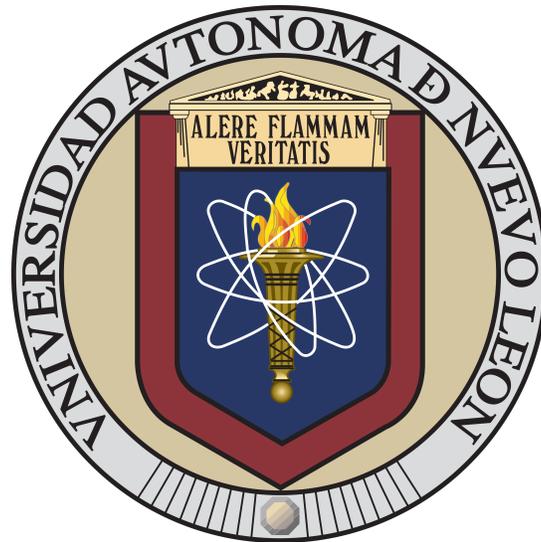


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



MODELO ESTRUCTURAL DE LA CORTEZA
SOMERA (APROX 10 KM) EN EL VALLE DE
MEXICALI (DELTA DEL RÍO COLORADO) A PARTIR
DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN 2D, GRAVIMETRÍA,
MAGNETOMETRÍA Y SISMICIDAD

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN GEOCIENCIAS

PRESENTA

CARLOS SIMÓN REYES MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

LA TESIS:

**MODELO ESTRUCTURAL DE LA CORTEZA
SOMERA (APROX 10 KM) EN EL VALLE DE
MEXICALI (DELTA DEL RÍO COLORADO) A PARTIR
DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN 2D, GRAVIMETRÍA,
MAGNETOMETRÍA Y SISMICIDAD**

QUE PRESENTA:

CARLOS SIMÓN REYES MARTÍNEZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN GEOCIENCIAS

Vo.Bo.

Dr. Mario González Escobar
Director de tesis

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

LA TESIS:

**MODELO ESTRUCTURAL DE LA CORTEZA SOMERA (APROX
10 KM) EN EL VALLE DE MEXICALI (DELTA DEL RÍO
COLORADO) A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN 2D,
GRAVIMETRÍA, MAGNETOMETRÍA Y SISMICIDAD**

QUE PRESENTA:

CARLOS SIMÓN REYES MARTÍNEZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN GEOCIENCIAS

Vo.Bo.

Dr. Mario González Escobar

Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta

Dr. Fernando Velasco Tapia

Dr. Uwe Jenchen

Dr. Enrique Gómez Treviño

Por este medio declaro bajo protesta haber realizado esta tesis de manera personal y con ayuda del comité, y haber utilizado únicamente, los medios, procedimientos y asesorías descritas en la misma.

Mc. Carlos Simón Reyes Martínez
Linares, Nuevo León, 2022

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en su totalidad a mi querida Hermana.

Sin ti no se donde estaría...

Con todo mi amor y cariño.

Tu y yo contra el mundo

-Los pishis

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las diferentes instituciones por el gran apoyo que me otorgaron. Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) por la beca otorgada durante tres años para realizar el Doctorado en Ciencias con Orientación en Geociencias. A la **Facultad de Ciencias de la Tierra** (FCT) perteneciente a la **Universidad Autónoma de Nuevo León** (UANL) donde realice dicho posgrado. Al **Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California** por permitirme realizar estancias de investigación en sus instalaciones. Al **Programa de Fortalecimiento de Calidad Educativa** (PFCE) por el apoyo económico otorgado para realizar dichas estancias de investigación. A la **Comisión Nacional de Hidrocarburos** (CNH) por otorgar los datos sísmicos que hicieron posible este trabajo. A **Halliburton, SEISMAX y dGB Earth Sciences** por la facilitación de los softwares utilizados para el procesado e interpretación (PROMAX, SEISUP y OPENDTECT).

A mi director de Tesis el **Dr. Mario González Escobar** por aceptarme en como su tesista y facilitarme la información, su tiempo, confianza, amistad y paciencia. Por siempre estar ahí, aún en los momentos más difíciles.

Al **Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta** y al **Dr. Fernando Velasco Tapia** por todas sus enseñanzas sobre sus respectivas disciplinas, pero más aún por todos sus consejos e invaluable amistad.

A mis asesores el **Dr. Uwe Jenchen** y el **Dr. Enrique Gómez Treviño** por sus valiosos comentarios a este trabajo.

Al **personal técnico de FCT**, M.T. Juan Artemio Alvarado Olmeda por sus enseñanzas en procesamiento de datos sísmicos que fueron fundamentales para este trabajo, al **personal técnico de CICESE**, Sergio Arregui Ojeda, Cristian Alejandro Gallegos Castillo, Edgar Agustín Mastache Roman y Ramón Mendoza Borunda por todo el apoyo técnico a lo largo de mi estancia en estas instalaciones.

Al **Dr. Carlos Aguilar Madera**, subdirector del posgrado de FCT, por su ayuda en los tramites pertinentes.

A mis **coaches de Sables**, Pepe, Máquina†, Rafa, Omar y Danny, por su compañía en el emparrillado y su valiosa amistad.

A mis **jugadoras y jugadores** de Sables que tuve el honor de entrenar.

A mis **amigos**, Jorge Merlo, Many Ligonio, Sahid Ruiz, Shagy Oliveros, Omar León, Cecy Rodríguez, Sughey Apolinar, Gery Martínez, Sebastian Jurado, Caro Gutierrez, Eliana Vargas, Aryadna Bautista, Eliana Rosas, Omar Díaz (chef), Salomé Jaramillo, Juande Jiménez, Xavy y Anita, Freddy Vargas, Rebeca Zavala, Claudia Quinteros, Nayelli Illades, Lucero Villafrañca, Moy Casas, Adrian Salinas, Evelyn Cantú, Dario Torres, Sergio Perales, Martín Pacheco, Panny Viveros, Agelo, Chava Flores, Chucho Salazar, Myriam Lujan, Jova, Carlitos Castillo, por estar ahí.

A los **Marios**, Mario, Mónica, Sergio, Cristian, Mastash, Young, La Abril y Jorge, La Luz, Martha Carolina, Marianggy, Eleyra y Ramón, por esos Viernes.

A la **familia Arrieta Martínez** con la cual estoy infinitamente agradecido.

A mis **familiares** que a pesar de las circunstancias siempre han estado conmigo.

Y FINALMENTE... **GRACIAS A MI!**

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del procesamiento e interpretación de diez perfiles de reflexión sísmica multicanal terrestre adquiridos durante la década de los 80's por Petróleos Mexicanos en el Valle de Mexicali. Se presentan imágenes sísmicas del subsuelo de hasta 5 km de profundidad. La interpretación fue complementada con mapas de gravimetría, magnetometría y sismicidad. Finalmente se construyó un modelo 2D gravimétrico-magnético transversal a las principales fallas del valle soportado por información de pozos profundos e información sísmica. En dicho modelo se presentan características físicas (densidad y susceptibilidad magnética) del basamento granítico de la Placa del Pacífico y del basamento metamórfico correspondiente a la Placa Norteamericana, así como zonas de la corteza sedimentaria que han aumentado su densidad debido al ascenso de fluidos geotérmicos a lo largo de las principales fallas. Con todo esto se logró corroborar fallas geológicas reportadas previamente (Imperial, Michoacán, Algodones y Dunas) así como fallas no documentadas hasta ahora (San Luis, Morelos, Santa Isabel, Tulechek, Islas Agrarias, Sinaloa y Jalapa). Se presenta la Zona de Deformación Calipatria con una extensión de al menos 135 km desde el Mar Salton, California, hasta el Desierto de Altar, Sonora. La importancia de estas estructuras va desde el punto de vista energético hasta el tectónico. Donde se proponen tres dominios geotérmicos los cuales deberán ser estudiados de manera más puntual en el futuro para determinar su potencial de explotación. Por otro lado, varias de las nuevas fallas propuestas se encuentran cerca o debajo del centro urbano de la Ciudad de Mexicali, lo que implica un peligro y riesgo sísmico para dicha Ciudad, estas fallas deben ser tomadas en cuenta para futuros atlas de riesgo del municipio. Finalmente, se determina que estas fallas pueden contener en ellas el faltante en la tasa de desplazamiento que se ha propuesto para la región, principalmente para la Falla Imperial.

ÍNDICE

	PÁGINA
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
I. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. MARCO TEÓRICO	3
1.2.1. FALLAS TRANSFORMANTES	3
1.2.2. <i>STEP OVERS</i> , <i>PUSH UPS</i> y CUENCAS <i>PULL APART</i>	4
1.2.3. <i>RELEASING</i> Y <i>RESTRAINING BENDS</i>	5
1.2.4. <i>STRIKE SLIP DUPLEX</i> , ABANICOS Y ESTRUCTURAS DE FLOR	6
1.2.5. SÍSMICA DE REFLEXIÓN	8
1.2.6. SISMOLOGÍA PASIVA	8
1.2.7. GRAVIMETRÍA	9
1.2.8. MAGNETOMETRÍA	9
1.3. MARCO GEOLÓGICO	10
1.3.1. TECTÓNICA	10
1.3.2. PELIGRO SÍSMICO EN EL VALLE DE MEXICALI	16
1.3.3. GEOTERMIA	18
1.4. ANTECEDENTES	22
1.5. HIPÓTESIS	25
1.6. OBJETIVOS	26
1.6.1. OBJETIVO GENERAL	26
1.6.2. OBJETIVOS PARTICULARES	26
1.7. METAS	27
1.8. METODOLOGÍA	27
1.8.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	27
1.8.2. REVISIÓN DE BASE DE DATOS SÍSMICOS	27
1.8.3. GENERACIÓN DE GEOMETRÍAS	28
1.8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS	28
1.8.5. CONVERSIÓN TIEMPO—PROFUNDIDAD	29

1.8.6. INTERPRETACIÓN DE DATOS SÍSMICOS	30
1.8.7. INFORMACIÓN SÍSMICA DE REFLEXIÓN 2D	30
1.8.8. INFORMACIÓN DE OTROS DATOS GEOFÍSICOS	31
1.8.9. MODELO GRAVIMÉTRICO–MAGNÉTICO 2D	32
II. RESULTADOS	34
2.1. INTRODUCCIÓN	34
2.2. SISMICIDAD	35
2.3. GRAVEDAD	38
2.4. MAGNETISMO	40
2.5. MODELO DE VELOCIDADES	43
2.6. FALLAS GEOLÓGICAS REPORTADAS	43
2.7. FALLAS GEOLÓGICAS NO REPORTADAS	48
2.8. CONEXIÓN ENTRE FALLAS	52
2.8.1. FALLA SINALOA	52
2.8.2. FALLA ISLAS AGRARIAS	54
2.8.3. FALLA MEXICALI	54
2.9. LÍMITE LITOLÓGICO SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS-CONSOLIDADOS	55
2.10. BASAMENTO DEL VALLE DE MEXICALI	57
2.11. MODELO GRAVIMÉTRICO-MAGNÉTICO	59
2.11.1. BASAMENTO METAMÓRFICO	61
2.11.2. BASAMENTO GRANÍTICO	61
2.11.3. INTRUSIVO	61
2.11.4. SEDIMENTOS CONSOLIDADOS CON ALTERACIÓN HIDROTERMAL (ROCAS METASEDIMENTARIAS)	62
2.11.5. SEDIMENTOS CONSOLIDADOS SIN ALTERACIÓN HIDROTERMAL .	62
2.11.6. SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS	63
III. DISCUSIÓN	64
3.1. INTRODUCCIÓN	64
3.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS	66
3.3. ANOMALÍAS CAÓTICAS DE BAJA AMPLITUD (ASCBA)	67
3.4. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS EN EL VALLE DE MEXICALI	68
3.4.1. ZONA DE DEFORMACIÓN CALIPATRIA	68
3.4.2. FALLA MICHOACÁN	72
3.4.3. CUENCA CERRO PRIETO	74
3.4.4. RAZÓN LARGO–ANCHO DE TRASLAPE	76
3.4.5. TASAS DE DESLIZAMIENTO	78
3.5. PELIGRO SÍSMICO EN EL VALLE DE MEXICALI	81
3.6. GEOTERMIA DEL VALLE DE MEXICALI	83
3.6.1. DOMINIO GEOTÉRMICO NORESTE DEL VALLE DE MEXICALI	83
3.6.2. DOMINIO GEOTÉRMICO CALIPATRIA	84
3.6.3. DOMINIO GEOTÉRMICO IMPERIAL	85
3.6.4. DOMINIO GEOTÉRMICO MICHOACÁN	86
IV. CONCLUSIONES	88

BIBLIOGRAFÍA CITADA	91
APÉNDICE.....	102
A. ARTÍCULO PUBLICADO EN REVISTA CIENTÍFICA	102

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Imagen satelital de la localización del área de estudio. Líneas color rojo indican fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, letras color negro indican el nombre de las fallas, línea amarilla indica la Depresión del Salton, líneas gris indican divisiones políticas, puntos negro con blanco ciudades importantes de la región, triángulos color naranja indican los campos geotérmicos actualmente en explotación, triángulos color rojo indican zonas de alto potencial geotérmico, flechas blancas indican la dirección de movimiento de las placas tectónicas. (González Escobar <i>et al.</i> , 2013; Arango Galván <i>et al.</i> , 2015; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019). Fallas del sur de California tomadas de USGS.	2
2. Estructuras geológicas típicas de una falla transformante. Tomado de Kearey <i>et al.</i> (2009).	7
3. Geología superficial del área de estudio y principales estructuras geológicas. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas color negro indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígono gris claro indica la zona urbana de la ciudad de Mexicali. Manifestaciones y campos geotérmicos de EE.UU. reportados por California Department of Conservation y Arango Galván <i>et al.</i> (2015). Sismicidad historia reportada por (BSSA, 1916; Ellsworth, 1990; Felzer y Cao, 2008). Pozos reportados por Olmsted <i>et al.</i> (1973); Fonseca <i>et al.</i> (1981); Cobo y Bermejo (1982); Lira (2005); Pacheco <i>et al.</i> (2006); Prol Ledesma <i>et al.</i> (2018). Abreviaturas: Campo Geotérmico Cerro Prieto—CGCP.	11
4. Modelo para la evolución tectónica del Golfo de California. Las fallas mostradas representan estructuras primarias activas durante el Cuaternario. Abreviaturas: Placa Rivera—PR, Placa Juan de Fuca—PJDF, Punto Triple Rivera—PTR, Punto Triple Mendocino—PTM, Falla de San Andrés—FSA, Colorado Plateau—CP, Sierra Madre Occidental—SMO. Modificado de Bennett <i>et al.</i> (2013).	13
5. Mapa tectónico del Valle de Mexicali e Imperial y las tasas de deslizamiento modeladas para las principales fallas. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, flechas negras indican el movimiento de las fallas, letras azules indican las tasas de deslizamiento propuestas por diversos autores (Thomas y Rockwell, 1996; Field <i>et al.</i> , 2014; Lindsey y Fialko, 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019).	15
6. Regiones sísmicas de la República Mexicana (CFE, 1993).	16
7. Zonificación por fallas en el Municipio de Mexicali. Tomado de Ley García <i>et al.</i> (2011).	18

8.	Modelos del Campo Geotérmico Cerro Prieto propuestos por Lira (2005) y Dumas (2010) . En mapa: Líneas color rojo indican fallas, línea celeste indica el perfil propuesto por Dumas (2010) , línea color verde indica el perfil propuesto por Lira (2005) , círculos color azul indican pozos que terminaron en sedimentos, círculos color naranja indican pozos que cortaron basamento, círculo color morado indica pozo 529-M4 que corto intrusivo máfico (García Sánchez et al., 2017). Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Michoacán—FM, Campo Volcánico Cerro Prieto—CVCP.	21
9.	Provincia CV3-CP (Cerro Prieto). Flujo de calor, manifestaciones hidrotérmicas, vulcanismo reciente (edad $\leq 3\text{Ma}$). Tomado y modificado de Prol Ledesma y Morán Zenteno (2019)	22
10.	Antecedentes de estudios geofísicos en el Valle de Mexicali. Fallas tomadas de Lira (2005) ; Fletcher et al. (2016) ; González Escobar et al. (2020) , perfiles de sismica de reflexión reportados por Majer y McEvelly (1982) ; Fonseca et al. (1981) ; González Escobar et al. (2020) , perfiles de sismica de refracción reportados por Puente y De la Peña (1978) , perfiles de resistividad reportados por Razo et al. (1978) , pozos reportados por Cobo y Bermejo (1982) ; García Sánchez et al. (2017) ; Prol Ledesma et al. (2018)	24
11.	Secuencia de procesamiento utilizada. Modificado de Yilmaz (2001)	29
12.	Ubicación de los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo. Líneas negras indican los perfiles sísmicos, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, flechas negras indican el movimiento de las fallas. Fallas tomadas de Lira (2005) ; Fletcher et al. (2016) ; González Escobar et al. (2020) ; Dorsett et al. (2019)	31
11.	Mapa de hipocentros de la base de datos de SCEDC relocalizados con la metodología de Hauksson et al. (2011) (círculos) e interpretación de lineamientos en el Valle de Mexicali. Líneas punteadas amarillas muestran lineamientos propuestos, líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005 ; Fletcher et al., 2016 ; Dorsett et al., 2019 ; González Escobar et al., 2020), polígono gris muestra la zona urbana de la ciudad de Mexicali, polígonos color gris oscuro indican campos y zonas geotérmicas, estrellas amarillas indican sismos históricos (año y magnitud)(BSSA, 1916 ; Felzer y Cao, 2008 ; Ellsworth, 1990). Abreviaturas: Campo geotérmico Heber—CGH, Campo geotérmico East Mesa—CGEM, Campo geotérmico Cerro Prieto—CGCP, Zona geotérmica Tulechek Norte—ZGTN, Zona geotérmica Tulechek Norte—ZGTS, Zona geotérmica Riíto—ZGR.	36
12.	Mapa de solución de mecanismos focales para sismos $M \geq 3$ e interpretación de lineamientos en el Valle de Mexicali. Líneas punteadas amarillas muestran lineamientos propuestos, líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005 ; Fletcher et al., 2016 ; Dorsett et al., 2019 ; González Escobar et al., 2020), polígono gris muestra la zona urbana de la ciudad de Mexicali, estrellas amarillas indican sismos históricos (año y magnitud)(BSSA, 1916 ; Felzer y Cao, 2008 ; Ellsworth, 1990). Mecanismo focal del sismo de 1979 (6.5) obtenido de The Harvard Centroid Moment Tensor Catalog (Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012)	37
13.	Anomalía de Bouguer del Valle de Mexicali con principales anomalías gravimétricas. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005 ; Fletcher et al., 2016 ; Dorsett et al., 2019 ; González Escobar et al., 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	39

14.	Mapa de la Señal Analítica de los datos gravimétricos. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	40
15.	Reducción al polo del campo magnético total del Valle de Mexicali con contornos de la Anomalía de Bouguer (gris).Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	41
16.	Señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo y perfiles reportados por Pacheco <i>et al.</i> (2006); Puente Huerta (2019), letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	42
17.	Modelo de velocidad e interpretación de perfil sísmico transversal al Valle de Mexicali en profundidad con pozos cercanos con litología reportada por Olmsted <i>et al.</i> (1973); Cobo y Bermejo (1982). En imagen sísmica: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas, líneas color azul indican basamento, líneas punteadas color azul indican basamento inferido, líneas punteadas color magenta indican <i>Anomalías sísmicas caóticas de baja amplitud</i> (ASCBA). En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, líneas magenta indican los perfiles sísmicos mostrados, líneas blancas indican fallas observadas en el perfil. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Hidalgo—FH, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMO, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC, Intrusivo Paredones—IP, Cuenca Morelos—CM, Cuenca Cerro Prieto—CCP.	44
18.	Trazo de la Falla Imperial observado en los diferentes perfiles sísmicos sobre mapa de anomalía de Bouguer. La Falla Imperial se observa como una ASCBA en los perfiles sísmicos. Líneas punteadas color magenta indican las ASCBA. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	46

19.	Falla Michoacán observada en perfiles sísmicos como ASCBA sobre mapa de anomalía de Bouguer. Líneas punteadas color magenta indican las ASCBA, líneas rojas indican fallas. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP.	48
20.	Fallas no reportadas previamente sobre mapa de datos magnéticos con reducción al polo y contornos de anomalía de Bouguer. Líneas blancas indican fallas reportadas por primera vez en este trabajo, líneas rojas indican fallas reportadas previamente, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019; González Escobar <i>et al.</i> , 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, polígono color blanco indica la Zona de Deformación Calipatria. Abreviaturas: Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Jalapa—FJA, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMO, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Zona de Deformación Calipatria—ZDCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.	49
21.	Perfiles sísmicos mostrando la Falla Santa Isabel con distintos puntos de vista sobre mapa de anomalía de Bouguer. Mapa a la zona superior derecha muestra la interpolación del basamento en tiempo de viaje doble. En imágenes: Líneas color rojo indican las fallas interpretadas, líneas color negro indican reflectores observados, líneas color amarillo indican el basamento acústico. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019), línea blanca indica el corte de la falla Santa Isabel con su componente normal, líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígono color gris indica el Campo Geotérmico Heber, contornos color gris indican la anomalía de Bouguer. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Campo Geotérmico Heber—CGH.	51
22.	Correlación de fallas geológicas en perfiles sísmicos de este trabajo, perfiles reportados por Fonseca <i>et al.</i> (1981) y perfil de resistividad de Razo <i>et al.</i> (1978). Pozos tomados de Cobo y Bermejo (1982). Epicentros relocalizados de SCEDC.	53
23.	Horizonte del límite litológico entre los sedimentos clásticos no consolidados y los sedimentos consolidados a partir de las observaciones en los perfiles sísmicos. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019), polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria, líneas negras indican otros perfiles sísmicos utilizados en este trabajo. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP, Zona de Deformación Calipatria—ZDCA	56
24.	Basamento oeste del Valle de Mexicali observado en perfiles sísmicos 42 y 33-P, con información de pozos cercanos. En imágenes: Líneas color amarillo indican el basamento, líneas color rojo indican fallas, líneas color negro indican reflectores guía. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher <i>et al.</i> , 2016; Dorsett <i>et al.</i> , 2019), líneas color magenta indican los perfiles mostrados en la imagen, líneas negras indican otros perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, contornos color gris indican la anomalía de Bouguer, diamantes color rojo indican emanaciones hidrotermales en superficie (Arango Galván <i>et al.</i> , 2015), círculos color naranja indican pozos cercanos que cortaron basamento (Cobo y Bermejo, 1982; Prol Ledesma <i>et al.</i> , 2018), icono de ojo indica el punto de vista de la imagen superior. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP.	58

25. Modelo 2D gravimétrico—magnético, transversal al Valle de Mexicali y su ajuste de anomalías calculadas y observadas. Densidades (D) dadas en kg/m^3 y susceptibilidades magnéticas (S) dadas en 10^{-3}SI . En mapa: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), línea color magenta indica la ubicación del modelo 2D, líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados para construir el modelo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria, diamantes color rojo indican emanaciones hidrotermales en superficie (Arango Galván *et al.*, 2015), círculos color naranja indican pozos cercanos que cortaron basamento, círculos color azul indican pozos que cortaron sedimentos (Olmssted *et al.*, 1973; Cobo y Bermejo, 1982). Abreviaturas: Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Islas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMOR, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Norte de Cuenca Cerro Prieto—NCCP, Cuenca Morelos—CMOR, Intrusivo Paredones—IP. 60

