo.



Modelo 03a .



Modelo 03b.

Figura VI.3.8. Modelos del perfil regional.

CAPITULO VII

Conclusiones

La zona de Tepexi de Rodríguez en el Sur de Puebla está caracterizada por secuencias sedimentarias ricas en fósiles, en particular la Cantera Tlayúa constituye una de las localidades fosilíferas Cretácicas más importantes de América del Norte. Desde el inicio de las investigaciones en esta zona se han propuesto varios modelos para explicar las características sedimentológicas y paleoambientales de la Formación Tlayúa. En uno de estos modelos se propone un ambiente marino profundo (Kashiyama et al., 2004), mientras que otros modelos apoyan ambientes someros de cuencas pequeñas o lagunares con influencias marinas y de agua dulce (Applegate et al., 2006).

Los datos de anomalía gravimétrica y los modelos gravimétricos realizados en este trabajo sugieren de forma general la ocurrencia de un sistema de cuencas en la región de estudio, con distinta extensión, profundidad y contrastes de densidad. En el modelado de los perfiles, se consideraron diferentes geometrías y contrastes con el objetivo de evaluar los rangos permisibles de variación en profundidades y propiedades físicas. Para el análisis de estos modelos se requiere incorporar las observaciones geológicas así como datos de estratigrafía y de subsuelo.

La zona de Tepexi de Rodríguez se caracteriza por anomalías gravimétricas negativas entre los -160 mgals y -225 mgals que delinean las posibles estructuras correspondientes a las cuencas sedimentarias. Dentro del rango de modelos construidos para los perfiles, los correspondientes a la zona central de Tepexi y los de la zona de Tlayúa, siendo considerados en conjunto, corresponden con la propuesta del modelo de cuencas someras de Applegate et al., (2006) y se consideran como modelos probables para las estructuras profundas en la zona. La geometría en los modelos de cada perfil es similar. Algunas diferencias particulares están presentes en la geometría de los límites de cuenca (más suaves o más abruptas) y que sugieren la ocurrencia de fallamiento o bien erosión y relleno sedimentario.

En los modelos puede también apreciarse los efectos de incertidumbre asociados a las geometrías y contrastes de densidad y que se reflejan en las diferencias en profundidad de las estructuras.

Respecto a los modelos del perfil central de Tepexi en la generalidad presenta cuencas de depósito hacía la zona Sur en concordancia con la cuenca situada al Sur de la zona de estudio, con la peculiaridad de tener el material calcáreo de mayor densidad por encima del material calcáreo de menor densidad lo cual puede estar asociado a condiciones de depósito particulares en la zona en un tiempo específico, ejemplo de ello podrían ser calizas consolidadas depositadas sobre un paleokarst, cuya erosión previa deja fracturas cuando este colapsa. Aunque se desconoce la naturaleza del material calcáreo profundo de la zona, este modelo postula una probable configuración de densidades.

Los modelos correspondientes a la zona de Tlayúa presentan de manera general la ocurrencia de una cuenca hacía la zona Este del modelo, la cual es consecuente con la cuenca situada al Este de la zona de estudio.

En los modelos del perfil regional de la zona de estudio (*Figura VI.3.8*), es posible apreciar la depresión situada hacia la zona NW, donde también se halla material calcáreo. Los contornos generales de estos dos modelos, los cuales resultan de la interpolación de datos de varias zonas de adquisición de datos en la zona de estudio, son consecuentes con las figuras modeladas en los perfiles de la zona Tepexi Centro y Tlayúa, aportando un elemento más para la ocurrencia de las cuencas sedimentarias postuladas por la exploración gravimétrica.

De manera general, en la conjunción de perfiles del Centro de Tepexi y de Tlayúa se aprecian dos posibles estructuras de cuenca separadas por un cuerpo, de manera similar al esbozo geológico mostrado en la *Figura (VII.1)* el cual sugiere un modelo que apoya ambientes someros de cuencas lagunares con influencias marinas y de agua dulce. (Applegate et al., 2006). En este modelo se ha propuesto la existencia de una barrera (hipotética) que separaba la laguna arrecifal de un área de retrolaguna, donde se depositaron los sedimentos de la Formación Tlayúa.