26. Mapa del Valle de Mexicali con nuevas fallas incorporadas y fallas antes reportadas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020). Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas color rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria. 65

27. Zona de deformación Calipatria en mapas de anomalía de Bouguer (Biehler, 1971; Chanes Martínez *et al.*, 2014). Polígono punteado color negro indica la Zona de deformación Calipatria, líneas negras indican los perfiles sísmicos, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígonos color gris indican campos geotérmicos en explotación, polígonos color magenta indican ASCBA reportadas en este trabajo y por Van de Kamp *et al.* (1978); Pacheco *et al.* (2006); Puente Huerta (2019), polígono color azul indica el límite del levantamiento gravimétrico de Biehler (1971). Letras en color negro indican el nombre de las fallas y letras en color blanco indican el nombre de las anomalías gravimétricas. Fallas tomadas de Lira (2005); Fletcher *et al.* (2016); González Escobar *et al.* (2020); Dorsett *et al.* (2019). 71

28. Posibles uniones entre Michoacán y Dixieland. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, líneas gruesas punteadas color gris indican los lineamientos propuestos por Magistrale (2002), círculos negros indican sismicidad de la base de datos de SCEDC, línea gruesa negra indica la falla que alimenta al Campo Geotérmico Heber reportada por James *et al.* (1987) 73

29. Estructura de flor negativa observada en el step over Cerro Prieto: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas, líneas color azul indican basamento, líneas punteadas color azul indican basamento inferido. En Mapa: Líneas rojas indican fallas, polígono gris indica el Campo Geotérmico Cerro Prieto, Línea magenta indica el perfil sísmico mostrado. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Hidalgo—FH, Falla San Luis—FSL, Step Over Cerro Prieto—SOCP, Campo Geotérmico Cerro Prieto—CGCP, Exageración vertical—EV. Modelo tomado de Kearey *et al.* (2009). 75

30. Comparación del *step over* formado entre Imperial y Dixieland–Michoacán–Cerro Prieto y el modelo de evolución de [van Wijk et al. \(2017\)](#). A) Mapa con nuevas fallas propuestas para el Valle de Mexicali e Imperial con su distancia de traslape y distancia entre fallas maestras. Líneas gruesas color rojo indican las fallas maestras tomadas en cuenta, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas. B) Geometría inicial de las fallas para una separación de 20 km y 40 km de traslape. Mostrando una cuenca *pull apart* de forma romboidal. C) Tensión desviadora en la dirección σ_{xx} de un *step over* con traslape de fallas después de 5 ma. El modelo predice movimiento normal en las fallas maestras. Modelos tomados de [van Wijk et al. \(2017\)](#). 77

31. Mapa actualizado con las fallas propuestas en este trabajo con tasas de deslizamiento reportadas e imagen sísmica interpretada del perfil 23-P. En mapa: Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en color rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria. En imagen sísmica: Líneas color rojo indican principales fallas, líneas negras indican reflectores sísmicos, líneas punteadas magenta indican ASCBA. Abreviaturas: Falla Mexicali—FMX, Falla Islas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSI, Falla Imperial—FI. 80

32. Zonificación por fallas del Valle de Mexicali incluyendo fallas de este trabajo. 81

33. División de dominios geotérmicos propuesta para el Valle de Mexicali (polígonos naranja). Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígonos color gris indican yacimientos y zonas geotérmicas importantes, polígonos color blanco indican zonas con presencia de ASCBA de este trabajo y reportadas por [Majer y McEvelly \(1982\)](#); [Goldstein y Carle \(1986\)](#); [Pacheco et al. \(2006\)](#); [Puente Huerta \(2019\)](#), diamantes color rojo indican manifestaciones geotérmicas en superficie reportadas por ([Arango Galván et al., 2015](#)). 87

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El Valle de Mexicali (Figura 1) se localiza en la zona norte del estado de Baja California, México; dentro de la Depresión del Salton que a su vez abarca desde el Valle Coachela en California, EE.UU. hasta el norte del Golfo de California, México. Al oeste, el Valle de Mexicali colinda con la Sierra El Mayor-Cucapah y la Laguna Salada, al este con el Desierto de Altar, Sonora y la Cuenca de Yuma, Arizona, al norte se encuentra políticamente separado del Valle Imperial por la frontera con EE.UU. mientras que al sur encontramos el delta del Río Colorado que desemboca en la parte norte del Golfo de California. Toda esta región se encuentra dentro del límite de placas transformante Pacífico-Norteamérica que es tectónicamente activo, con importante actividad sísmica así como asentamientos humanos de gran población, siendo uno de ellos la Ciudad de Mexicali. Esta región (Valle de Mexicali–Imperial) también cuenta con una importante cantidad de yacimientos y zonas geotérmicas (Figura 1) producto de su ambiente tectónico ([González Escobar et al., 2013](#); [Arango Galván et al., 2015](#)).

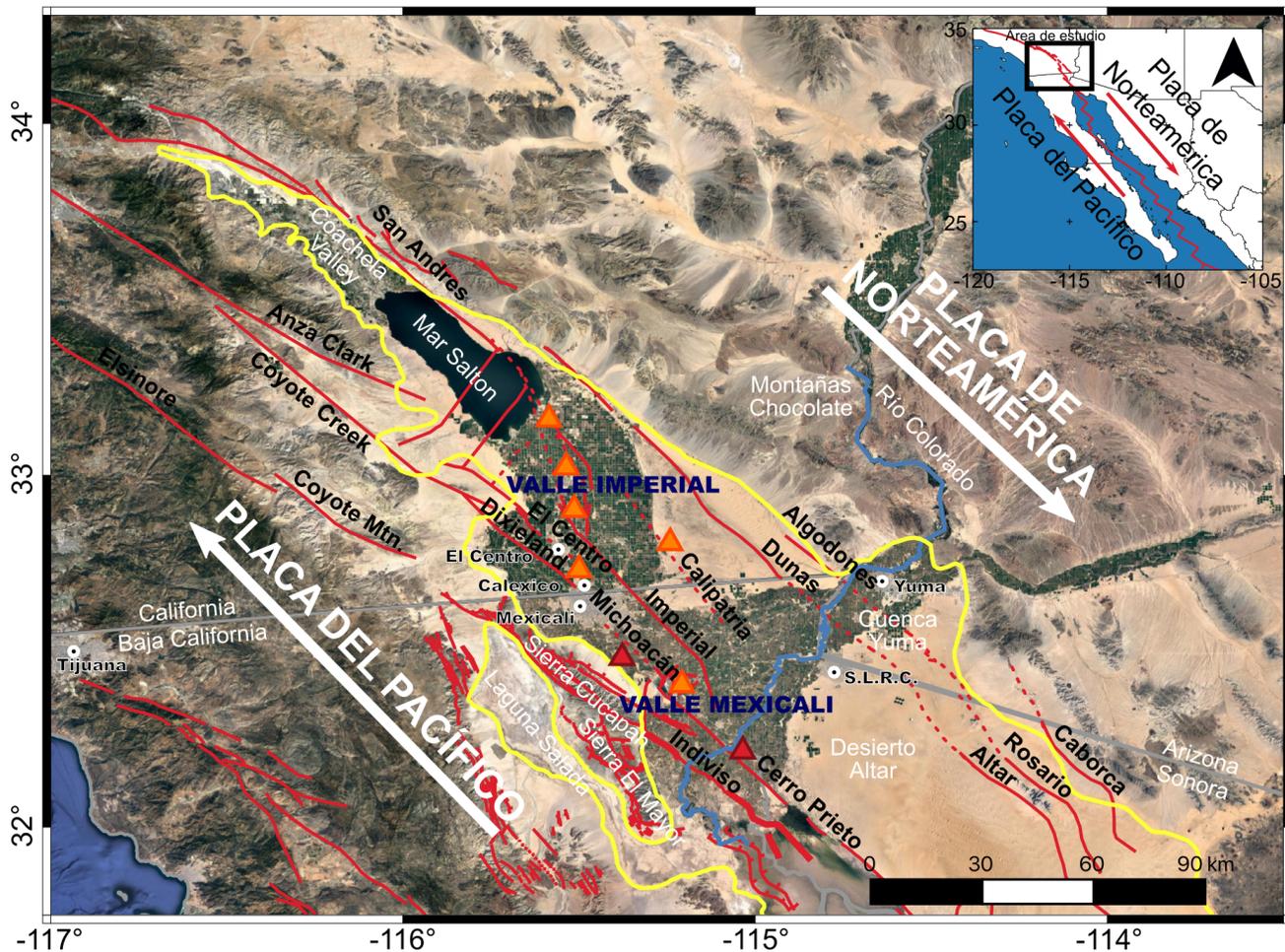


Figura 1: Imagen satelital de la localización del área de estudio. Líneas color rojo indican fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, letras color negro indican el nombre de las fallas, línea amarilla indica la Depresión del Salton, líneas gris indican divisiones políticas, puntos negro con blanco ciudades importantes de la región, triángulos color naranja indican los campos geotérmicos actualmente en explotación, triángulos color rojo indican zonas de alto potencial geotérmico, flechas blancas indican la dirección de movimiento de las placas tectónicas. (González Escobar *et al.*, 2013; Arango Galván *et al.*, 2015; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019). Fallas del sur de California tomadas de USGS.

Por otro lado, la geofísica es una importante herramienta para el estudio del subsuelo, ya sea con fines de búsqueda de recursos energéticos (petróleo, gas, minerales, geotermia), búsqueda de agua, o simplemente observar de mejor manera las estructuras que se encuentran en el subsuelo. Toma más importancia aún en lugares donde existen importantes espesores sedimentarios que tienen fallas activas sepultadas, que representan peligro para la población y en regiones de alto potencial geotérmico aún sin explorar, como es caso del Valle de Mexicali.

Este estudio está motivado para conocer aún más sobre la estructura y la estratigrafía del Valle de Mexicali. Se cuenta con información de sísmica de reflexión 2D propiedad de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) que fue tomada en esta región a principios de los años ochenta. Para mejorar las interpretaciones aquí propuestas, comprender de mejor manera el subsuelo del Valle de Mexicali y los fenómenos geológicos que ocurren en él, se han aplicado e integrado diferentes metodologías geofísicas (gravimetría, magnetometría y sismología). Esto ha permitido incrementar el conocimiento en: 1) tectónica, 2) peligro sísmico y 3) exploración geotérmica. Esto no solo aporta conocimiento geológico, sino que además, contribuye con información que impacta directamente a las problemáticas sociales actuales sobre desarrollo urbano y energía.

1.2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan algunos conceptos geológicos y geofísicos necesarios para una mejor comprensión del trabajo, como son las estructuras geológicas que se forman en ambientes de límites transformantes y los distintos métodos geofísicos utilizados en este trabajo (sísmica de reflexión, gravimetría, magnetometría y sismología).

1.2.1. FALLAS TRANSFORMANTES

Una falla transformante o de rumbo es aquella en la que el desplazamiento de bloques es horizontal, en una falla de rumbo *dextral*, *de mano derecha* o *lateral derecha*, el movimiento relativo del bloque que se encuentra al fondo es hacia la derecha (ver Figura 2a) caso contrario para la falla de rumbo *sinistral*, *de mano izquierda* o *lateral izquierda*, donde dicho bloque se desplaza hacia la izquierda (ver Figura 2b)(Ghosh, 2013). Una falla o límite transformante no es otra cosa que una falla de rumbo que está cortando la litósfera y a su vez está conectando dos zonas de deformación divergente o convergente o incluso otra falla transformante. Por otro lado, el comportamiento de las

fallas transformantes oceánicas es diferente al de una falla transformante continental. En los océanos, las fallas transformantes son angostas y consisten en un solo trazo de falla donde se concentra la mayor parte de la sismicidad. Mientras que en los continentes, la deformación se distribuye en una serie de trazos de fallas paralelas y subparalelas, donde solo una de estas fallas puede absorber la mayor parte del desplazamiento en un momento dado, o bien, pueden compartirlo en diferentes porciones dispersando la sismicidad, como sucede a lo largo del sistema de fallas San Andres en California ([Sengör *et al.*, 2019](#)).

1.2.2. *STEP OVERS, PUSH UPS y CUENCAS PULL APART*

La mayoría de las fallas transformantes están compuestas por varios segmentos, donde cada segmento termina próximo a otro segmento subparalelo, el movimiento es transferido a través de zonas de extensión o contracción, llamados *step overs*. En estos *step overs* la geometría inicial de las fallas y el sentido de su movimiento controlan si la zona presenta extensión o acortamiento. Fallas normales y depresiones llamadas cuencas *pull apart* caracterizan *step overs* en donde la zona entre los segmentos de falla presenta esfuerzos de tensión, mientras que las cabalgaduras, pliegues y levantamientos topográficos conocidos como *push ups*, los cuales se forman donde la zona entre los segmentos de falla presenta esfuerzos de compresión, como los muestran las Figuras 2c y 2d respectivamente. La combinación de movimiento de cizalla y extensión es conocido como trans-tensión, y la combinación de movimiento de cizalla y compresión es conocido como transpresión ([Kearey *et al.*, 2009](#)).

1.2.3. *RELEASING Y RESTRAINING BENDS*

En zonas donde los segmentos de falla son continuos, el rumbo de la falla puede cambiar localmente de una tendencia lineal a un pequeño círculo en la corteza terrestre. En estas zonas la curvatura (*bends*) de los planos de falla crean zonas de acortamiento o extensión de acuerdo si los dos lados de la curva convergen o divergen. Estas zonas son similares a aquellas formadas en los *step over*. Considerando esto, cuencas *pull apart*, zonas de subsidencia, sedimentación significativa de cuenca, fallamiento normal, alto flujo de fluidos y posible vulcanismo caracteriza a las *releasing bends* (Figura 2e), mientras que las *restraining bends* muestran levantamiento topográfico, acortamiento cortical, fallas inversas, pliegues, *push ups* y exhumación del basamento cristalino (Figura 2f) (Cunningham y Mann, 2007; Kearey *et al.*, 2009).

Tomando esto en cuenta, las *releasing* y *restraining bends* tectónicamente activas tienen relevancia social. Las *releasing bends* pueden: 1) crear cuencas *pull-apart* con acumulaciones sedimentarias significativas que pueden alojar hidrocarburos, depósitos metálicos, evaporitas y otros minerales industriales. 2) Pueden ser zonas de alto flujo de calor y dilatación cortical que puede ser explotada como energía geotérmica, como es el caso del Campo Geotérmico Cerro Prieto. 3) crear grandes valles que proveen tierras fértiles para la agricultura y áreas de urbanización (ej. Valle de Mexicali y Valle Imperial). Por su parte, las *restraining bends* pueden: 1) exhumar el basamento cristalino que puede contener importantes depósitos minerales. 2) Almacenar hidrocarburos en su interior. 3) Formar importantes altos topográficos que proveen importantes zonas de captación de agua y potenciales acuíferos subterráneos (Cunningham y Mann, 2007).

1.2.4. *STRIKE SLIP DUPLEX*, ABANICOS Y ESTRUCTURAS DE FLOR

El *strike slip duplex* es un arreglo superpuesto de dos o más bloques limitados por fallas y cuencas que ocurren entre dos o más límites de fallas. La cuenca delimitada por fallas que caracteriza el duplo típicamente es de forma lenticular. Los bloques definidos por las fallas de rumbo son comprimidos y levantados cuando las fallas convergen, y son tanto estirados como hundidos cuando las fallas divergen. Esta tendencia de fallas de rumbo a converger y divergir crea un patrón trenzado muy característico si se ve desde una vista de planta. Las fallas que siguen más de cerca la dirección del movimiento de placas, son más largas, y obtienen buzamientos casi verticales. Otras fallas en ángulo con respecto a la dirección general del movimiento pueden rotar alejándose del alineamiento principal de la falla y desarrollar buzamientos significativamente menos verticales, y así la falla involucre una componente de desplazamiento vertical. Si la curvatura de la falla se encuentra en una región de extensión, se desarrolla una falla normal oblicua; si es de compresión se desarrolla una falla inversa oblicua. Comúnmente también ocurren rotaciones significativas sobre los ejes verticales o casi verticales. En los extremos de las fallas de rumbo el desplazamientos puede disiparse a lo largo de conjuntos de fallas curvas que se conectan con la falla principal formando una especie de abanicos. Estas estructuras pueden registrar la deformación compresional o extensional de acuerdo a la curvatura y al sentido de movimiento de la falla principal (Figura 2g) (Kearey *et al.*, 2009).

En la Figura 2h se puede observar como los distintos cortes de la zona de falla convergen en profundidad produciendo una estructura geométrica muy característica conocida como estructura de flor. Estructuras de flor negativa son aquellas donde la ramificación de las fallas muestra en su mayoría desplazamientos normales debajo de una depresión. Estructuras de flor positivas son aquellas donde la ramificación de las fallas muestra en su mayoría desplazamientos inversos debajo de un *antiform* (Kearey *et al.*, 2009).

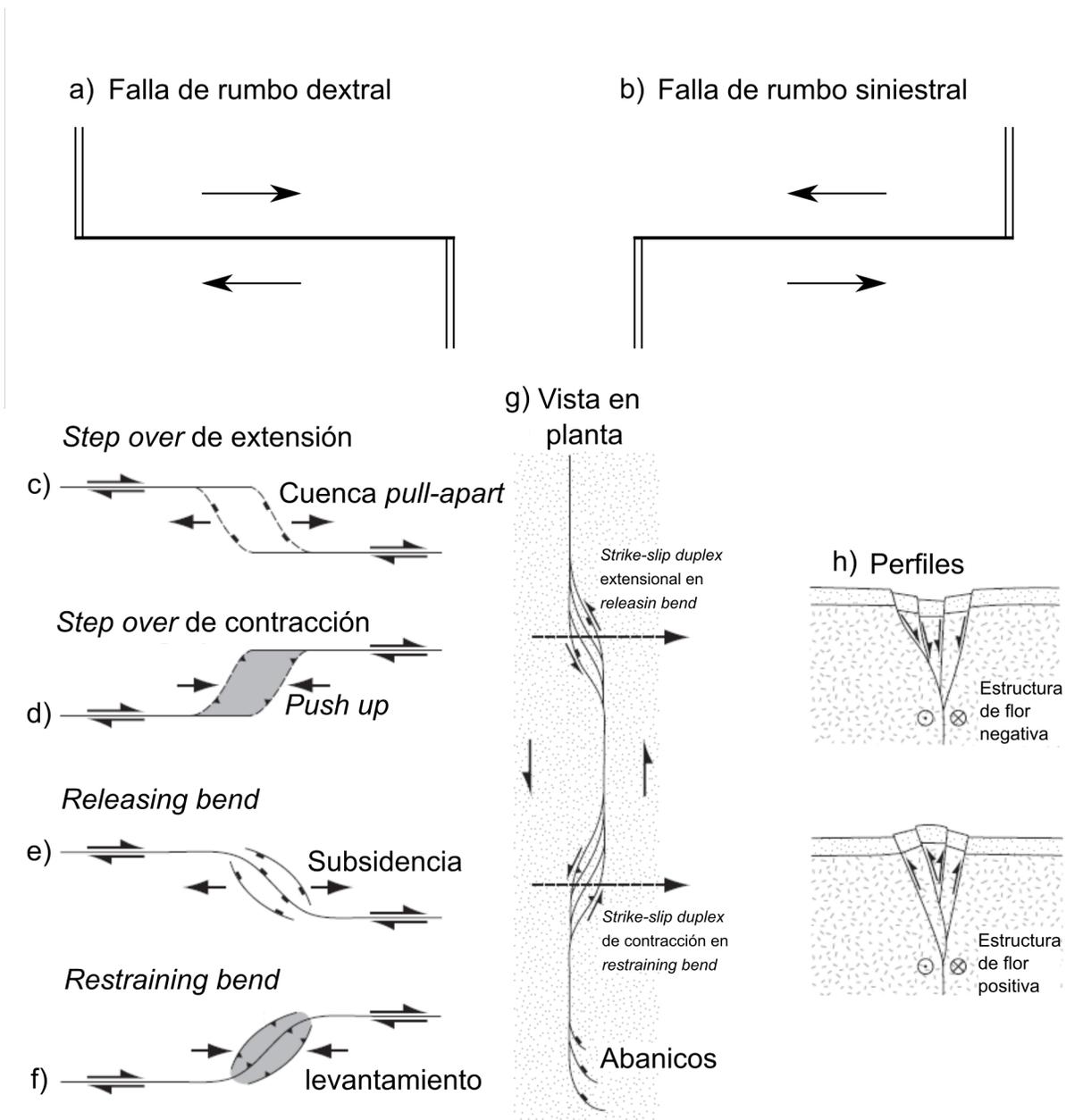


Figura 2: Estructuras geológicas típicas de una falla transformante. Tomado de [Kearey et al. \(2009\)](#).

1.2.5. SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Con el método de sismica de reflexión se busca inferir el contraste de impedancias acústicas entre dos litologías del subsuelo. Estas se encuentran directamente relacionadas a las propiedades intrínsecas de la roca (Telford *et al.*, 1990). Es de suma importancia que los perfiles sean orientados perpendiculares a deformación de las estructuras que se desea observar, es decir, perpendiculares a los trazos de falla y a los ejes de pliegues.

Dentro de las fallas transformantes el uso de este método tiene su principal aplicación en las cuencas *pull apart* o regiones donde existe relleno sedimentario (p. ej. el Mar Salton, Brothers *et al.* 2009 y la Cuenca 20°N, Rodriguez *et al.* 2019), y si es complementado por datos de pozos profundos, se puede disminuir la incertidumbre en la profundidad de las estructuras que yacen en el subsuelo de la zona de estudio (p. ej. la Cuenca del Mar Muerto, Al-Zoubi *et al.* 2002 y el Lago Kinneret, Reznikov *et al.* 2004). El alto costo de estos estudios los vuelven muy escasos para fines académicos, sin embargo las colaboraciones entre universidades y compañías petroleras ha hecho posible la implementación de este método en la academia.

1.2.6. SISMOLOGÍA PASIVA

Esta rama de la geofísica mide las mismas propiedades que el método sísmico de exploración, con la diferencia que se utiliza una fuente natural (sismos). Cuando se produce un sismo se genera una ruptura en la corteza, la cual a su vez genera ondas sísmicas que viajan hasta la superficie de la Tierra y son registradas en estaciones sísmicas (Telford *et al.*, 1990; Fowler, 1990). Estas ondas sísmicas son grabadas en forma de sismogramas, los cuales son registros del movimiento del subsuelo en un determinado lugar en función del tiempo (Tromp, 2019).

La información que se puede obtener de un sismo va desde su localización, magnitud, mecanismo focal, entre otras. A través de estos se pueden lograr interpretaciones sobre estructuras regionales como fallas activas y discordancias en el interior de la Tierra, especialmente en la corteza y manto [Fowler \(1990\)](#) así como estudios estadísticos, de peligro y riesgo sísmico.

1.2.7. GRAVIMETRÍA

La medición de la atracción gravitacional provee información de las estructuras y propiedades de la litósfera y el manto, debido a que las anomalías son pequeñas comparadas con el valor promedio de la Tierra (9.81 ms^{-2}) se utiliza la unidad miligal. Sin embargo como en la mayoría de los métodos geofísicos es necesario hacer una serie de correcciones a los datos adquiridos. Una de las anomalías más usadas es la de Bouguer, que cuenta con una corrección de aire libre y también tiene una corrección de Placa de Bouguer la cual asume que el material entre el nivel del mar y la elevación del punto de medición son de una longitud infinita, y posteriormente se agrega una corrección por terreno. Esta anomalía representa la atracción gravitacional de los materiales por debajo del nivel del mar ([Fowler, 1990](#)). Por otro lado, el modelado gravimétrico puede ser una excelente herramienta en regiones donde se tienen unidades sedimentarias y magmáticas ya que por sus diferentes densidades se pueden distinguir en el subsuelo.

1.2.8. MAGNETOMETRÍA

El campo magnético de la Tierra se puede decir que está compuesto por: un campo principal que varía muy poco, un campo pequeño de variación rápida que se origina en el exterior de la Tierra y las variaciones espaciales del campo magnético que son constantes en tiempo y espacio, estas últimas están relacionadas a anomalías magnéticas en la corteza superficial de la Tierra ([Telford et al., 1990](#)).

La magnetometría, en general, se refiere a la medición de la magnetización o el momento magnético de una muestra (Buchner *et al.*, 2018). El método magnetométrico, a pesar de ser un método potencial relativamente más complejo, es una técnica muy eficiente en la detección de ocurrencias geológicas con un alto contraste de susceptibilidad magnética en relación con sus entornos (Kearey y Hill, 2002), como podría ser, un intrusivo (alta susceptibilidad magnética) embebido en una cuenca sedimentaria (baja susceptibilidad magnética). La intensidad de magnetización de una roca depende en gran parte al volumen y características magnéticas de los sus minerales, a diferencia de la gravimetría que esta relacionada a la densidad de la roca (Lino *et al.*, 2018).

1.3. MARCO GEOLÓGICO

1.3.1. TECTÓNICA

El Valle de Mexicali junto con su zona de transición hacia el Golfo de California se caracteriza por una alta actividad sismotectónica que incluyen sismos históricos de hasta $M=7$, gran aporte de sedimentos provenientes de la meseta de Colorado (*Colorado Plateau*) traídos por el Río Colorado (Dorsey *et al.*, 2007; Dorsey, 2010), un límite de placas transformante controlado por grandes fallas dextrales que contienen cuencas tipo *pull-apart* dentro de los *step over* formados por dichas fallas, además de la presencia de campos y zonas geotérmicas como el Campo Geotérmico Cerro Prieto (Figura 3) (Arango Galván *et al.*, 2015).

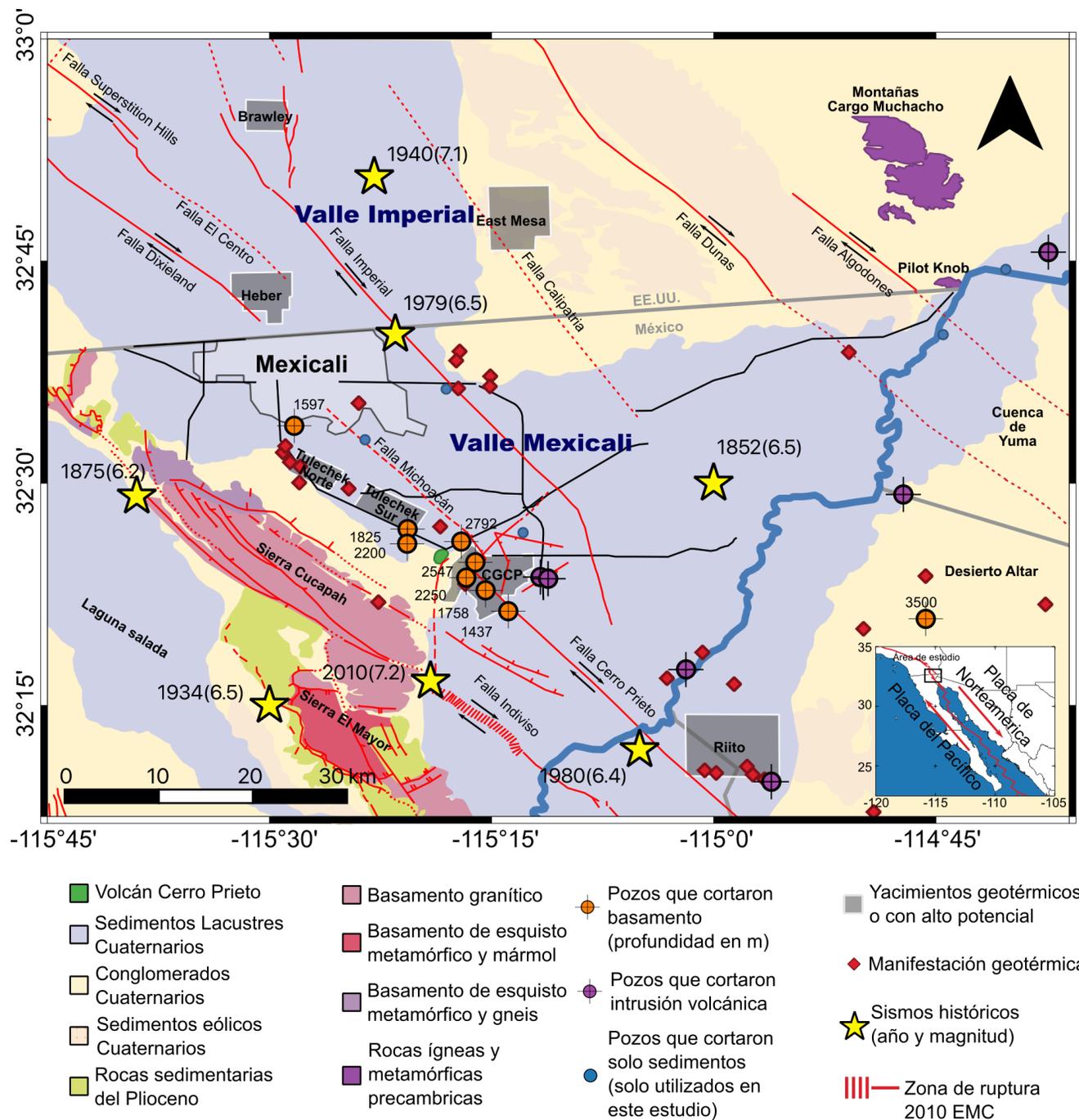


Figura 3: Geología superficial del área de estudio y principales estructuras geológicas. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas color negro indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígono gris claro indica la zona urbana de la ciudad de Mexicali. Manifestaciones y campos geotérmicos de EE.UU. reportados por California Department of Conservation y Arango Galván *et al.* (2015). Sismicidad historia reportada por (BSSA, 1916; Ellsworth, 1990; Felzer y Cao, 2008). Pozos reportados por Olmsted *et al.* (1973); Fonseca *et al.* (1981); Cobo y Bermejo (1982); Lira (2005); Pacheco *et al.* (2006); Prol Ledesma *et al.* (2018). Abreviaturas: Campo Geotérmico Cerro Prieto—CGCP.

La evolución tectónica del Valle de Mexicali está influenciada principalmente por el marco geodinámico del Golfo de California, como lo muestra la Figura 4. Previo a los 28 Ma el centro de dispersión entre las placas de Pacífico y Farallón se acerca a la zona de subducción entre las placas Farallón y Norteamérica. Para los 20 Ma, el centro de dispersión entre las placas del Pacífico y Norteamérica creó movimiento de placa transformante dextral. La Provincia Extensional de Cuencas y Sierras acomodó extensión moderada en todo el oeste de Norteamérica. El límite de placas se formó a los 12 Ma, cuando las placa del Pacífico y Norteamérica entraron en contacto directo (Lonsdale, 1989; Stock y Lee, 1994), el Punto Triple de Rivera migró a lo largo de toda la Península de Baja California, alargando el límite transformante Pacífico-Norteamérica. El periodo del Proto-Golfo de California comenzó con esfuerzo transtensional distribuido a través de dos cinturones de deformación transtensional, al oeste y este de la Microplaca de Baja California. Hacia el final de la etapa en que existió el Proto-Golfo la deformación por cizallamiento gradualmente se fue localizando dentro de un cinturón delgado de zonas de cizalla dextral escalonadas, y a su vez dentro de la Provincia Extensional de Sierras y Cuencas. Estas zonas de cizalla y regiones de extensión intermedias, experimentaron esfuerzos de alta magnitud (Bennett *et al.*, 2013). Para los 6 Ma el límite de placas tuvo un cambio de régimen tectónico de extensión a transtensión (Oskin *et al.*, 2001; Oskin y Stock, 2003), los esfuerzos del límite de placas Pacífico-Norteamérica se localizaron y enfocaron en el adelgazamiento de la corteza y subsidencia en las cuencas *pull apart* que formaron el Golfo de California (Bennett *et al.*, 2013) .

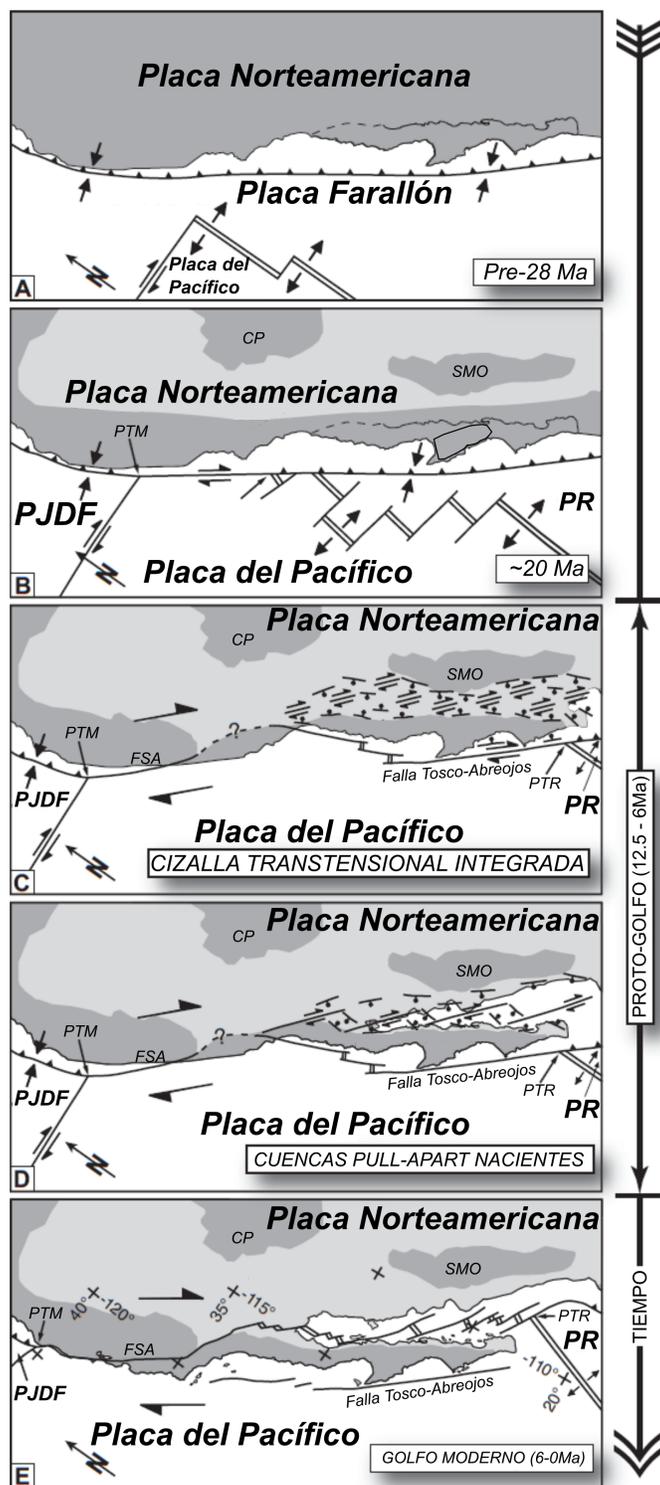


Figura 4: Modelo para la evolución tectónica del Golfo de California. Las fallas mostradas representan estructuras primarias activas durante el Cuaternario. Abreviaturas: Placa Rivera—PR, Placa Juan de Fuca—PJDF, Punto Triple Rivera—PTR, Punto Triple Mendocino—PTM, Falla de San Andrés—FSA, Colorado Plateau—CP, Sierra Madre Occidental—SMO. Modificado de [Bennett et al. \(2013\)](#).

En la actualidad las principales estructuras tectónicas que dominan la región del Valle de Mexicali son: la Cuenca *pull apart* Cerro Prieto, las Fallas Cerro Prieto e Imperial y a partir del sismo El Mayor-Cucapah (SMC; 2010, M=7.2), está presente la Falla Indiviso (Hauksson *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2011; Fletcher *et al.*, 2014, 2016). Este sistema de fallas representa la prolongación hacia el sur del Sistema de Fallas San Andrés, que a su vez en conjunto con el Sistema de Fallas del Golfo de California conforman el límite transformante entre las placas tectónicas de Norteamérica y Pacífico. Este sistema de fallas transformantes tiene una orientación NW-SE, entre ellas se crean centros de dispersión que le dan una forma escalonada a todo el sistema. Los últimos estudios han tratado de responder como están conectadas las fallas reportadas en el Valle Imperial (Superstition Mountains, Superstition Hills) con el Valle de Mexicali.

A partir del modelo *Uniform California Earthquake Rupture Forecast* (UCERF3) (Field *et al.*, 2014) han propuesto una tasa de deslizamiento de 35 mm/a (milímetros por año) para la Falla Imperial como se observa en la Figura 5. Sin embargo, estudios más recientes discrepan sobre este valor dado, proponiendo tasas de deslizamiento que van desde los 12.7 a hasta los 25 mm/a (Thomas y Rockwell, 1996; Lindsey y Fialko, 2016; Dorsett *et al.*, 2019) y la existencia de otras fallas ocultas, como la Falla El Centro, a las que se les puede atribuir esta diferencia de valores de tasa de deslizamiento para la Falla Imperial (Dorsett *et al.*, 2019). Sin embargo el principal problema con estos modelos es la falta de información y de cartografía de las fallas en el Valle de Mexicali, donde solo se toma en cuenta la Falla Imperial y la Falla Cerro Prieto, la cual, por cierto no se sabe si continúa hacia el norte como la Falla Michoacán ni la manera en que están conectadas.

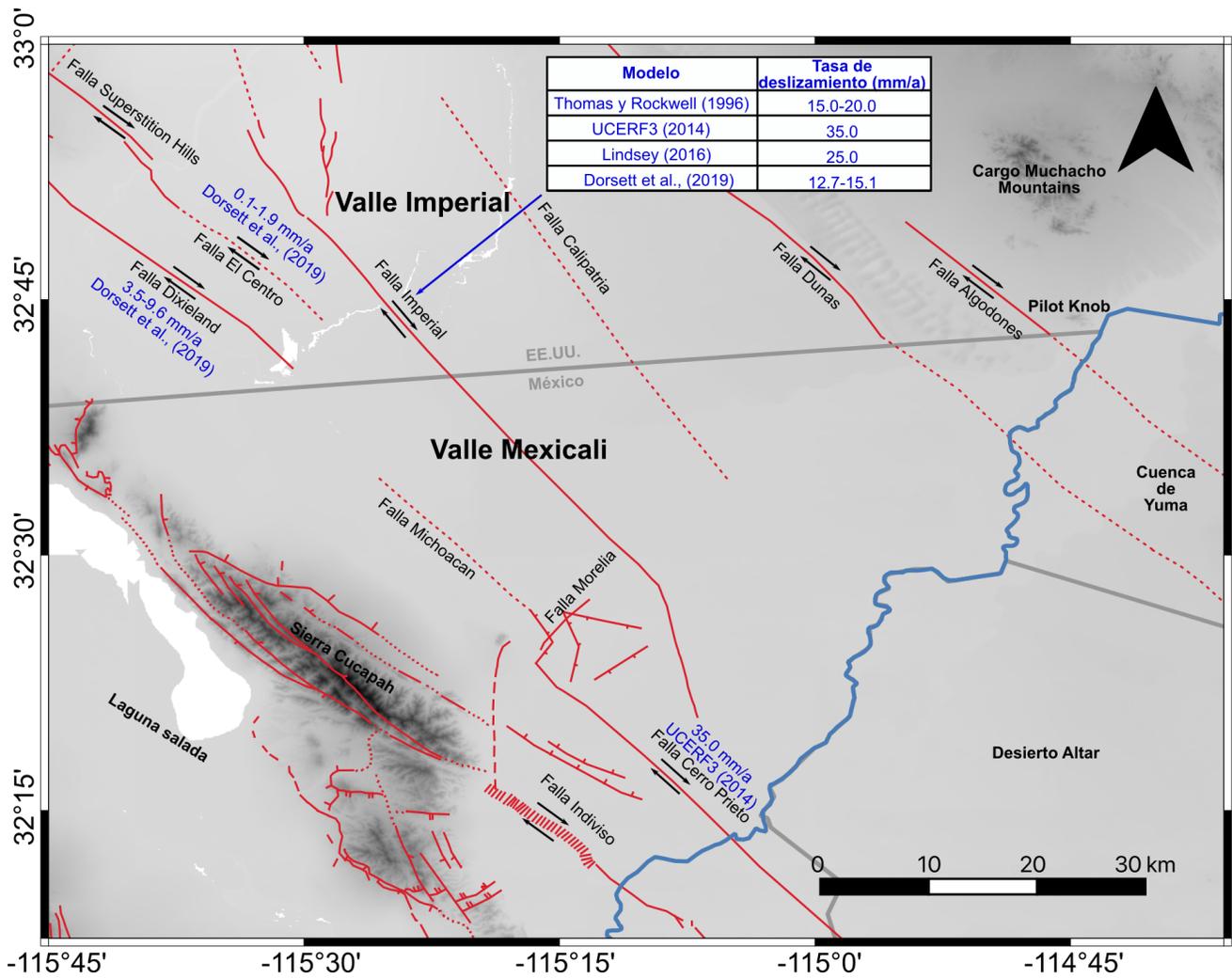


Figura 5: Mapa tectónico del Valle de Mexicali e Imperial y las tasas de deslizamiento modeladas para las principales fallas. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, flechas negras indican el movimiento de las fallas, letras azules indican las tasas de deslizamiento propuestas por diversos autores (Thomas y Rockwell, 1996; Field et al., 2014; Lindsey y Fialko, 2016; Dorsett et al., 2019).

1.3.2. PELIGRO SÍSMICO EN EL VALLE DE MEXICALI

El Valle de Mexicali, por su régimen tectónico, se ha reconocido como una región sísmicamente activa y de acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993) se encuentra dentro de la región categorizada como tipo D (mayor riesgo) como se observa en la Figura 6. Dentro de este valle se ubica la ciudad capital de Mexicali, que en el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año 2020 resultó en una población de 1,049,792 habitantes, lo cual implica que dicha población, más la que se ubica dispersa en todo el valle, esta en continuo peligro y riesgo sísmico.

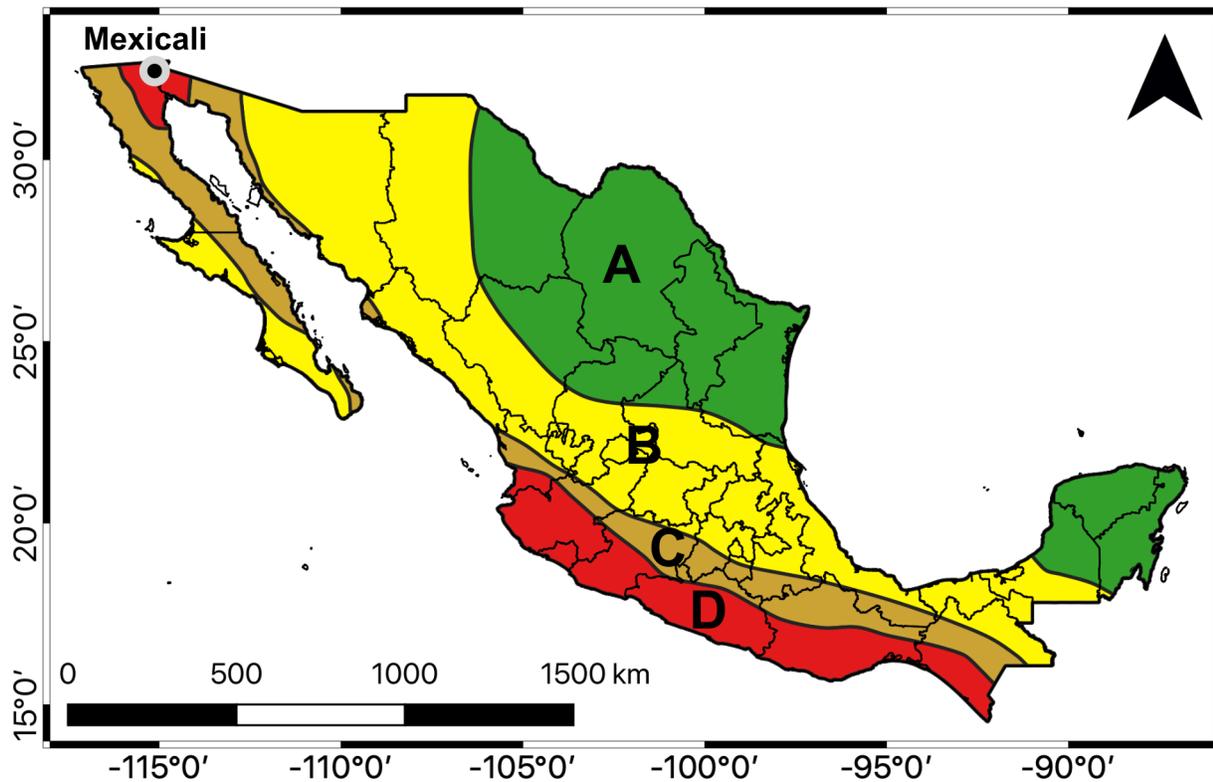


Figura 6: Regiones sísmicas de la República Mexicana (CFE, 1993).

Tomando en cuenta lo anterior es necesario realizar estudios de peligro sísmico en esta región para poder elaborar atlas de riesgo sísmico. Sin embargo es necesario primero diferenciar estos dos conceptos. El peligro sísmico es la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico específico en una zona dada. Por otro lado, el riesgo sísmico es la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de que un sismo cause un cierto efecto definido como pérdida o daño en un lugar determinado (Nava, 2002). La gran diferencia entre estos dos términos es que el riesgo sísmico puede ser reducido por acciones del hombre, mientras que el peligro sísmico no.