Entre los modelos propuestos, el lagunar y de intramarea oceánica, y acorde a los perfiles obtenidos se considera que los modelos gravimétricos son viables debido a que apoyan la posible existencia de estructuras de cuenca para las secuencias cretácicas.

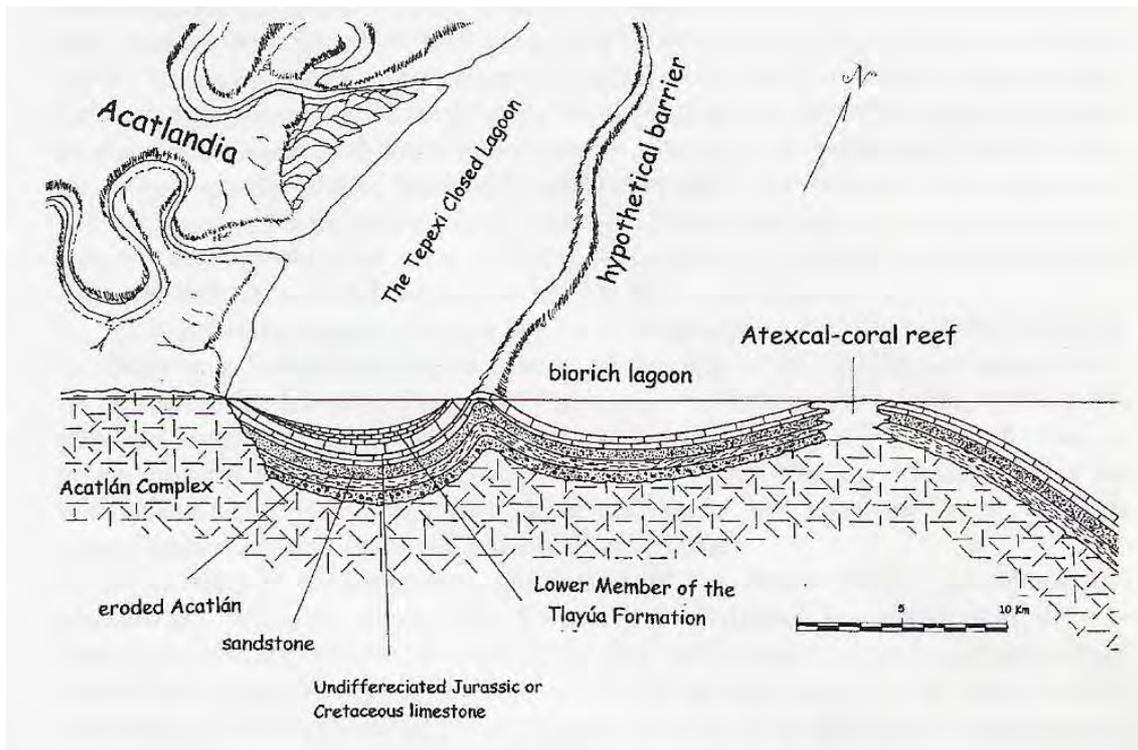


Figura VII.1. Esquema del modelo propuesto para la zona de Tepexi de Rodríguez durante el Cretácico.¹

Es importante señalar que el fallamiento de las cuencas es un factor importante para que se den las condiciones de depósito en el proceso de relleno de una cuenca, de manera que en los modelos gravimétricos propuestos no se discriminan aquellos que muestran fallamiento ni los que presentan estructuras suavizadas debido a que con la resolución obtenida no es posible emitir una opinión concluyente.

A falta de pozos exploratorios en la zona, los modelos quedan como una propuesta de las estructuras geológicas de la zona basada en los resultados de la exploración gravimétrica.

Dado que la Formación Tlayúa y los alrededores de Tepexi de Rodríguez contienen depósitos con excepcional preservación fósil para el Cretácico a nivel mundial, los depósitos fosilíferos estudiados en los afloramientos de la Cantera Tlayúa, los procesos diagenéticos asociados al depósito y los factores que propiciaron la formación de un depósito de tal naturaleza representan una riqueza de investigaciones presentes e investigaciones futuras.