Con todo esto, es de gran importancia tener la mayor cantidad de conocimiento sobre las estructura geológicas de esta región ya que estas pueden generar sismos de magnitud importante. Ley García *et al.* (2011) realizaron una zonificación por fallas para el municipio de Mexicali en el Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali, que permitió identificar las localidades y zonas urbanas expuestas. Planteando que una parte de la Ciudad de Mexicali puede encontrarse expuesta a fallas, así como 153 localidades del Valle de Mexicali de distinto tamaño y estableciendo que aproximadamente el 8 % de la población del valle se encuentra expuesta. Sin embargo, los estudios de este tipo solo han tomado en cuenta las fallas geológicas hasta ahora documentadas. Por otra parte, estudios de sísmica de reflexión multicanal han reportado una gran cantidad de fallas sepultadas por sedimentos (Chanes Martínez *et al.*, 2014; González Escobar *et al.*, 2020), cabe recalcar que gran parte de dichas fallas no habían sido reportadas con anterioridad, por lo que todo el conocimiento que se pueda continuar aportando a través de estas metodologías sobre la estructura del subsuelo en el Valle de Mexicali ayuda a mejorar los estudios de peligro sísmico.

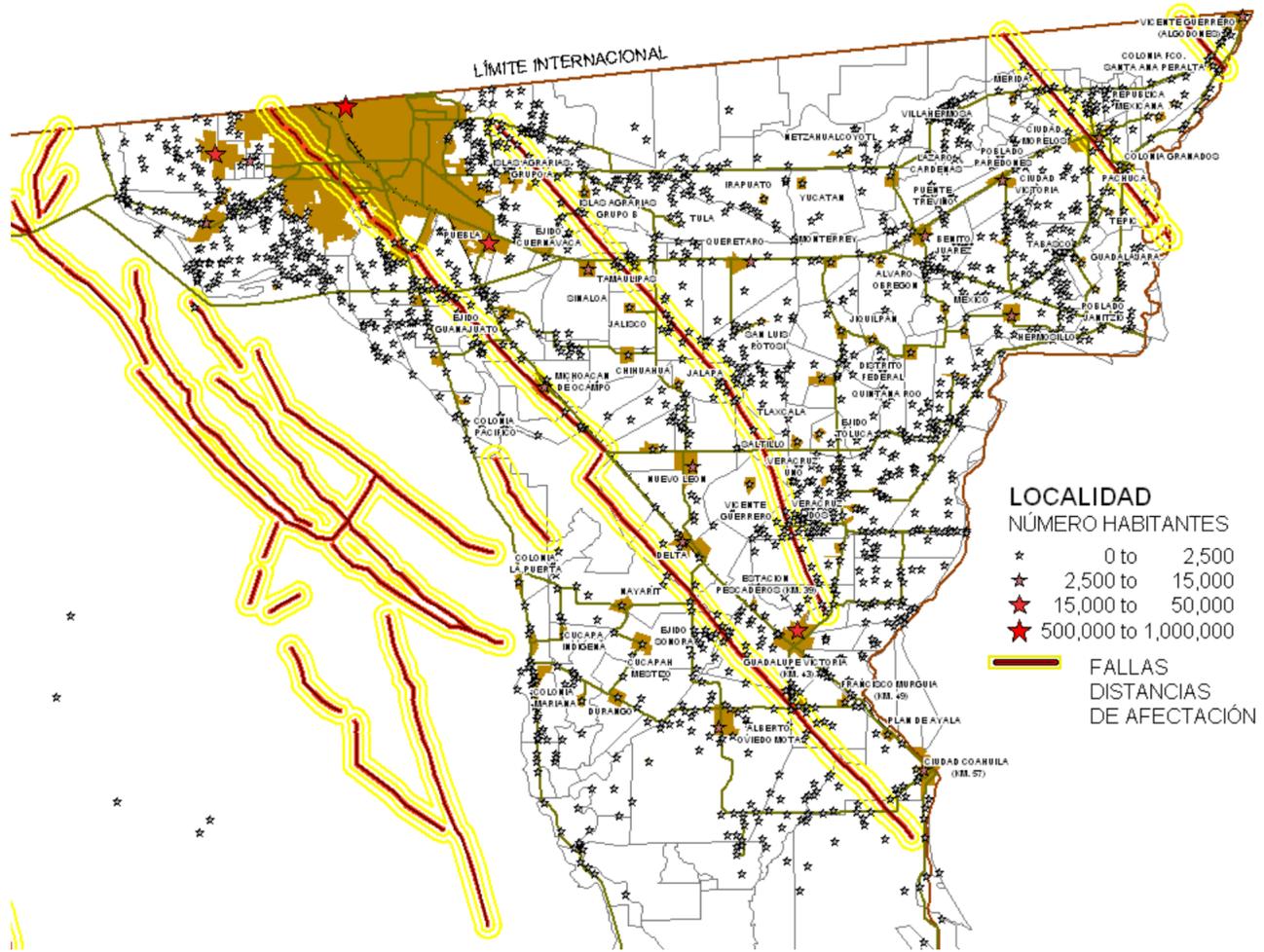


Figura 7: Zonificación por fallas en el Municipio de Mexicali. Tomado de [Ley García et al. \(2011\)](#).

1.3.3. GEOTERMIA

El Valle de Mexicali está incluido dentro de la provincia geotérmica CV3-CP (Cerro Prieto) de acuerdo a CFE, esta provincia es dominada por convección, debido a procesos extensionales y de *rifting* continental relacionados a la apertura del Golfo de California ([Prol Ledesma y Morán Zenteno, 2019](#)).

En esta región los centros de dispersión que se forman en el traslape de las fallas transformantes se encuentran sepultados por sedimentos que han sido arrastrados principalmente por el Río Colorado, contrario a la parte sur del Golfo de California donde estos centros de dispersión se encuentran expuestos, lo que ha dado como resultado la creación de cuencas de tipo *pull apart*. Dentro del sistema de fallas Indiviso, Cerro Prieto e Imperial se encuentra el Delta del Río Colorado, el cual tiene una superficie de 8600 km² (Elders *et al.*, 1972; Dorsey, 2010), con espesores sedimentarios mayores a los 5 km (Chanes Martínez *et al.*, 2014), y su evolución se determina básicamente por la interacción de dos procesos sedimentológicos importantes: el aporte de sedimentos del Río Colorado (Phillips, 1964) y los ciclos de mareas semi-diurnas. Por otro lado, las rocas volcánicas presentes en el área fueron producidas por el Volcán Cerro Prieto, que está ubicado en la vecindad del Campo Geotermico Cerro Prieto, las sucesiones volcánicas han sido caracterizadas con muestras de pozos geotérmicos profundos de este mismo campo, presentando: basalto, basalto-andesítico, andesitas y dacitas, todo perteneciente al Holoceno (Suárez Vidal y Quintanilla Montoya, 1996). Mucha de la información geológica que se tiene del Valle de Mexicali es debido al estudio del Campo Geotermico Cerro Prieto, que cuenta con 570 Mwe de capacidad instalados siendo el campo geotérmico más grande de México y el segundo campo más importante del mundo solo detrás de Geysers (Gutiérrez Negrín *et al.*, 2020).

Derivado de la importancia energética que tiene este campo geotérmico, Lira (2005) y Dumas (2010) han realizado modelos geológicos, proponiendo tres unidades de basamento: 1) Unidad de Basamento metamórfico con edad del Paleozoico-Mesozoico, probablemente similar a las rocas graníticas, gneis y esquistos reportadas por Olmsted *et al.* (1973) en la Cuenca de Yuma, 2) Unidad de Basamento Granítico identificado en distintos pozos mostrados en la Figura 3 con edades del Cretácico Tardío y 3) Unidad de Intrusivo Máfico de composición básica con edad del Plioceno. Sobreyaciendo este basamento se encuentran 3 unidades sedimentarias: 1) Unidad de Lutita Gris, que consta de sedimentos continentales compuestos de lutitas color gris con intercalaciones de areniscas, que descansan sobre el basamento, sobreyaciendo esta unidad se encuentra 2) la Unidad de Lutita Café que consta de lutitas y lutitas limolíticas color café intercaladas con areniscas

y arenas muy permeables, y finalmente sobre toda esta secuencia encontramos 3) la Unidad de Sedimentos Clásticos No Consolidados (SCNC) compuesta de arcillas, limos, arenas y escasas gravas (Figura 8).

Esta provincia continúa hacia el norte en el Valle Imperial incluyendo varios campos geotermicos (p. ej. Brawley, East Mesa y Heber). Sin embargo muchos de estos yacimientos son de tipo *ocultos* (Dobson, 2016) y han sido descubiertos de manera accidental por perforaciones en busca de hidrocarburos. Cabe recalcar que este tipo de yacimientos no genera manifestaciones geotérmicas en superficie por lo cual conocer las estructuras geológicas del subsuelo como las fallas juega un papel muy importante, y hasta ahora en su mayoría se utilizan métodos eléctricos y de potencial espontaneo para su caracterización (Garg *et al.*, 2010). Por consiguiente es muy probable que en el Valle de Mexicali existan este tipo de yacimientos geotérmicos tanto con manifestaciones en superficie (Arango Galván *et al.*, 2015) como con poca o nula manifestación en superficie.

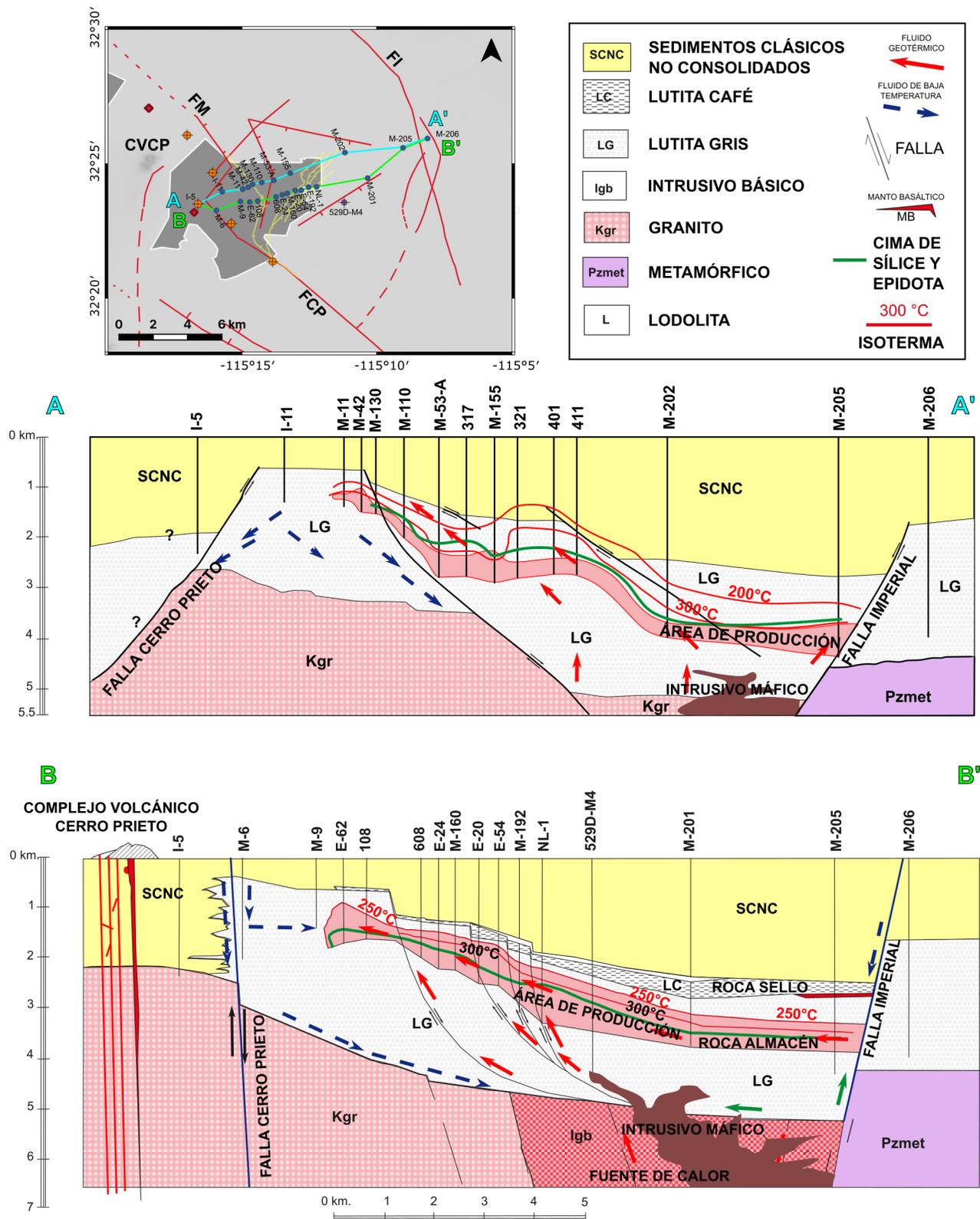


Figura 8: Modelos del Campo Geotérmico Cerro Prieto propuestos por Lira (2005) y Dumas (2010). En mapa: Líneas color rojo indican fallas, línea celeste indica el perfil propuesto por Dumas (2010), línea color verde indica el perfil propuesto por Lira (2005), círculos color azul indican pozos que terminaron en sedimentos, círculos color naranja indican pozos que cortaron basamento, círculo color morado indica pozo 529-M4 que corto intrusivo máfico (García Sánchez et al., 2017). Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Michoacán—FM, Campo Volcánico Cerro Prieto—CVCP.

Con todo esto, el Valle de Mexicali alcanza casi los 200 mW/m^2 de flujo de calor (Figura 9), por lo tanto, el gradiente geotérmico es de aproximadamente $100 \text{ C}^\circ/\text{km}$ y la capa sedimentaria provee buena permeabilidad en la reserva geotérmica (Prol Ledesma y Morán Zenteno, 2019).

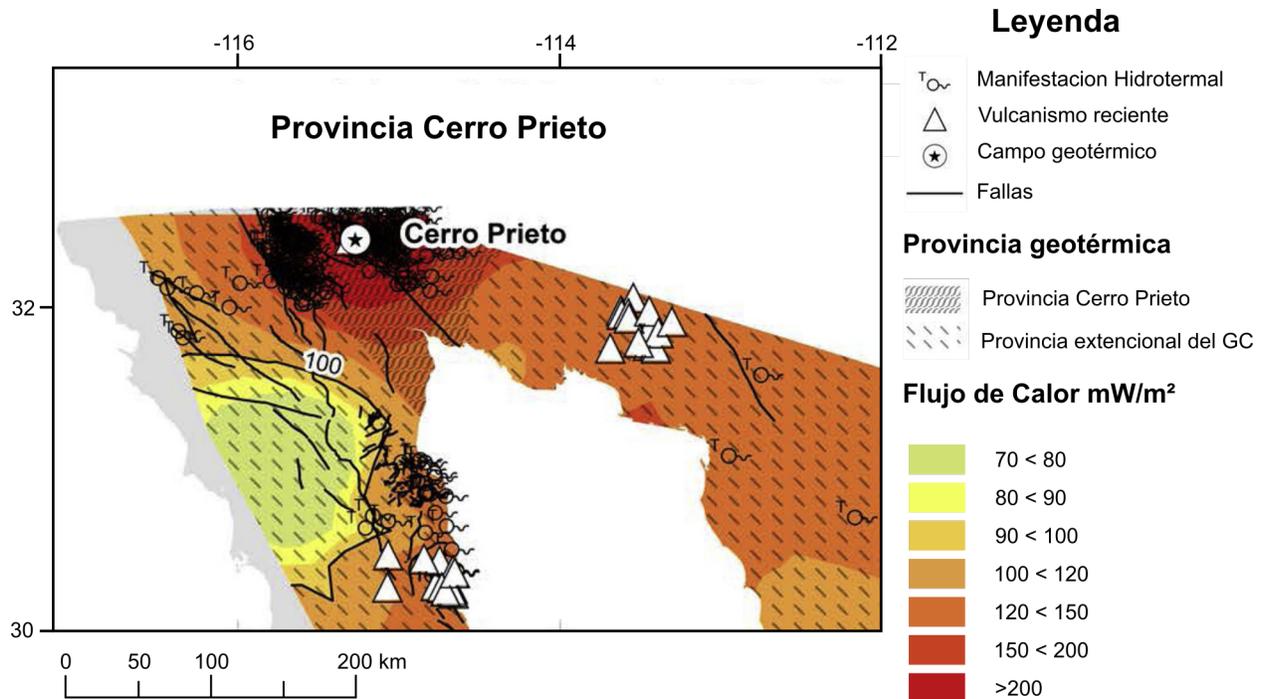


Figura 9: Provincia CV3-CP (Cerro Prieto). Flujo de calor, manifestaciones hidrotérmicas, vulcanismo reciente (edad $\leq 3\text{Ma}$). Tomado y modificado de Prol Ledesma y Morán Zenteno (2019).

1.4. ANTECEDENTES

Como ya se ha comentado con anterioridad, hay una extensa variedad de estudios geofísicos que van desde la década de los 70's hasta la actualidad. Sin embargo, la gran mayoría de estos estudios están centrados en el CGCP debido a su importancia energética. A continuación se presentan algunos de los principales estudios geofísicos realizados en el Valle de Mexicali (Figura 10) y sus principales aportes.

Hablando de estudios sismológicos, más en específico de sísmica de refracción, uno de los más importantes fue el realizado por [Puente y De la Peña \(1978\)](#) donde a partir de varios perfiles de refracción que cubren desde el CGCP hasta el sur de la ciudad de Mexicali con una geometría perpendicular a las fallas dominantes de la región, obtienen información importante sobre la extensión de la Falla Michoacán hacia el norte del CGCP. Por otro lado, estudios más recientes, a partir de sísmica de refracción de alto ángulo a lo largo del eje (NW-SE) del Mar de Salton, California y que incluye un sector del noreste del Valle de Mexicali, [Han et al. \(2016\)](#) reportaron a nivel de corteza superior velocidades de onda P de 4 km/s a una profundidad de 3 km con un alto gradiente que cambia rápidamente a >6 km/s con respecto a la profundidad y observando un relieve relativamente plano. Por otro lado [Persaud et al. \(2016\)](#) reportaron una cuenca en forma de cuña en el extremo sur del sistema de fallas de San Andrés, así como, una velocidad de onda P de 5.65 km/s para el basamento del Valle Imperial y que profundiza hasta los 5.2 km aproximadamente en el centro del valle, zonas de baja velocidad de onda P relacionadas a zonas de fallas y regiones de alta velocidad al este del Valle Imperial probablemente ocasionadas por actividad geotérmica.

Se han aplicado otros métodos geofísicos a la región, en los que destacan los trabajos de: [\(Razo et al., 1978\)](#) quien con datos de resistividad adquiridos por la CFE en 1977-1978 obtienen perfiles de resistividades para el Valle de Mexicali describiendo zonas de baja resistividad al SE del Campo Geotérmico Cerro Prieto y a lo largo de un sector de la Falla imperial. Por otro lado, [Hernández Márquez \(2016\)](#), realiza un modelado tridimensional e interpretación del Valle de Mexicali a partir de datos gravimétricos proporcionados por PEMEX, donde propone una configuración de profundidad para la corteza (superior + inferior) y profundidades de 7-8 km para la cubierta sedimentaria del Valle de Mexicali, así como el trazo a profundidad de las principales fallas geológicas, como las fallas Imperial y Cerro Prieto, e infiriendo nuevas fallas.

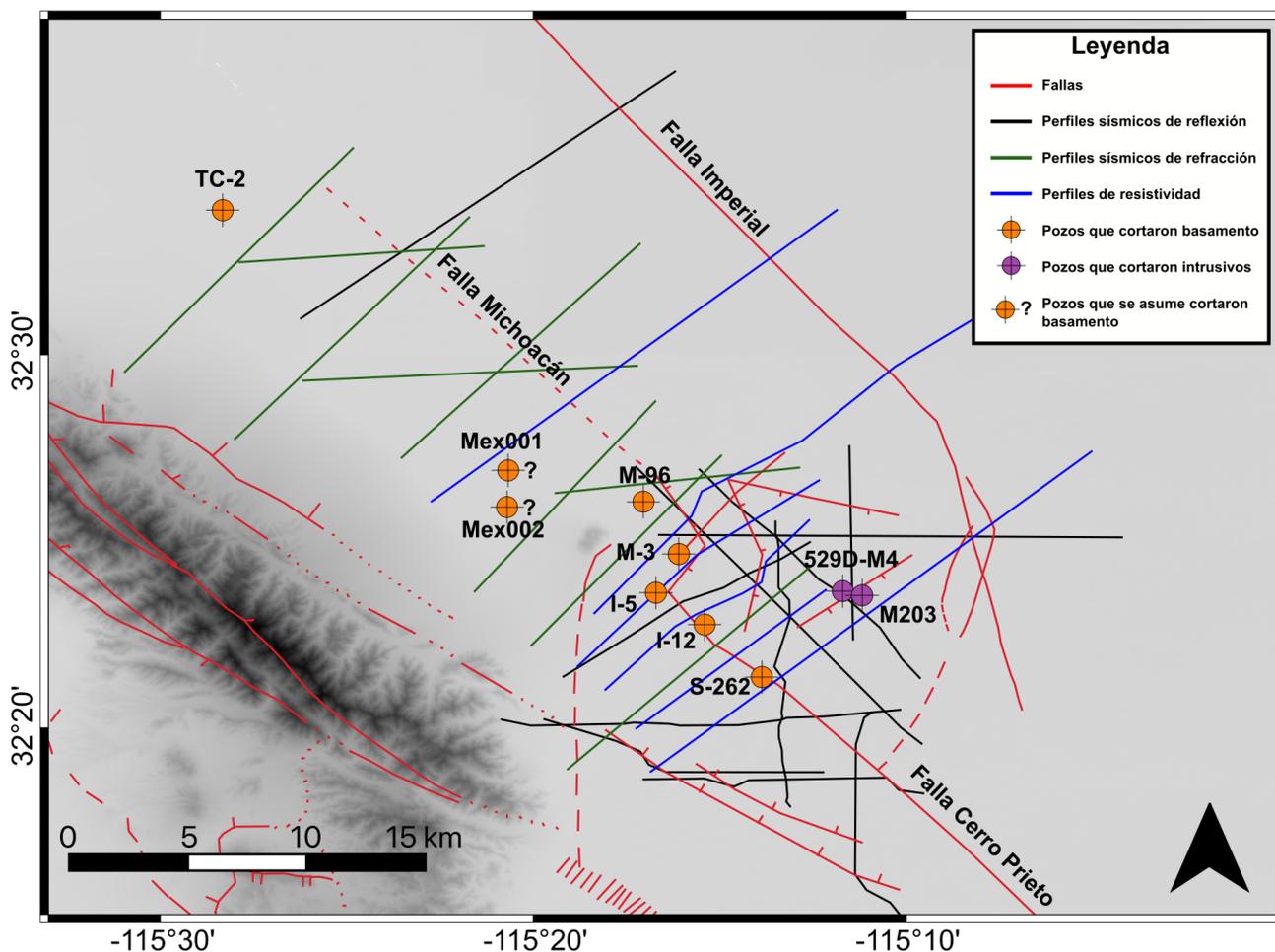


Figura 10: Antecedentes de estudios geofísicos en el Valle de Mexicali. Fallas tomadas de [Lira \(2005\)](#); [Fletcher et al. \(2016\)](#); [González Escobar et al. \(2020\)](#), perfiles de sísmica de reflexión reportados por [Majer y McEvelly \(1982\)](#); [Fonseca et al. \(1981\)](#); [González Escobar et al. \(2020\)](#), perfiles de sísmica de refracción reportados por [Puente y De la Peña \(1978\)](#), perfiles de resistividad reportados por [Razo et al. \(1978\)](#), pozos reportados por [Cobo y Bermejo \(1982\)](#); [García Sánchez et al. \(2017\)](#); [Prol Ledesma et al. \(2018\)](#).

Refiriéndose a sísmica de reflexión 2D existen numerosos trabajos en la región. Comenzando al principio de los 80's con [Lyons y Van de Kamp \(1980\)](#) que reportan las primeras secciones sísmicas en el área de CGCP proponiendo varias fallas y estructuras, seguido de [Majer y McEvelly \(1982\)](#) quien también centra sus perfiles en el CGCP y finalmente para esta época [Fonseca et al. \(1981\)](#) reporta perfiles sísmicos tanto para el CGCP como para sus regiones aledañas. Todos estos trabajos mostraron las primeras imágenes sísmicas del Valle de Mexicali y proponiendo las primeras estructuras geológicas. De manera más reciente, [Chanes Martínez et al. \(2014\)](#) reportaron una gran cantidad de estructuras sepultadas por los sedimentos en un sector al suroeste del Valle

de Mexicali, así como algunas características de los depocentros de dichas cuencas. Y finalmente [González Escobar *et al.* \(2020\)](#) reporta perfiles sísmicos al sur del CGCP. Teniendo todo esto en cuenta se observa una gran cantidad de trabajos puntuales en el CGCP, dejando de lado el resto del valle. Por esta razón, la región de estudio es un área de oportunidad muy grande para analizar las características tectonoestratigráficas y estructurales de una zona con: 1) gran actividad sísmica, 2) sismos históricos de magnitud alrededor de M 7.2, 3) sedimentos con espesores importantes, 4) campos y zonas geotérmicas, 4) centros de población y 5) la presencia de un límite de placas.

Por lo que el principal interés del presente trabajo es cartografiar la estructura del subsuelo en el Valle de Mexicali, lo cual incluye, fallas sepultadas por sedimentos, estructuras sedimentarias y zonas de interés geotérmicas, a partir de diferentes métodos geofísicos, principalmente sísmica de reflexión 2D.

1.5. HIPÓTESIS

La información sísmica de reflexión terrestre 2D complementada por otros métodos geofísicos como: gravimetría, magnetometría y sismicidad, sirve para identificar fallas activas y estructuras geológicas, con el fin de ampliar el conocimiento tectónico, que auxilie en la evaluación de peligro sísmico y complemento en la exploración geotérmica del Valle de Mexicali.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo es estudiar la estructura del subsuelo del Valle de Mexicali utilizando principalmente perfiles sísmicos de reflexión terrestre 2D complementados por otros métodos geofísicos como: gravimetría, magnetometría y sismicidad, con el fin de aportar al conocimiento tectónico y encontrar nuevas estructuras geológicas que sean de relevancia para el análisis de peligro sísmico y exploración geotérmica en la región.

1.6.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Procesar perfiles de información sísmica terrestre 2D que generen imágenes del subsuelo del Valle de Mexicali.
2. Interpretar estructuras geológicas en los perfiles de información sísmica terrestre 2D previamente procesados.
3. Generar mapas de horizontes sísmicos importantes a través de la información procesada.
4. Convertir de tiempo a profundidad perfiles sísmicos tomando en cuenta pozos profundos cercanos.
5. Generar mapa de señal analítica de la anomalía de Bouguer, de la Reducción al Polo del Campo Magnético y señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo del Valle de Mexicali.
6. Obtener un modelo gravimétrico-magnético 2D que tome en cuenta datos de pozos profundos e información de perfiles sísmicos de reflexión terrestre 2D y sea en dirección transversal a las principales fallas del Valle de Mexicali.

1.7. METAS

1. Entender de mejor manera las estructuras que yacen en el Valle de Mexicali y su interacción con las estructuras de las regiones colindantes (Valle Imperial y Desierto de Altar).
2. Comprender de mejor manera los procesos que desencadenan la sismicidad en esta región.
3. Describir estructuras geológicas que representen zonas con potencial geotérmico que no muestren manifestaciones en superficie.
4. Describir fallas geológicas que ayuden en la evaluación de peligro sísmico.

1.8. METODOLOGÍA

1.8.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una recopilación y revisión de la bibliografía sobre la región de la Depresión Salton, dentro de la cual se localizan los valles de Mexicali e Imperial. Todo esto con la finalidad de conocer trabajos previos que hayan utilizado metodologías similares a las presentadas en este estudio vistos desde el punto de vista tectónico, geotérmico y de peligro sísmico, con el fin de tener un panorama más amplio del área de estudio.

1.8.2. REVISIÓN DE BASE DE DATOS SÍSMICOS

Se realizó una revisión de la base de datos de perfiles sísmicos en el Valle de Mexicali. Todo esto con el fin de definir la información sísmica adecuada para trabajar y si algún perfil sísmico necesita reprocesamiento. Para elegir los perfiles se realizó lo siguiente:

- ✦ Se cotejó que el número de tiros sísmicos que contiene el archivo donde se almacenan los datos digitalmente (segy) concuerde con los reportes de campo y prevenir que este incompleto.
- ✦ Se realizó un control de calidad de cada tiro sísmico a nivel monitor (cualitativamente). Durante este control de calidad se buscaron errores en las trazas sísmicas como: ruido incoherente (lluvia, aire, antropogénico), trazas muertas (sin información) y errores de grabación (geófonos mal plantado, errores instrumentales). También se determinó la viabilidad del perfil sísmico

1.8.3. GENERACIÓN DE GEOMETRÍAS

Las geometrías de los datos sísmicos se obtuvieron a partir del escaneo de un mapa proporcionado por PEMEX. En este mapa se tenían dibujados los perfiles sísmicos, este mapa se escaneó y georeferenció para posteriormente cotejarlo con los reportes de campo. Una vez realizado esto, se generó un archivo SPS (Shell Processing Support) el cual es un archivo ascii estandarizado por la SEG (Sociedad de Exploración Geofísica) para el almacenamiento de geometrías. En este archivo se almacenan las coordenadas geográficas de las estaciones fuentes, geófonos y su relación.

1.8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS

Se procesaron un total de 12 perfiles sísmicos con longitud total de 250 km lineales aproximadamente. Se utilizó una secuencia de procesamiento de migración post-apilamiento en tiempo que constó de lo siguiente: 1) asignación de geometría, 2) correcciones estáticas de elevación, 3) correcciones estáticas de refracción, 4) deconvolución, 5) estáticas residuales, 6) análisis de velocidad, 7) apilamiento, 8) escalado de amplitudes consistentes en superficie, 9) corrección DMO (dip moveout), 10) migración. Todo esto conforme a [Yilmaz \(2001\)](#). La Figura 11 muestra el diagrama de dicha secuencia de proceso.

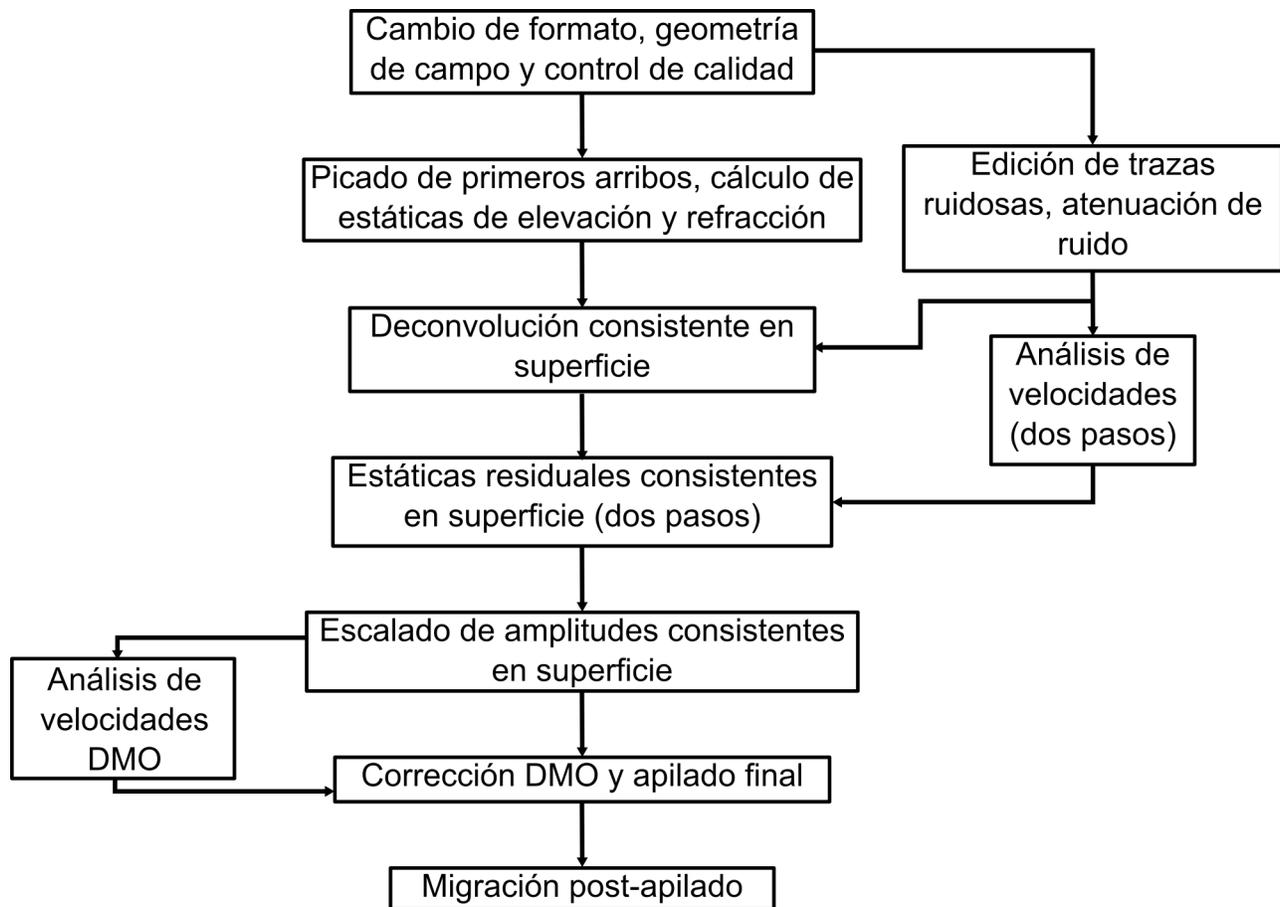


Figura 11: Secuencia de procesamiento utilizada. Modificado de [Yilmaz \(2001\)](#).

1.8.5. CONVERSIÓN TIEMPO—PROFUNDIDAD

Las secciones sísmicas se obtienen en el dominio del tiempo (tiempo de viaje doble), sin embargo para realizar una interpretación estructural es necesario llevarlas al dominio de la profundidad. Para esto hacemos uso de las velocidades sísmicas obtenidas del procesamiento. En esta etapa se realiza el modelado de velocidades sísmicas y la meta es generar un modelo robusto que prediga la velocidad vertical correcta y precisa en el perfil ([Etris *et al.*, 2001](#)). En este trabajo se realizó la conversión a profundidad en 2 perfiles sísmicos (33 y 19) debido a que contaban con 3 pozos profundos que se utilizaron para ajustar las velocidades sísmicas. Para este proceso se utilizó el software comercial Promax 2D. La imagen final se observa más adelante (Figura 17) en el capítulo de Resultados.

1.8.6. INTERPRETACIÓN DE DATOS SÍSMICOS

La interpretación de los perfiles sísmicos se llevó a cabo en el software libre Opendtect, donde se pudieron identificar fallas, sismorefectores, discontinuidades y límites litológicos. La interpretación se complementó con, mapas de anomalía de Bouger, señal analítica de la anomalía de Bouger, campo magnético total, reducción al polo del campo magnético, señal analítica de la reducción al polo del campo magnético, hipocentros de sismicidad, mecanismos focales de sismos $M \geq 3$. Para mejorar la interpretación final se utilizaron complementariamente los trabajos de [Puente y De la Peña \(1978\)](#); [Razo *et al.* \(1978\)](#); [Fonseca *et al.* \(1981\)](#); [Lira \(2005\)](#) principalmente.

1.8.7. INFORMACIÓN SÍSMICA DE REFLEXIÓN 2D

Para la realización de este estudio se utilizaron perfiles de sísmica de reflexión multicanal 2D adquiridos durante la década de los 80's por Petróleos Mexicanos (PEMEX). De acuerdo con los reportes de observador, para la adquisición de los datos se utilizaron 4 vibradores como fuente sísmica y 48 canales por tiro. El intervalo de muestreo fue de 4 ms con una longitud de grabación de 5 segundos. El diseño de adquisición de los perfiles sísmicos fue de dos maneras: 1) espaciamiento de estaciones receptoras 100 m y espaciamiento de estaciones fuente 50 m dando como resultado una resolución horizontal de 25 m. 2) espaciamiento de estaciones receptoras 140 m y espaciamiento de estaciones fuente de 70 m dando como resultado una resolución horizontal de 35 m. Las configuraciones de tendido utilizadas fueron lateral arrastrando el tendido, lateral empujando el tendido y bilateral asimétrico, lo cual generó apilamiento nominal de 12 hasta 24.

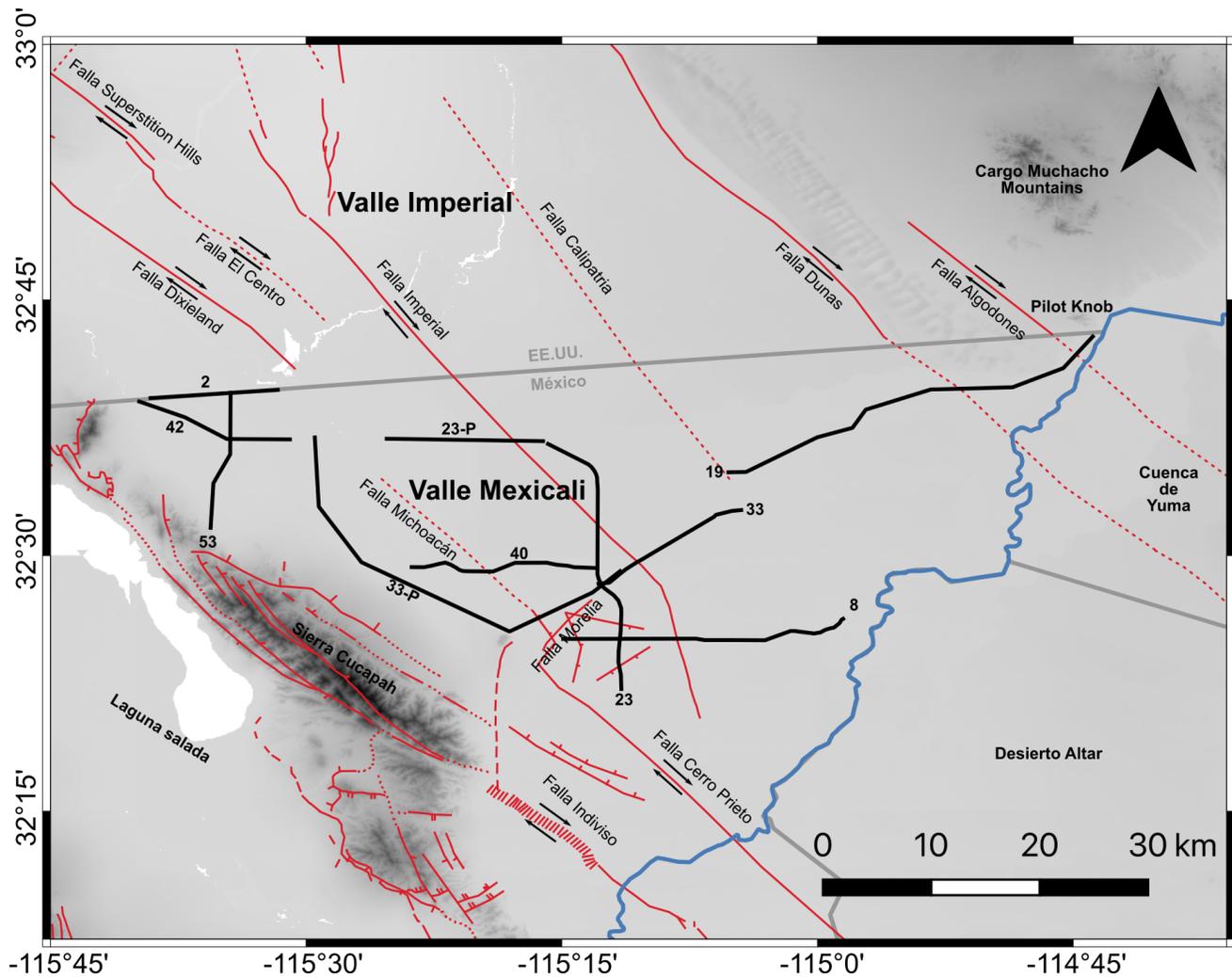


Figura 12: Ubicación de los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo. Líneas negras indican los perfiles sísmicos, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, flechas negras indican el movimiento de las fallas. Fallas tomadas de [Lira \(2005\)](#); [Fletcher et al. \(2016\)](#); [González Escobar et al. \(2020\)](#); [Dorsett et al. \(2019\)](#)

1.8.8. INFORMACIÓN DE OTROS DATOS GEOFÍSICOS

Debido a las diferentes propiedades físicas de las rocas es necesario complementar la información sísmica con información de otros métodos geofísicos. En este caso se utilizaron 1) base de datos de anomalía de Bouguer utilizada por [Chanes Martínez et al. \(2014\)](#) con la cual se generó un mapa de la señal analítica de la anomalía de Bouguer. 2) base de datos de campo magnético total adquiridos por CICESE al Servicio Geológico Mexicano (SGM) ([Cruz-Leya et al., 2001](#)). Estos

datos fueron adquiridos en campo el 6 de Mayo del 2000 a una altitud de 300 msnm con una distancia entre líneas de 1 km y de 10 km para las líneas de control. El procesado de los datos incluyó: a) Compilación digital, b) compensación magnética, c) corrección por variación diurna, d) sustracción del *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) 1995, e) nivelación usando líneas de control, f) decorrugación y g) micronivelación. Por nuestra parte se realizó la corrección por reducción al polo (CRP) para obtener una mejor localización de las estructuras que generan las anomalías magnéticas, este proceso se realizo utilizando los valores de $58^{\circ} 14'$ para la inclinación y $12^{\circ} 38'$ para la declinación. Y finalmente se realizó el mapa de señal analítica de los datos reducidos al polo con la finalidad de evitar los efectos de inclinación y declinación de acuerdo a las recomendaciones propuestas por varios autores ([Agarwal y Shaw, 1996](#); [Salem et al., 2002](#); [Li, 2006](#)). 3) Catálogo de datos sísmológicos del [Suthern California Earthquake Data Center \(SCEDC\)](#) de 1981 a 2019 relocalizados utilizando la metodología de inversión por forma de onda propuesta por [Hauksson et al. \(2012\)](#).

1.8.9. MODELO GRAVIMÉTRICO–MAGNÉTICO 2D

Se obtuvo un modelo gravimétrico–magnético utilizando la aplicación GM-SYS2D del paquete Oasis Montaje de Geosoft. Este utiliza una técnica de interpretación cuantitativa denominada modelado inverso cuasi-tridimensional tipo Talwani, basándose en los métodos de [Talwani et al. \(1959\)](#) y [Talwani \(1965\)](#). El objetivo de este modelado es encontrar una respuesta de la geometría y propiedades del subsuelo (densidad y susceptibilidad magnética) de tal modo que sea equiparable con los datos observados. Sin embargo la manera en que se realizó el modelo fue de manera directa (a prueba y error). La información de pozos antes mencionada y los perfiles sísmicos 33 y 19 se utilizaron como restricciones de primer orden en la realización de un modelo 2D y en segundo orden se utilizó la información gravimétrica y magnética, considerando la no unicidad de estos últimos dos métodos en el modelado geofísico. De esta manera se disminuyó la incertidumbre en dichos modelos. El modelado comenzó utilizando valores de densidad e intensidad magnética de

estudios previos. Para la densidad de las capas más someras se partió de los datos reportados por [García Abdeslem *et al.* \(2001\)](#) en la Laguna salada a partir de un registro de densidad en un pozo. Para las unidades de basamento ígneo se partió del modelado magnético propuesto por [Goldstein *et al.* \(1984\)](#) así como también de datos tomados de manera *in situ* en la Sierra Cucapah por [García Abdeslem *et al.* \(2001\)](#) y finalmente se partió del modelo propuesto por [Fuis *et al.* \(2017\)](#) en el Valle Coachela para los valores del basamento metamórfico. Este último trabajo fue el único antecedente reportado para los valores del basamento metamórfico. Para este modelo se asume que las unidades sedimentarias no están magnetizadas por lo cual se le dieron valores de intensidad magnética cero o muy bajos que fueron despreciados. La orientación del modelo fue transversal a las fallas dominantes del Valle de Mexicali (SW-SE).

CAPÍTULO II

RESULTADOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Derivado de la interpretación de los datos sísmicos ayudados por métodos potenciales se obtuvieron los siguientes resultados: 1) la corroboración de fallas importantes ya reportadas en el Valle de Mexicali y a su vez la existencia de nuevas fallas no reportadas hasta ahora, así como su correspondiente cartografía. 2) Se obtuvieron horizontes pseudo 3D de un límite litológico entre los sedimentos clásticos no consolidados y consolidados, así como del basamento (donde era observable). 3) Se confirmó la existencia de anomalías sísmicas caóticas y de baja amplitud (ASCBA) así como su respectivo mapeo en el Valle de Mexicali. 4) Se generó un modelo gravimétrico-magnético 2D tomando en cuenta los distintos métodos geofísicos utilizados.

2.2. SISMICIDAD

Los hipocentros proporcionados por SCEDC mostraron profundidades principalmente entre 0 y 20 km. En la cuenca de Cerro Prieto fue difícil observar alineaciones claras entre los epicentros, sin embargo, al norte de la cuenca se observaron claras alineaciones hipocentrales como lo muestra la Figura 11. Se encontraron lineamientos (A) que colindan con el trazo de la Falla Imperial que caen dentro de la zona de ASCBA observada en los perfiles sísmos de reflexión 2D, las magnitudes calculadas van de 1.5 a 3 con un evento de $M=5.8$, así como se observaron profundidades principalmente en el rango de 5 y 11 km, con una tendencia de incremento de la profundidad hacia el SE. Justo debajo del ejido Sinaloa, encontramos un lineamiento hipocentral (B) muy bien definido, con una longitud de 8 km aproximadamente y un rumbo NW-SE, siendo paralelo a la Falla Imperial con profundidades entre 8 y 11 km y con magnitudes ≤ 3 . Por otro lado, también fueron observados 3 lineamientos hipocentrales semi paralelos con orientación NW-SE cercanos a la zona geotérmica de Tulechek Sur (ZGTS Figura 11), el primer lineamiento (C) presentó las profundidades hipocentrales más someras (9-10 km) a lo largo de 3.2 km aproximadamente. Las magnitudes de este lineamiento se encontraron en el rango de 1.5 a 3. Al SE de este lineamiento es posible observar dos lineamientos más en las cuales las magnitudes alcanzaron hasta 5.1, pero una (D) con profundidades predominantes mayores (11-13 km) y otra (E) con un mayor rango de profundidad (11-15 km). Con orientación perpendicular (NE-SW) a los anteriores fue observado un lineamiento hipocentral (F) justo en la terminación sur de los lineamientos C y D, el cual mostró profundidades que van de los 3.4 y 19.4 km y magnitudes entre 1.5 a 5.1. Finalmente el último lineamiento observado (G) se encuentra al oeste de todos los anteriores, cercano al Canal Cerro Prieto, este lineamiento cuenta con un rumbo NW-SE, tiene magnitudes de hasta 4 y profundidades que varían de los 11 a 15 km.