¹ (Applegate et al., 2006)

Bibliografía

- Applegate SP. A preliminary study of the Tlayúa Quarry near Tepexi de Rodríguez, Puebla. *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología*, 1987.
- Applegate S.P. A new genus and species of pycnodont, *Tepexichthys aranguthyrum* from the Cretaceous (Albian) of Central México, Tepexi de Rodríguez, Puebla. UNAM, Instituto de Geología. *Revista* vol.10, num. 2, 1992.
- Applegate S.P., Espinosa L., Alvarado J., Benammi M., *Revision of Recent Investigations in the Tlayúa Quarry*, Instituto de Geofísica, 2006.
- Applegate S.P., Espinosa-Arrubarena, L; López Neri, P., *Las calizas litográficas de la Cantera Tlayúa en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México*. Sociedad Geológica Mexicana, 1984.
- Benammi M., Alvarado J., Urrutia J., *Magnetostratigraphy of the Lower Cretaceous Strata in Tlayúa Quarry, Tepexi de Rodríguez, State of Puebla, México*. *Earth Planets Space*, 58, 2006.
- Blakely R., *Potential Theory In Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, 1994.
- Brandi Juan M., *Apuntes de procesamiento de datos geofísicos*, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería.
- Bueche E., *Física general*, McGraw Hill, 1996
- Cantos J., *Tratado de Geofísica Aplicada*, Litoprint, España., 1970.
- Espinosa L., Applegate S.P., *A Paleocological Model of the Vertebrate bearing beds in the Tlayúa Quarry, near of Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico, in Mesozoic fishes, Systematic and Paleocology*, Manchen, Germany, 1996.
- Feldmann R.M., Vega F., Applegate S. and Bishop G., *Early Cretaceous Arthropods From the Tlayúa Formation at Tepexi de Rodríguez, Puebla, México*: *Journal of Paleontology*, vol. 72, 1998.
- Hinze W., Aiken C., Brozena J., et al. New Standards for reducing gravity data: The North American Gravity Database, *Geophysics*, vol.70, 2005.
- Instruction Manual Model G & D gravity meters, Texas, 78758, U.S.A., 2004.

- Kashiyama Y., Fastovsky D. E., Rutherford S., J. King and Montellano M., *Genesis of a locality of exceptional fossil preservation: Paleoenvironments of Tepexi de Rodríguez (mid-Cretaceous, Puebla, Mexico)*. Cretaceous Research, vol. 25, 2004.
- Martínez E., Ramírez E., *Palinoestratigrafía de la región de Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico- Implicaciones cronoestratigráficas*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 16, 1999.
- Mezcuca R., Udias, *Fundamentos de Geofísica*, Alianza Editorial. 2005.
- Miner T., Wheeler, *Gravitation*. Freeman & Co., 1973.
- Nabighian M., Ander, M., Grauch, V., (et al), *Historical Development of the Gravity Method in Exploration*. Society of Exploration Geophysics, 75 th, 2005.
- Ortega F., *Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estado de Puebla y Oaxaca*, UNAM, Instituto de Geología, revista, vol.2, 1978.
- Pantoja J., *Geología y paleoambiente de la Cantera Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, Estado de Puebla*, U.N.A.M., Instituto de Geología, revista, Vol. 9, 1992.
- Pantoja J., Malpica V., Galguera G., *Geología de los alrededores de la Cantera Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, Puebla*. Instituto de Geología, 1989.
- Stanley M., *Earth System History*, 1998.
- Stollberg H., *Física. Fundamentos y Fronteras*, Publicaciones Cultural, 1976.
- Tarbuck E., Lutgens F., *Ciencias de la Tierra*. Prentice Hall, 2000.
- Telford W., Geldart L., Sheriff R., *Applied Geophysics*. Second Edition, 1990.
- Urrutía J., Flores, H., *Bouguer Gravity Anomalies and Regional Crustal Structure in Central México*, International Geology Review, vol.38, 1990.
- <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/puebla/Mpios/>
- <http://www.geosoft.com/>
- <http://mapserver.inegi.gob.mx/>
- <http://www.wikipedia.org/>