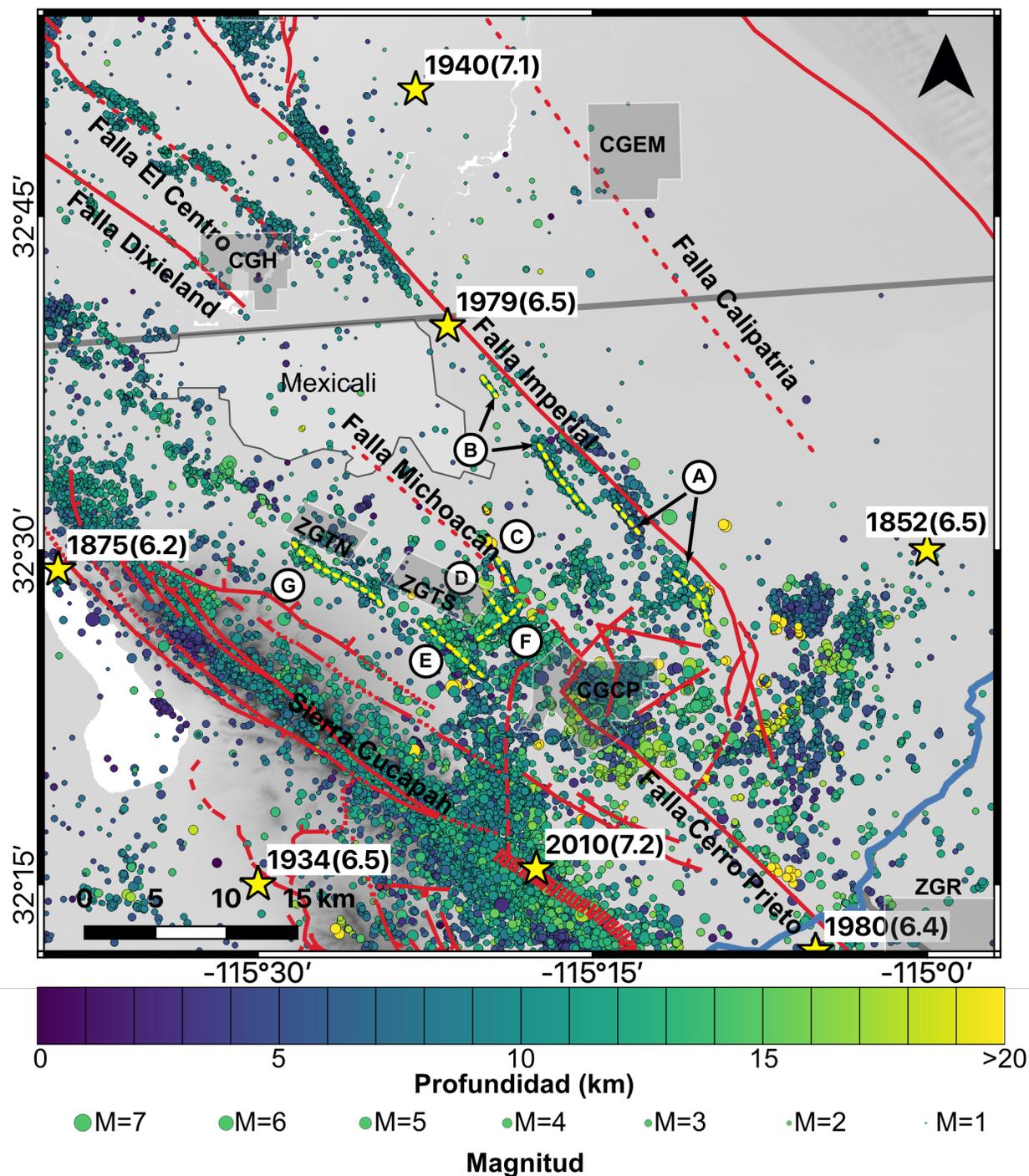


Figura 11: Mapa de hipocentros de la base de datos de SCEDC relocados con la metodología de [Hauksson et al. \(2011\)](#) (círculos) e interpretación de lineamientos en el Valle de Mexicali. Líneas punteadas amarillas muestran lineamientos propuestos, líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas ([Lira, 2005](#); [Fletcher et al., 2016](#); [Dorsett et al., 2019](#); [González Escobar et al., 2020](#)), polígono gris muestra la zona urbana de la ciudad de Mexicali, polígonos color gris oscuro indican campos y zonas geotérmicas, estrellas amarillas indican sismos históricos (año y magnitud) ([BSSA, 1916](#); [Felzer y Cao, 2008](#); [Ellsworth, 1990](#)). Abreviaturas: Campo geotérmico Heber—CGH, Campo geotérmico East Mesa—CGEM, Campo geotérmico Cerro Prieto—CGCP, Zona geotérmica Tulechek Norte—ZGTN, Zona geotérmica Tulechek Norte—ZGTS, Zona geotérmica Riíto—ZGR.

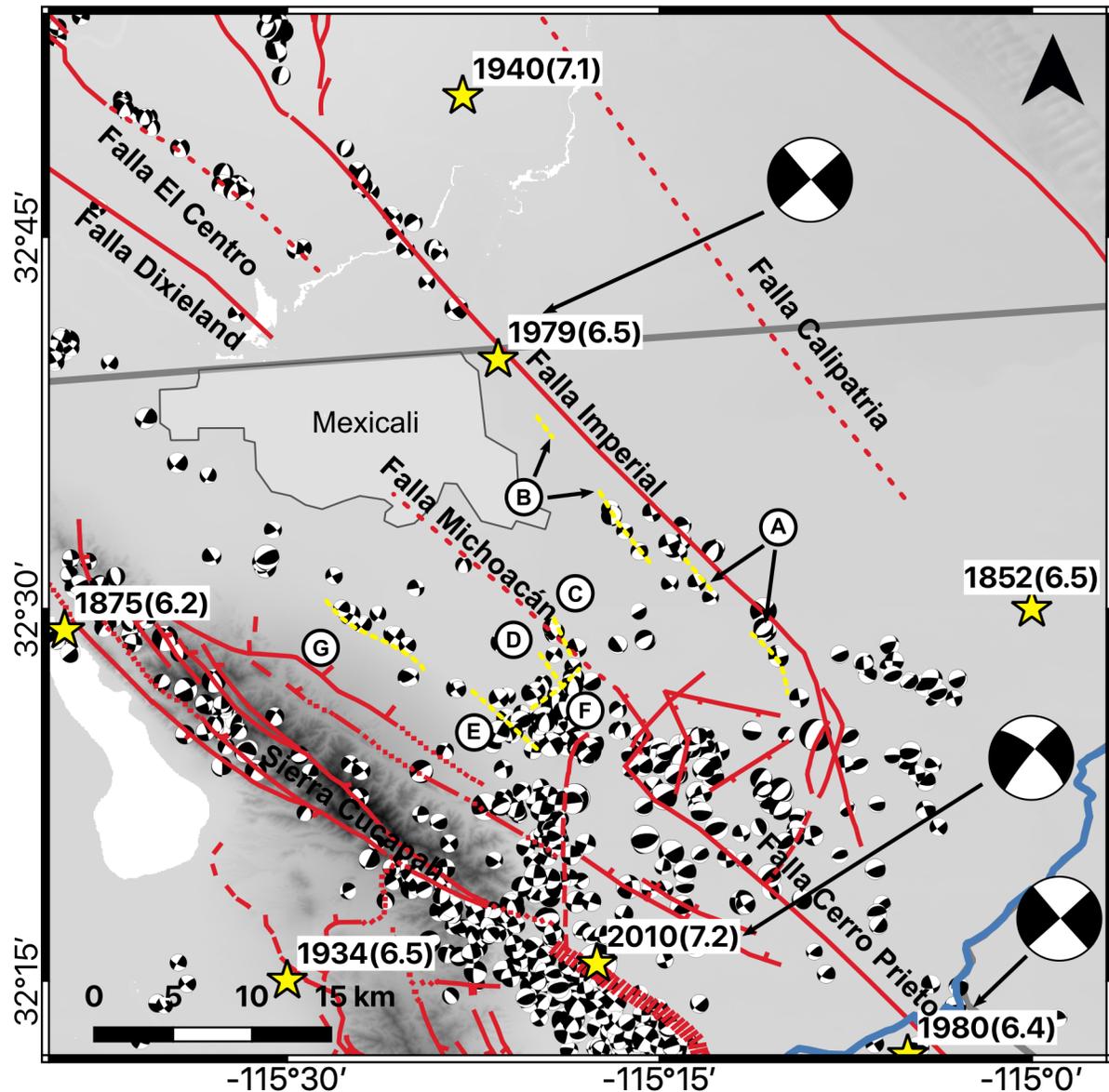


Figura 12: Mapa de solución de mecanismos focales para sismos $M \geq 3$ e interpretación de lineamientos en el Valle de Mexicali. Líneas punteadas amarillas muestran lineamientos propuestos, líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), polígono gris muestra la zona urbana de la ciudad de Mexicali, estrellas amarillas indican sismos históricos (año y magnitud) (BSSA, 1916; Felzer y Cao, 2008; Ellsworth, 1990). Mecanismo focal del sismo de 1979 (6.5) obtenido de The Harvard Centroid Moment Tensor Catalog (Dziewonski *et al.*, 1981; Ekström *et al.*, 2012)

2.3. GRAVEDAD

Observando el mapa de anomalía de Bouguer mostrado en la Figura 13 es posible observar importantes altos gravimétricos producidos por la poca profundidad del basamento, como altos gravimétricos de Tulechek y Santa Isabel ubicados en la parte oeste del Valle de Mexicali cerca de la Sierra Cucapah. Por otro lado también existen altos gravimétricos producidos por intrusivos como el intrusivo Nuevo León asociado a la fuente de calor el Campo Geotérmico Cerro Prieto y el intrusivo Ríito que también se ha propuesto como fuente de calor de la zona geotérmica que lleva el mismo nombre. Todos estos altos gravimétricos son acompañados por una anomalía magnética, lo cual indica que el alto gravimétrico está asociado a un intrusivo ígneo. Sin embargo existen una cantidad de altos gravimétricos que no presentan anomalía magnética como lo son Aeropuerto Oeste, Aeropuerto Este, Puebla y Lagunitas Norte. Para estas anomalías gravimétricas con ausencia de anomalía magnética se ha propuesto que se deben al metamorfismo de la corteza sedimentaria debido al ascenso de fluidos geotérmicos ([Van de Kamp *et al.*, 1978](#)) que ha densificado la matriz de la roca lo suficiente para generar una anomalía gravimétrica. Por otro lado, fue posible observar importantes bajos gravimétricos asociados a importantes depocentros. Se observa el bajo gravimétrico ubicado al sureste del Volcán Cerro Prieto ([González Escobar *et al.*, 2020](#)). Sin embargo, el principal bajo gravimétrico está ubicado al norte de la Cuenca Cerro Prieto y abarca hasta la frontera México-EE.UU. Este bajo gravimétrico se caracteriza por presentar un ligero pero importante alto gravimétrico que lo corta en dirección NW-SE, este alto gravimétrico está asociado a la Falla Imperial.

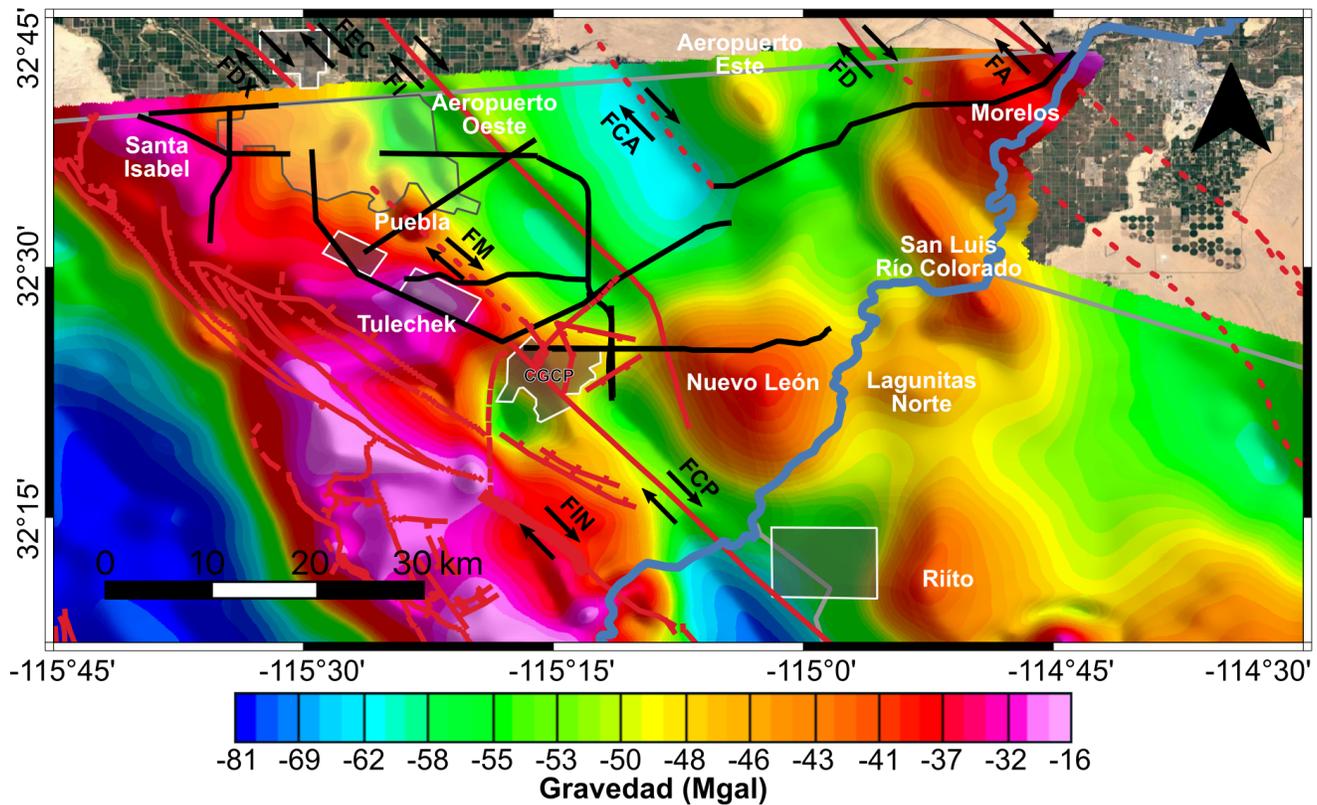


Figura 13: Anomalía de Bouguer del Valle de Mexicali con principales anomalías gravimétricas. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

A través de la generación de un mapa de la señal analítica de la anomalía de Bouguer (Nabighian, 1972, 1974) fue posible observar altos que se correlacionan con anomalías importantes observados en la anomalía de Bouguer como: la anomalía Tulechek, San Luis Río Colorado, Algodones, Morelos, Aeropuerto Oeste, Riito y la anomalía Puebla. Por otro lado en la Figura 14 se observa que varias fallas importantes se correlacionan bien con el un bajo de la señal analítica (azul) como es el caso de la Falla Imperial en su extremo sur, la fallas Michoacán en su extremo norte, la falla Islas Agrarias, así como la extensión hacia el sur de la Falla Calipatria. Cabe mencionar que, para estas fallas se encontró evidencia de ASCBA en varios perfiles sísmicos, lo cual se abordara más adelante.

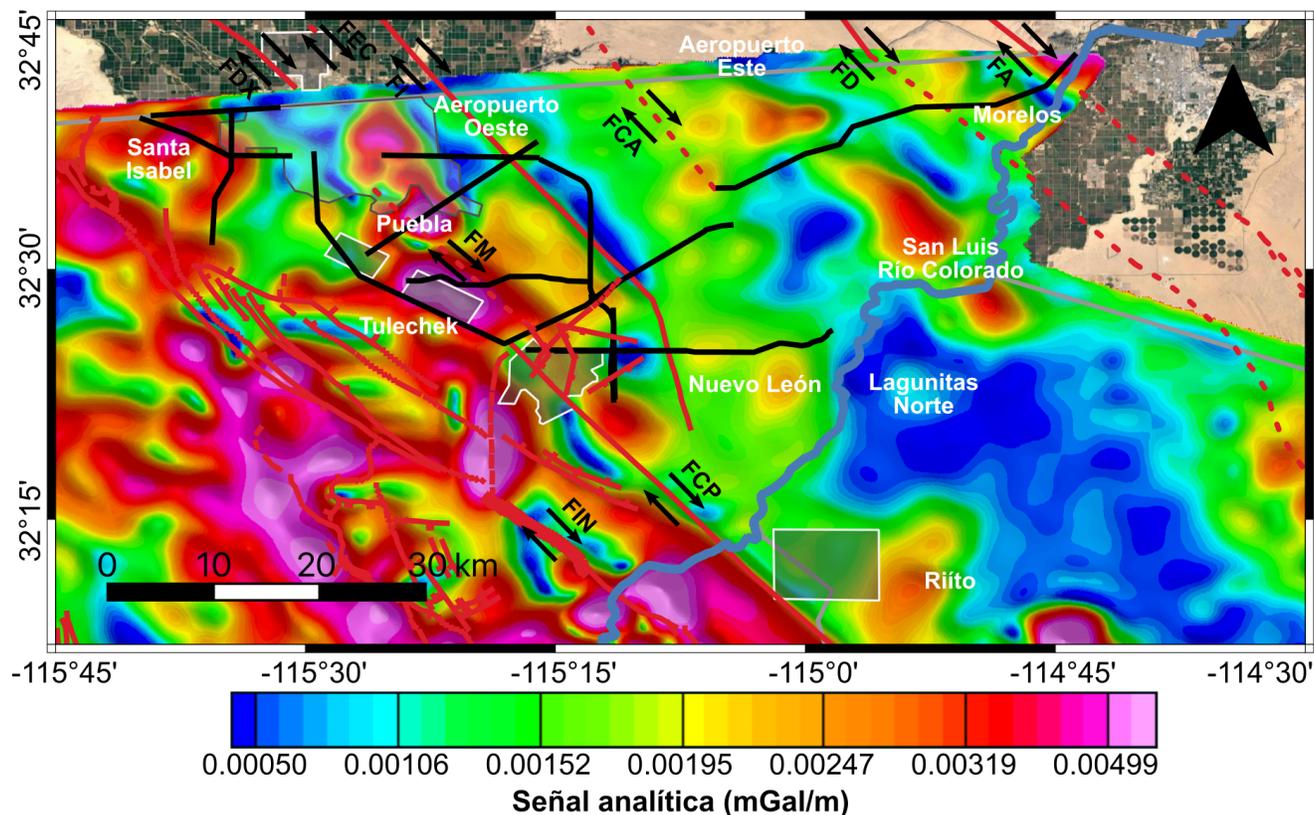


Figura 14: Mapa de la Señal Analítica de los datos gravimétricos. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

2.4. MAGNETISMO

En el mapa de los datos magnéticos reducidos al polo, presentado en la Figura 15, se han identificado con claridad tres de las anomalías magnéticas más importantes en el Valle de Mexicali. Al sur se tiene la anomalía Riíto, la anomalía Nuevo León al este del CGCP y la anomalía Tulechek al oeste del valle, justo debajo del prospecto geotérmico Tulechek Sur, así como también se pueden observar anomalías más pequeñas en el noreste del Valle de Mexicali como la anomalía San Luis Río Colorado, Paredones y Morelos. Por otro lado, no se observan anomalías magnéticas en donde se ubicaron las anomalías gravimétricas Aeropuerto Oeste, Aeropuerto Este y Lagunitas Norte.

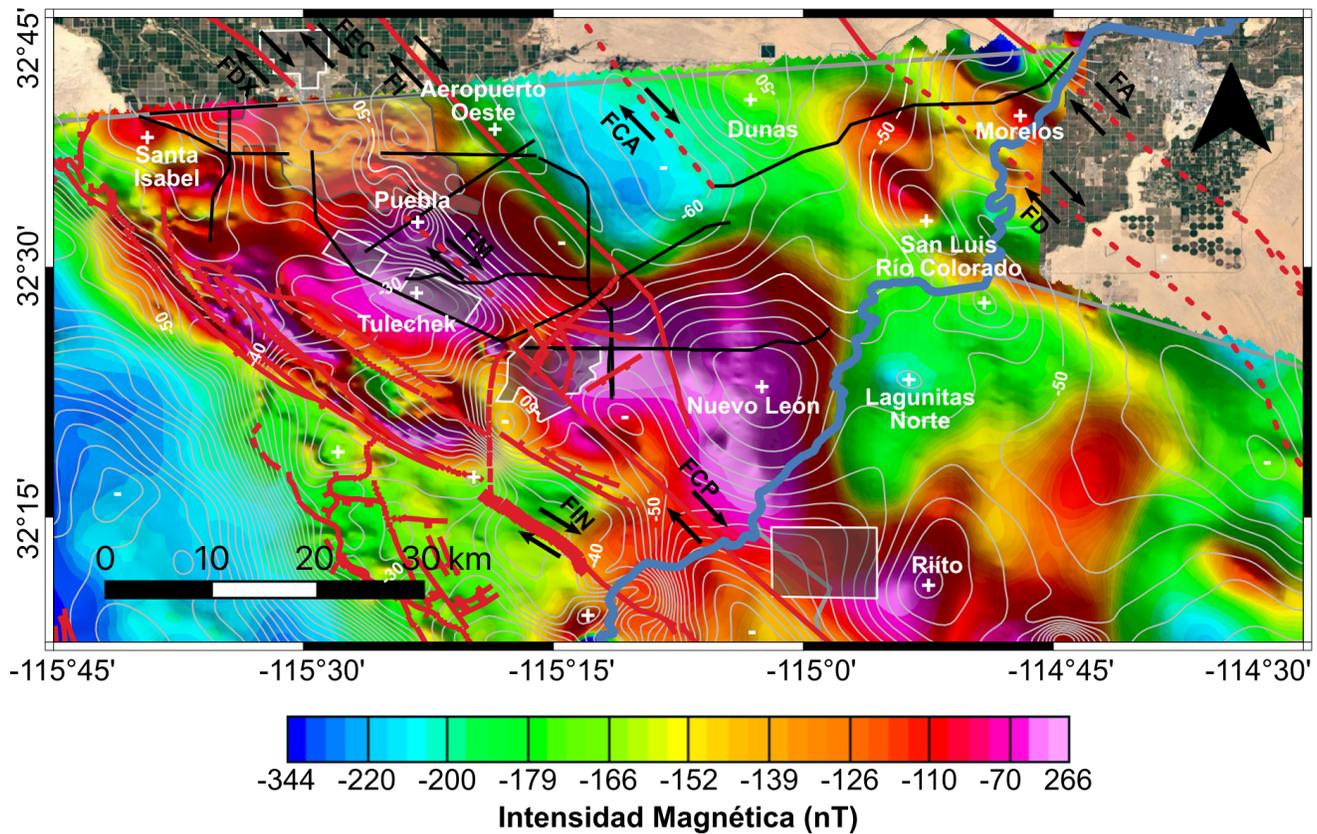


Figura 15: Reducción al polo del campo magnético total del Valle de Mexicali con contornos de la Anomalía de Bouguer (gris). Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

Haciendo uso de la señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo mostrada en la Figura 16 se observó buena correlación con las fallas Imperial y Cerro Prieto en valores altos (rojo) y con la Falla Calipatria en valores bajos (azul), esta última extendiéndose hacia el sureste del valle llegando hasta el Desierto de Altar en Sonora, México. Cabe mencionar que esta última falla fue correlacionada con ASCBA del perfil 19 así como con perfiles en el desierto de altar de Pacheco *et al.* (2006) y Puente Huerta (2019).

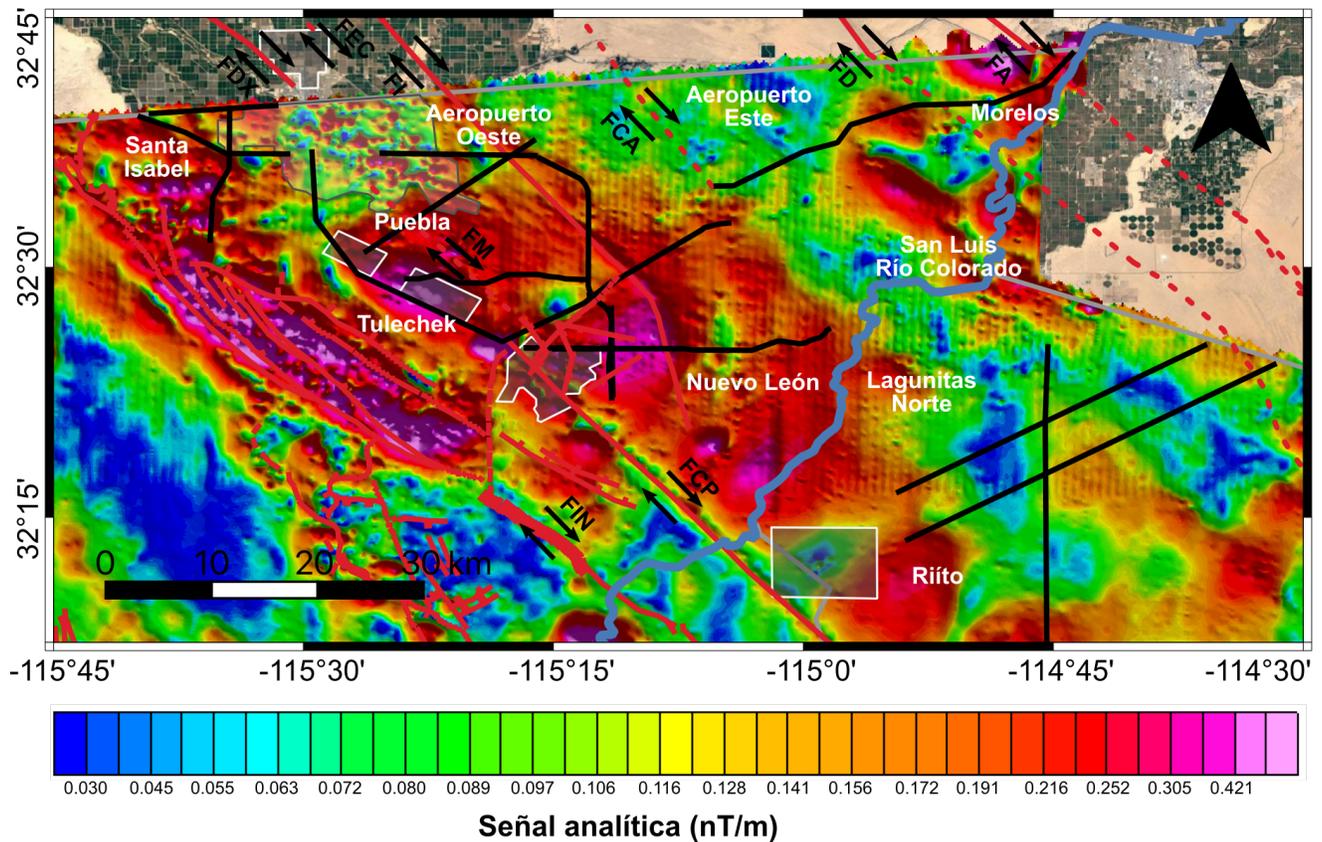


Figura 16: Señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo y perfiles reportados por Pacheco *et al.* (2006); Puente Huerta (2019), letras blancas indican el nombre de las anomalías gravimétricas (altos), polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

2.5. MODELO DE VELOCIDADES

Se obtuvo un modelo de velocidades de onda P representativo del Valle de Mexicali a partir de los perfiles 33 y 19. Este atraviesa de forma perpendicular a las principales fallas (Imperial, Dunas, Algodones). En él se observan velocidades del paquete sedimentario que van de 1.7 km/s a 2.6 km/s y para la región noreste del valle se obtuvieron velocidades del basamento en un rango de 2.6 km/s a 3.5 km/s (Figura 17). Sin embargo, debido a la respuesta del subsuelo se observan zonas con *Anomalías sísmicas caóticas de baja amplitud* (ASCBA). En estas regiones la velocidad pierde certidumbre debido a la falta de reflexión para poder modelar dicha velocidad durante el procesamiento de los datos. Estas velocidades se utilizaron para realizar una conversión a profundidad de dichos perfiles sísmicos (33 y 19).

2.6. FALLAS GEOLÓGICAS REPORTADAS

Como ya se ha mencionado antes, el Valle de Mexicali está dominado por grandes fallas transformantes dextrales, en este trabajo hemos logrado corroborar el trazo de dichas fallas. Así como su respuesta a los diferentes métodos geofísicos utilizados. En el extremo noreste del perfil 19 (Figura 17) se puede observar el trazo de la Falla Algodones, que si bien es cierto ya ha sido inferida (Olmsted *et al.*, 1973; Jennings y Bryant, 2010), es la primera vez que se muestra su extensión hacia el Valle de Mexicali, así como también es la primera vez que se presenta una imagen sísmica de su estructura en el subsuelo. Se observa como una falla componente normal con un alto ángulo ($\approx 90^\circ$). La interpretación de esta falla ha sido fuertemente complementada por un perfil gravimétrico-magnético 2D, que se muestra más adelante, donde se observa la anomalía magnética producida por la falla. Finalmente, la Falla Algodones solo es observable hasta una profundidad de 1 km justo donde se encuentra el basamento acústico.

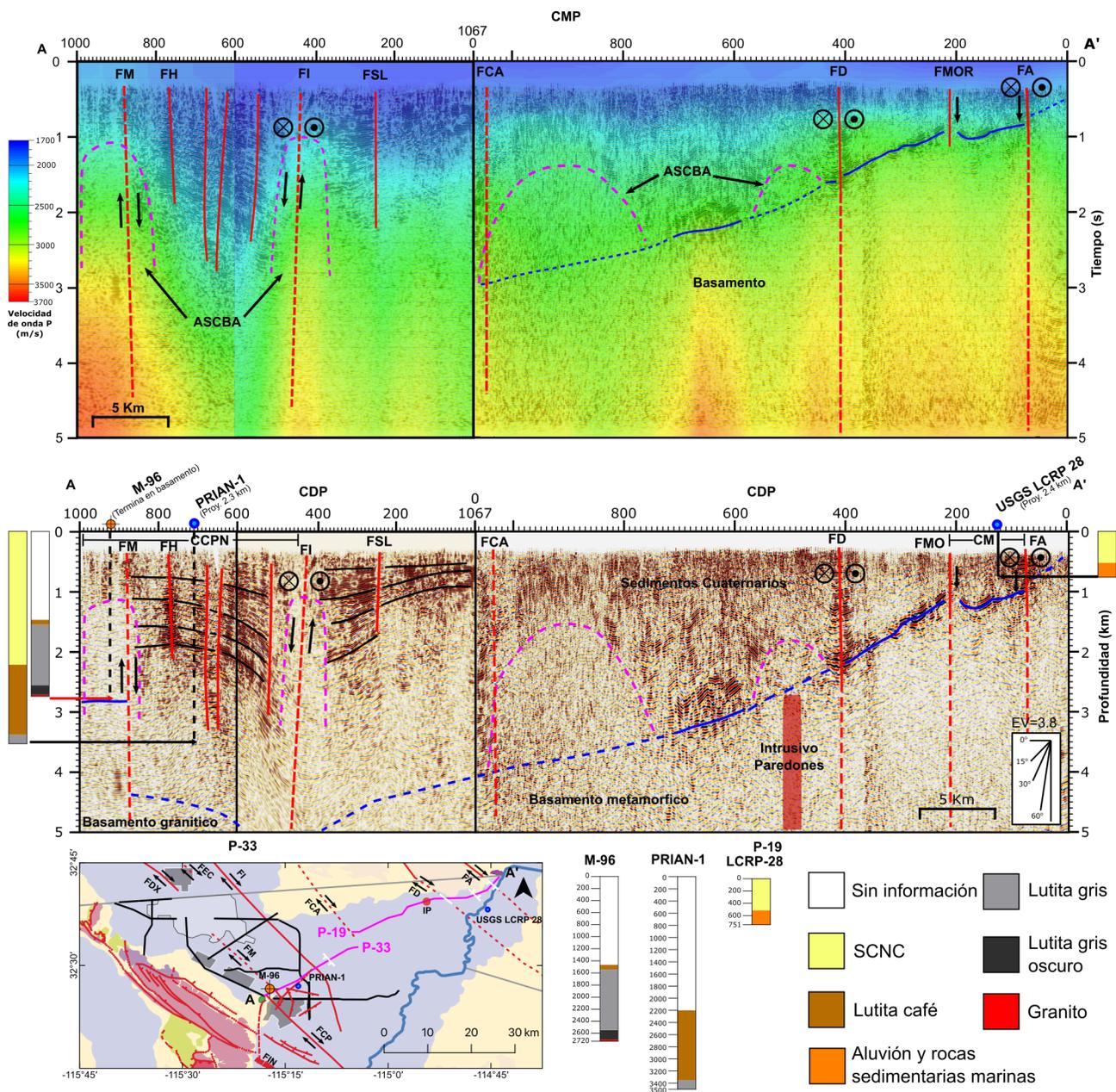


Figura 17: Modelo de velocidad e interpretación de perfil sísmico transversal al Valle de Mexicali en profundidad con pozos cercanos con litología reportada por [Olmsted et al. \(1973\)](#); [Cobo y Bernejo \(1982\)](#). En imagen sísmica: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas, líneas color azul indican basamento, líneas punteadas color azul indican basamento inferido, líneas punteadas color magenta indican *Anomalías sísmicas caóticas de baja amplitud* (ASCBA). En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas ([Lira, 2005](#); [Fletcher et al., 2016](#); [Dorsett et al., 2019](#); [González Escobar et al., 2020](#)), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, líneas magenta indican los perfiles sísmicos mostrados, líneas blancas indican fallas observadas en el perfil. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Hidalgo—FH, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMO, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC, Intrusivo Paredones—IP, Cuenca Morelos—CM, Cuenca Cerro Prieto—CCP.

De la misma forma el corte de la falla Dunas es observable en el perfil 19 (Figura 17) a la altura del CDP 400, mostrándose como una falla con un alto ángulo ($\approx 90^\circ$) donde no se observa desplazamiento vertical en los bloques, esta falla fue observada hasta una profundidad de 2 km aproximadamente donde se encuentra el basamento.

Por otro lado, se logró corroborar el trazado de la Falla Imperial, la cual fue observada en 6 perfiles sísmicos, de los cuales 4 son imágenes pertenecientes a este trabajo (perfiles 23, 23_P, 33 y 8), como se muestran en la Figura 18, y 2 imágenes que fueron publicadas por [Fonseca *et al.* \(1981\)](#). La Falla Imperial, en las imágenes sísmicas, se muestra como una anomalía sísmica caótica y de baja amplitud, donde no se observa el trazo de la falla, sin embargo esta anomalía está presente en todos los perfiles que cortan dicha falla. Debido a la falta de reflexión sísmica en los estratos inmediatos a la falla no es posible observar el buzamiento de ésta, sin embargo, es posible identificar una componente normal debido a la diferencia en los espesores de sedimentos (Figura 17, perfil 33). Complementando esta interpretación, la anomalía de Bouguer muestra un ligero alto gravimétrico a lo largo de la Falla Imperial como se observa en la Figura 13, que resalta aún más esta estructura cuando se aplica la señal analítica (azul) en la Figura 14.

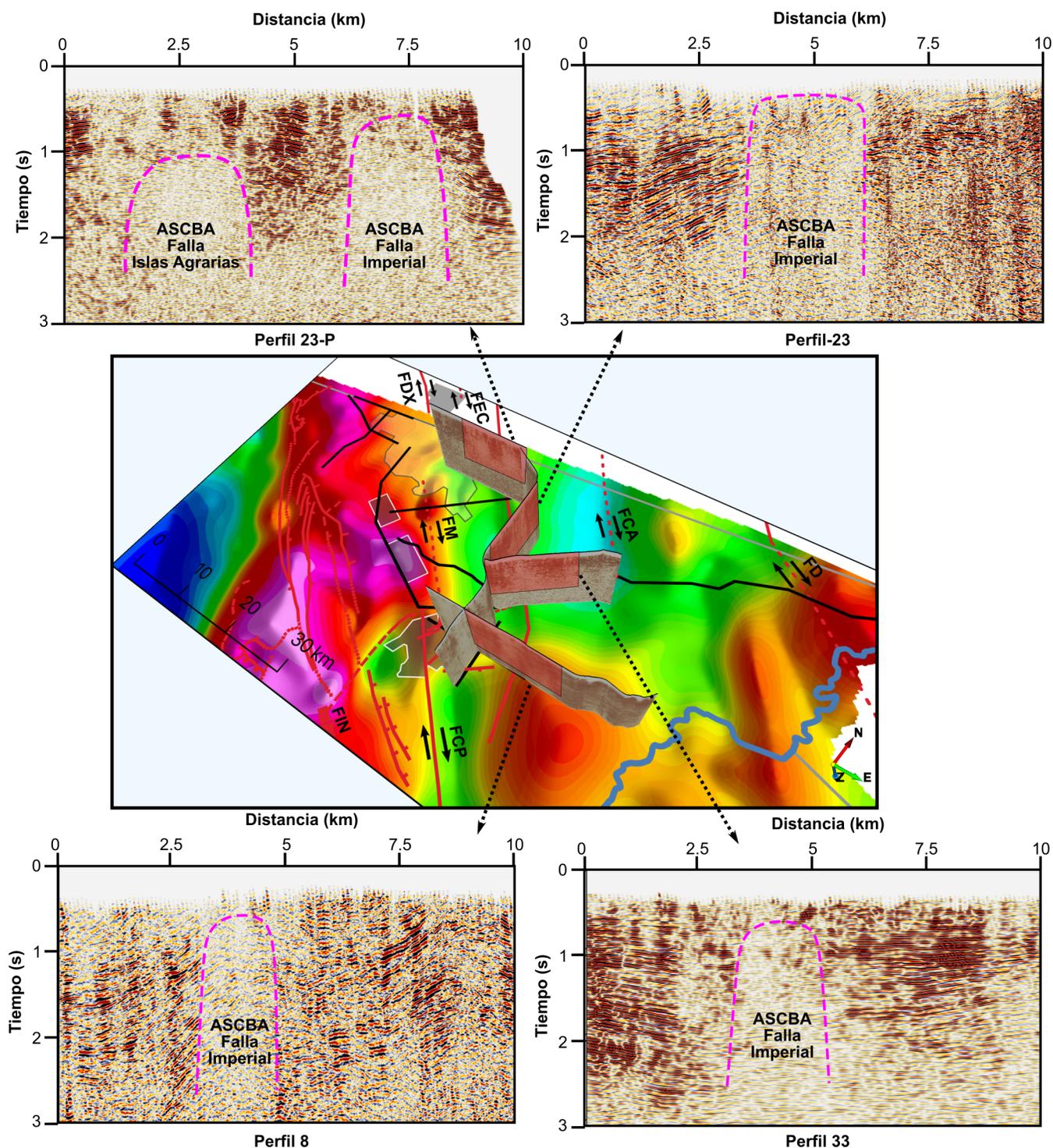


Figura 18: Trazo de la Falla Imperial observado en los diferentes perfiles sísmicos sobre mapa de anomalía de Bouguer. La Falla Imperial se observa como una ASCBA en los perfiles sísmicos. Líneas punteadas color magenta indican las ASCBA. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

La Falla Michoacán ha sido inferida por distintos autores utilizando diferentes métodos geofísicos como sísmica de refracción, resistividad y sísmica de reflexión (Puentes y De la Peña, 1978; Razo *et al.*, 1978; Fonseca *et al.*, 1981) y ha sido mostrada en modelos geológicos sobre el Campo Geotérmico Cerro Prieto (Lira, 2005; Dumas, 2010). En este trabajo se logró observar esta falla en los perfiles sísmicos 8 y 33, en ambos perfiles la falla se observó como una ASCBA, así como en otras fallas que muestran este tipo de anomalía. No se logró determinar el buzamiento de la falla, sin embargo fue notable el cambio de espesor en los sedimentos al oriente de la falla los cuales forman una estructura de flor negativa entre la Falla Michoacán e Imperial como se observa en el Perfil 33 en las Figuras 19 y 17, lo que corroboró la componente normal propuesta por los autores antes mencionados en dicha falla. Por otro lado, la sismicidad analizada mostró soluciones de mecanismos focales puramente dextrales y dextrales con componente normal (Figura 12) con profundidades de 9.36 a 13.48 km de profundidad (Figura 12). Analizando la información de métodos potenciales, se observó que esta falla se alinea de buena forma con un drástico cambio en la anomalía de Bouguer (Figura 13), así como con la tendencia formada por un bajo (azul) que se observó en la señal analítica de la anomalía de Bouguer al norte del Valle de Mexicali.

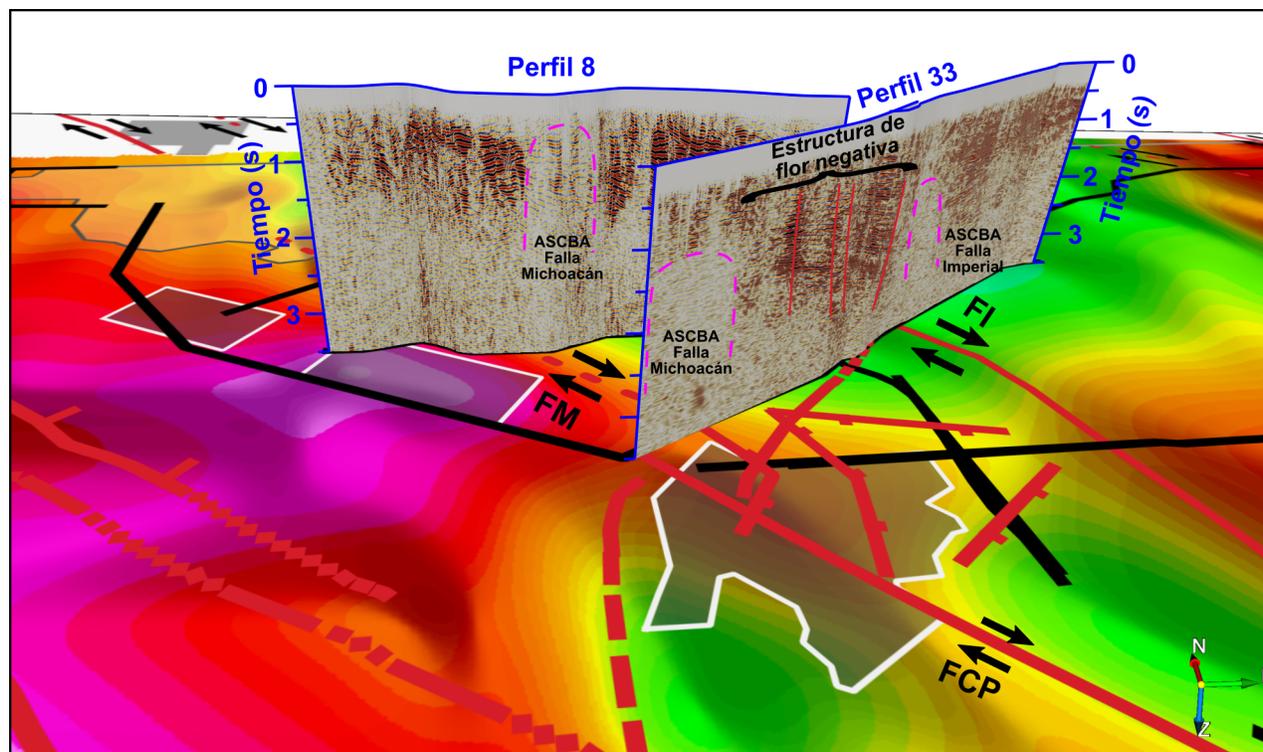


Figura 19: Falla Michoacán observada en perfiles sísmicos como ASCBA sobre mapa de anomalía de Bouger. Líneas punteadas color magenta indican las ASCBA, líneas rojas indican fallas. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP.

2.7. FALLAS GEOLÓGICAS NO REPORTADAS

Con igual o mayor importancia que las fallas antes mencionadas, existen fallas geológicas no reportadas en el Valle de Mexicali. En este estudio se logró obtener por primera vez imágenes del subsuelo de dichas estructuras a través del método sísmico de reflexión, sin embargo, ya que no existía evidencia contundente de dichas estructuras, la interpretación y la correlación fueron complementadas con diferentes métodos geofísicos. Los nombres de estas nuevas fallas fueron dados de acuerdo a ejidos cercanos y en muchos casos pueden estar conectadas a otras fallas.

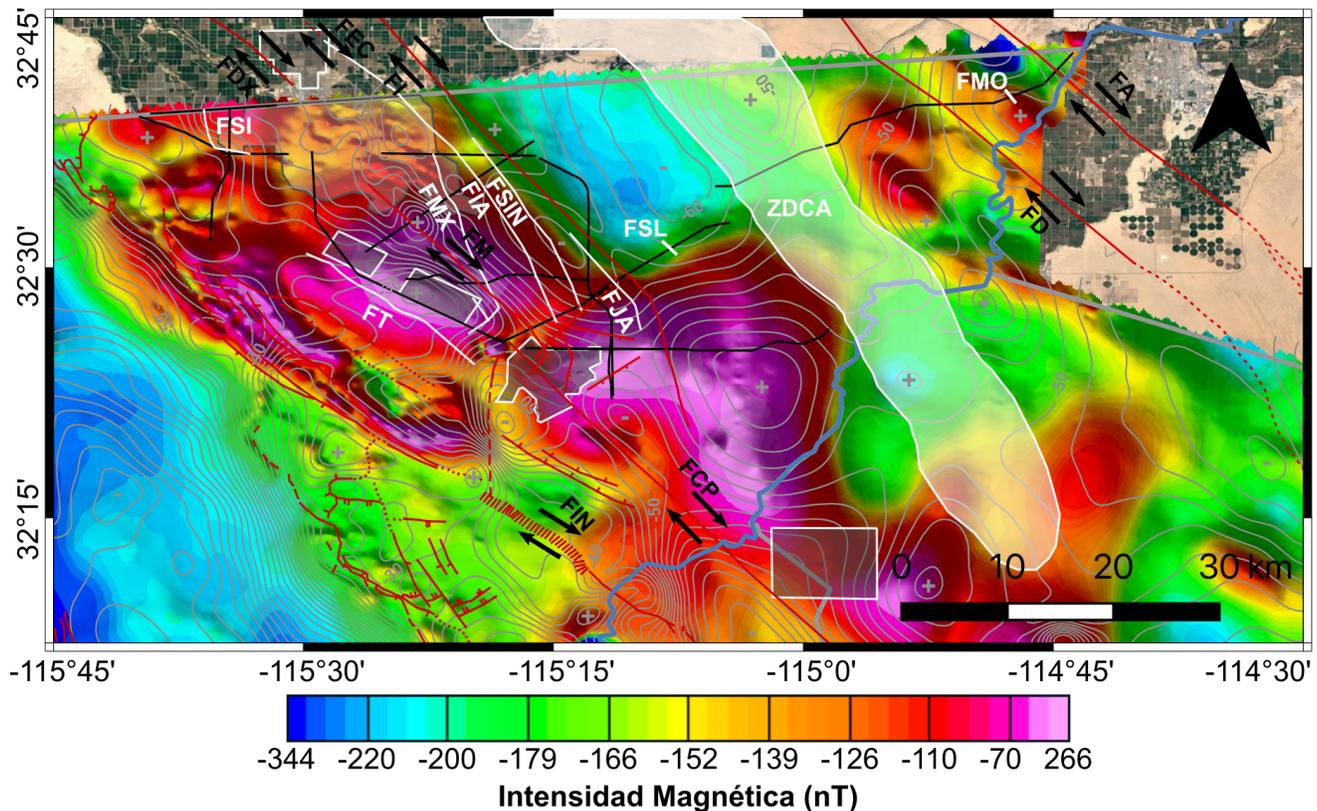


Figura 20: Fallas no reportadas previamente sobre mapa de datos magnéticos con reducción al polo y contornos de anomalía de Bouguer. Líneas blancas indican fallas reportadas por primera vez en este trabajo, líneas rojas indican fallas reportadas previamente, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020), líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, polígono color blanco indica la Zona de Deformación Calipatria. Abreviaturas: Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Jalapa—FJA, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMO, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Indiviso—FIN, Falla Cerro Prieto—FCP, Zona de Deformación Calipatria—ZDCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Falla Dixieland—FDX, Falla El Centro—FEC.

Al noreste del Valle de Mexicali (Figura 20) en el perfil 19 (Figura 17) se observó la falla Morelos ubicada entre las fallas transformantes Algodones y Dunas, esta falla fue observada hasta una profundidad de 1.5 km cortando el basamento y mostró un buzamiento casi vertical. En la ubicación de esta falla existe poca actividad sísmica reportada recientemente, por lo que el único método con el que se pudo correlacionar esta falla fue con la señal analítica de la anomalía de Bouguer (Figura 14) que muestra una ligera tendencia con dirección NW-SE. En el perfil 33

(Figura 20) la imagen sísmica mostró a la falla San Luis cortando a los reflectores correspondientes al paquete sedimentario produciendo en ellos un cambio en el espesor y buzamiento de los estratos (Figura 17). Sin embargo no se logró obtener ninguna correlación con alguno de los métodos utilizados, por lo que no fué posible determinar su rumbo. Esta falla podría ser el extremo sureste de la Falla Brawley en el Valle Imperial, de la cual existe poca información.

Al este de la ciudad de Mexicali fue observada la falla Santa Isabel, nombrada así por su proximidad al ejido Santa Isabel, su geometría fue construida a partir de 3 perfiles sísmicos (2, 42 y 53) mostrados en la Figura 21. La Falla Santa Isabel se observó como una falla lítrica de componente normal dominada principalmente por el basamento. Esta falla a su vez controla la geometría de los sedimentos que yacen sobre la zona más profunda del basamento, generando en estos sedimentos un *roll over* con buzamiento hacia la Falla Santa Isabel. Es posible que esta falla se prolongue tanto al sur en el Valle de Mexicali como hacia el norte en el Valle Imperial.

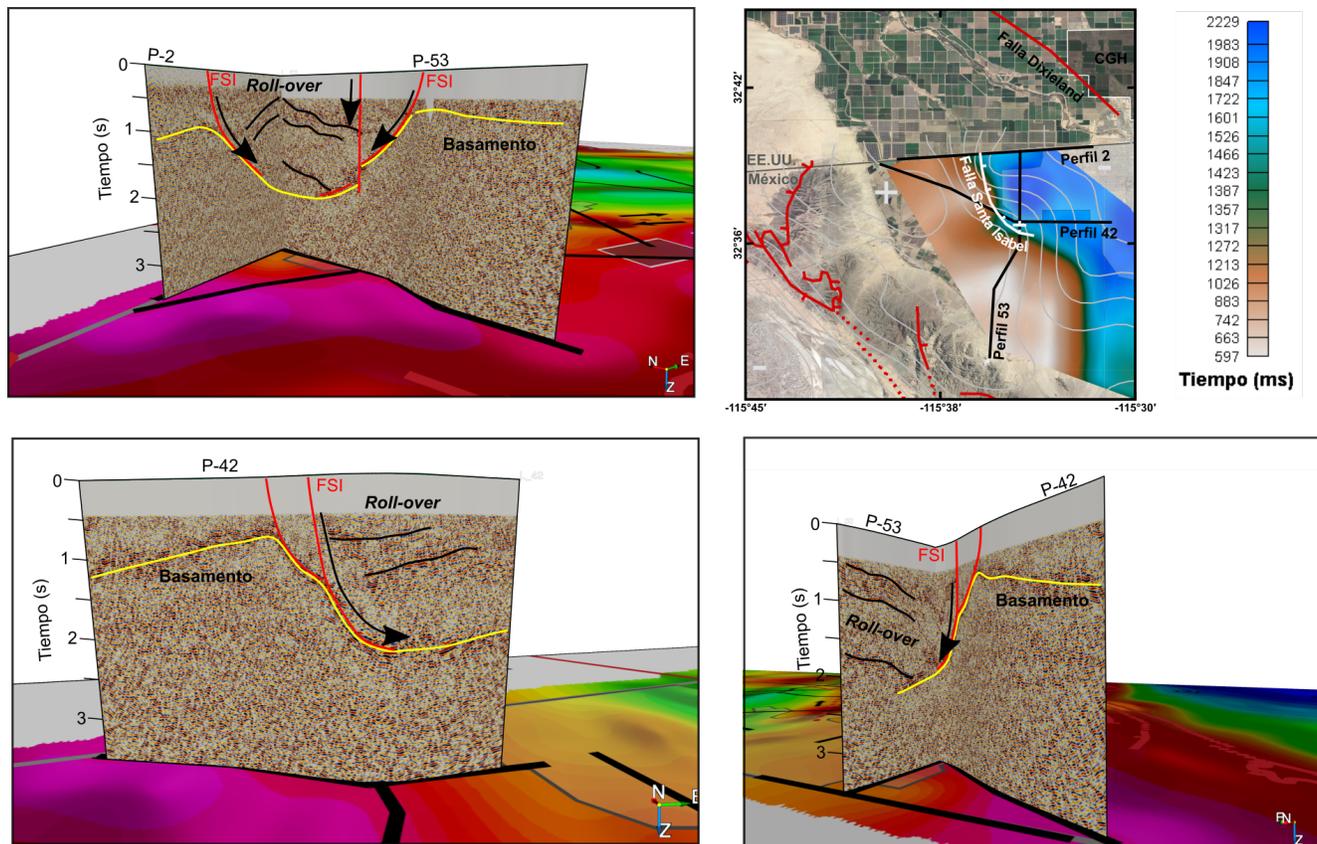


Figura 21: Perfiles sísmicos mostrando la Falla Santa Isabel con distintos puntos de vista sobre mapa de anomalía de Bouguer. Mapa a la zona superior derecha muestra la interpolación del basamento en tiempo de viaje doble. En imágenes: Líneas color rojo indican las fallas interpretadas, líneas color negro indican reflectores observados, líneas color amarillo indican el basamento acústico. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019), línea blanca indica el corte de la falla Santa Isabel con su componente normal, líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígono color gris indica el Campo Geotérmico Heber, contornos color gris indican la anomalía de Bouguer. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Campo Geotérmico Heber—CGH.

A partir de dos lineamientos observados en los hipocentros proporcionados por SCEDC se interpretó una falla al oeste del Valle de Mexicali junto a la Sierra Cucupah (Figura 11 E y G), la cual nombramos Falla Tulechek, la profundidad de los epicentros esta entre 11 y 15 km, con una dirección NW-SE y la mayoría de los mecanismo focales observados fueron de componente dextral (Figura 12), el único estudio con el que se correlaciona esta falla es con fallas reportadas por Puente y De la Peña (1978) en la línea no. 4.

2.8. CONEXIÓN ENTRE FALLAS

A continuación se reporta la correlación de fallas geológicas observadas en distintos perfiles sísmicos, cabe mencionar que se utilizaron perfiles de este trabajo, perfiles reportados por [Fonseca *et al.* \(1981\)](#) y el perfil de resistividad reportado por [Razo *et al.* \(1978\)](#). Toda esta información se concentra en la Figura 22.

2.8.1. FALLA SINALOA

En su perfil sísmico 7-7 [Fonseca *et al.* \(1981\)](#) reportaron una serie de fallas las cuales mostraron correlación con fallas observadas en el perfil 23, la primera de estas fallas la nombramos falla Sinaloa, esta falla se encuentra ubicada justo al oeste de la Falla Imperial y mostró una estructura similar en ambos perfiles, se observó como una falla vertical en la cual los reflectores se muestran paralelos al oeste de la falla, cambiando su buzamiento drásticamente al oriente de la falla. Al sureste de estos perfiles se observó la continuación de esta falla en el lineamiento de hipocentros B mostrado en la Figura 11 con profundidades que van de los 9 a 11 km con 4 soluciones de mecanismo focal transformante derecha con rumbos similares al lineamiento de hipocentros, esta prolongación hacia el sureste termina justamente en la ubicación del perfil eléctrico 4 mostrado por [Razo *et al.* \(1978\)](#) donde reportaron una discontinuidad eléctrica. Esta falla se correlacionó hacia el sur con el perfil sísmico 33, mostrando una orientación vertical donde los reflectores cambian su buzamiento, el perfil eléctrico 1 de [Razo *et al.* \(1978\)](#) muestra una posible discontinuidad eléctrica a la misma altura del perfil sísmico 33, finalmente esta falla se une con la falla Morelia reportada por [\(Suárez Vidal *et al.*, 2008\)](#).

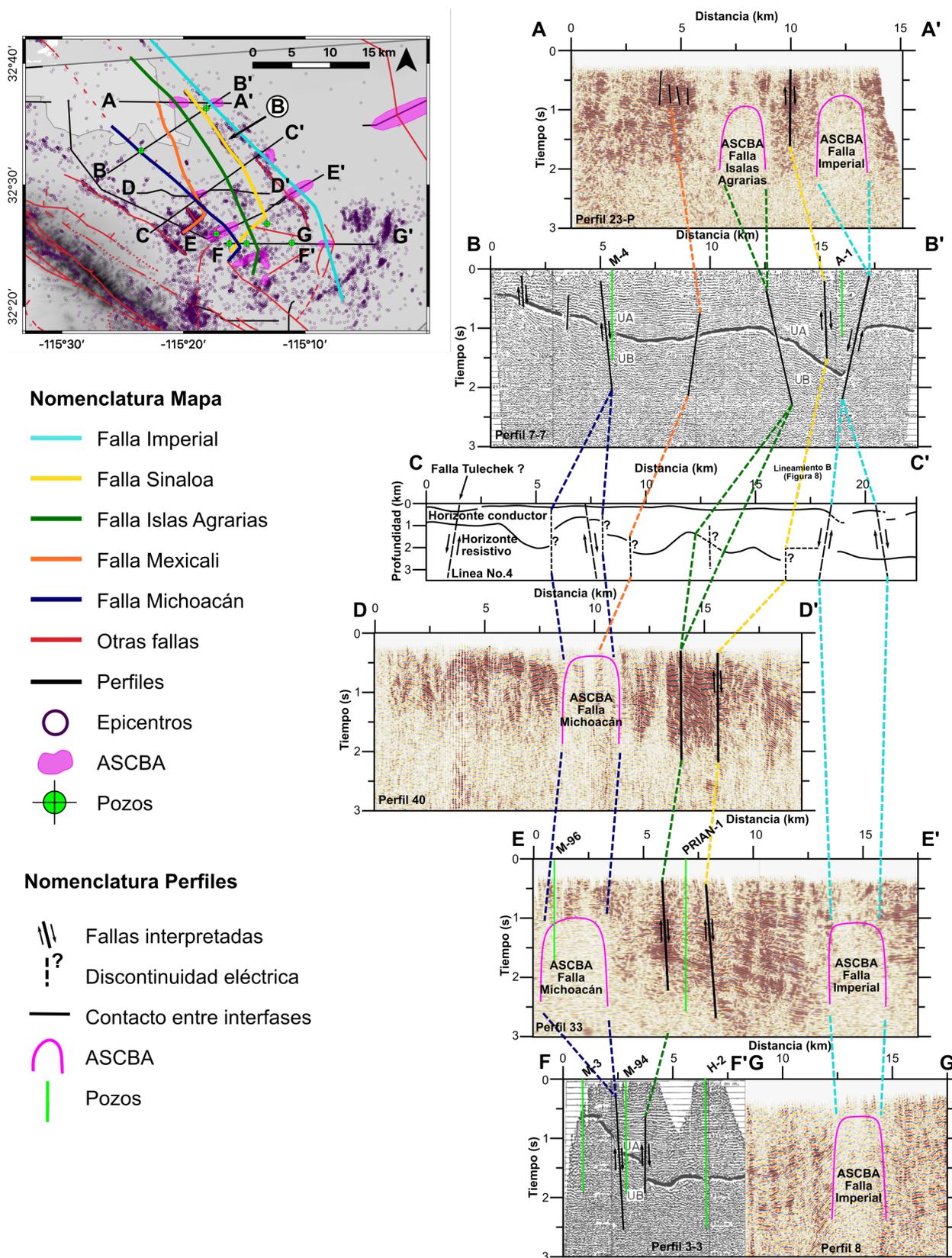


Figura 22: Correlación de fallas geológicas en perfiles sísmicos de este trabajo, perfiles reportados por Fonseca *et al.* (1981) y perfil de resistividad de Razo *et al.* (1978). Pozos tomados de Cobo y Bermejo (1982). Epicentros relocalizados de SCEDC.

2.8.2. FALLA ISLAS AGRARIAS

Al suroeste de la falla antes mencionada observamos en el perfil 23 una falla la cual nombramos Islas Agrarias, esta falla se observó en la imagen sísmica como una ASCBA, muy similar a otras fallas en la región (Imperial, Calipatria, Michoacán), de igual manera se correlacionó con el perfil sísmico 7-7 de [Fonseca *et al.* \(1981\)](#). La extensión de esta falla hacia el norte fue correlacionada con un bajo (azul) en la señal analítica de la anomalía de Bouguer uniéndose en el Valle Imperial con la falla El Centro propuesta por [Dorsett *et al.* \(2019\)](#) a partir de hipocentros observados en el Valle Imperial (Figura 11), su extensión hacia el sur esta definida en el perfil eléctrico 4 de [Razo *et al.* \(1978\)](#) donde se observa como una discontinuidad eléctrica, seguido por el perfil sísmico 40 donde fue observada como una ASCBA de poca anchura. Esta última región de la falla esta acompañada de actividad sísmica que va de los 8 a 12 km de profundidad con poca alineación de los hipocentros. Finalmente esta falla se une con la falla Hidalgo ([Lira, 2005](#)) en Campo Geotérmico Cerro Prieto.

2.8.3. FALLA MEXICALI

Desplazándonos un poco al oeste, ubicamos la falla Mexicali nombrada así por su cercanía a dicha ciudad. Esta falla fue observada como una serie de discontinuidades someras (900 ms) en el perfil sísmico 23, esta falla fue correlacionada al sur con el perfil 7-7 de [Fonseca *et al.* \(1981\)](#) e igualmente con el perfil sísmico 40 donde se observa como una ASCBA, sin embargo, podría ser provocada por el trazo de la Falla Michoacán. Por otro lado, justo en esa región, se observa el lineamiento hipocentral C (Figura 11) mencionado previamente.

2.9. LÍMITE LITOLÓGICO SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS-CONSOLIDADOS

Tomando en cuenta la descripción de unidades de sedimentos no consolidados y los consolidados realizada por [Lira \(2005\)](#), hemos configurado un horizonte del límite litológico entre estas dos unidades (Figura 23) a partir de una interpolación entre los horizontes observados en las secciones sísmicas, ayudándonos de secciones previamente interpretadas por [Lyons y Van de Kamp \(1980\)](#); [Fonseca *et al.* \(1981\)](#); [Majer y McEvilly \(1982\)](#), utilizando sus horizontes guía para extenderlos en los perfiles aquí mostrados, y se tomó en cuenta que las zonas de ASCBA contienen sedimentos consolidados. Cabe mencionar que este horizonte pierde certidumbre conforme nos alejamos de los perfiles sísmicos. El horizonte obtenido va en un rango de 0.58 s hasta los 2.08 s. Ubicando su máximo espesor al norte de lo que conocemos como la cuenca Cerro Prieto. De forma contraria encontramos el espesor más bajo ubicado sobre la anomalía Tulechek en el oeste del Valle de Mexicali.

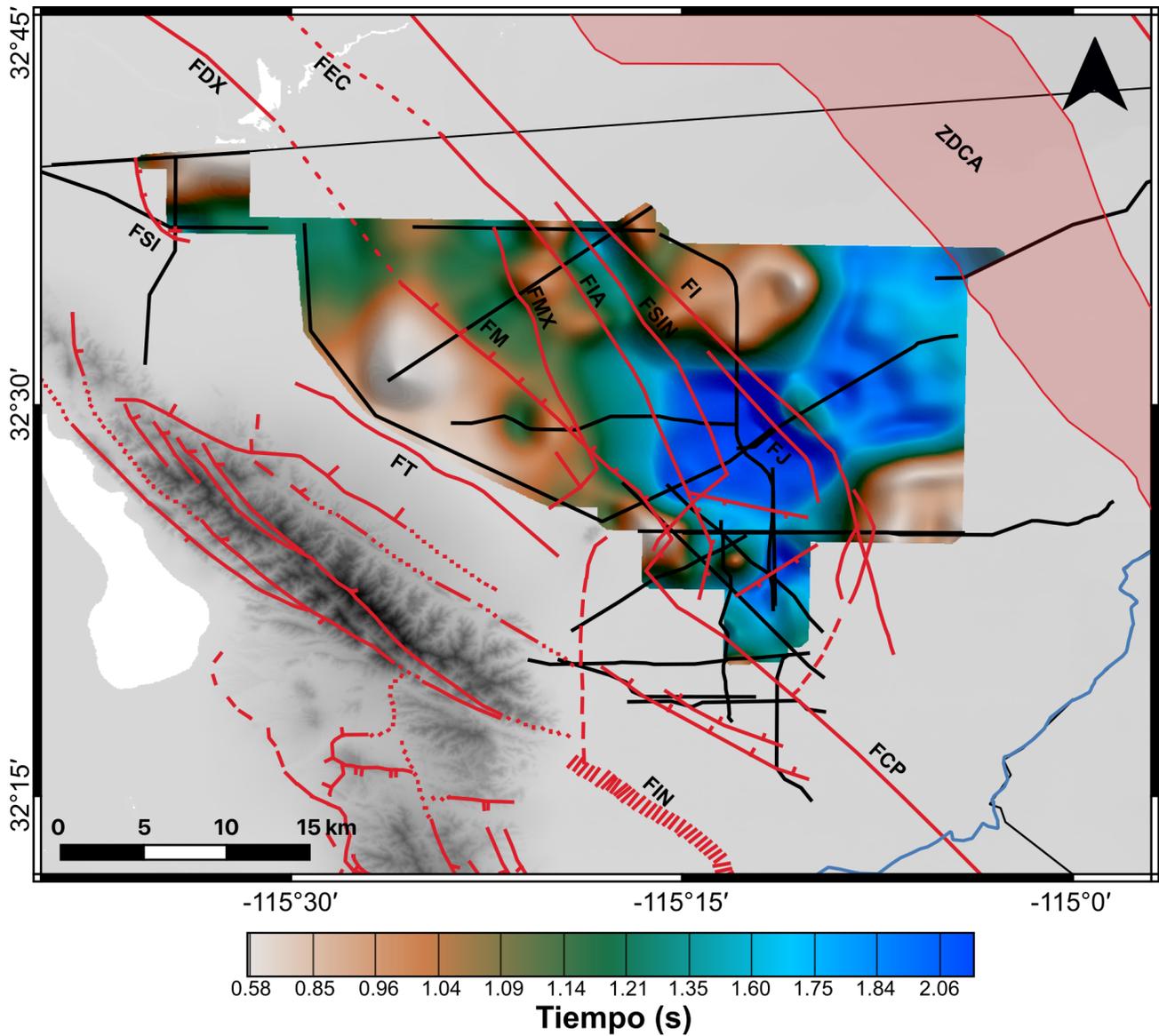


Figura 23: Horizonte del límite litológico entre los sedimentos clásticos no consolidados y los sedimentos consolidados a partir de las observaciones en los perfiles sísmicos. Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019), polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria, líneas negras indican otros perfiles sísmicos utilizados en este trabajo. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP, Zona de Deformación Calipatria—ZDCA

2.10. BASAMENTO DEL VALLE DE MEXICALI

El basamento acústico del Valle de Mexicali sólo logró ser observado en 5 perfiles sísmicos (2, 33-P, 40, 42, 53) ubicados en al oeste del Valle de Mexicali. El perfil sísmico 33-P mostró un basamento con relieve ligeramente irregular y tiempo de viaje doble que varían de 1100 a 2200 ms. Por otro lado los perfiles 2A, 42 y 53 nos mostraron una imagen donde el basamento tiene un drástico cambio en su relieve (≈ 1300 ms) justo donde es cortado por la Falla Santa Isabel.

En orden para tener una vista de planta del basamento se realizó una interpolación en tiempo de viaje doble utilizando los 5 perfiles sísmicos antes mencionados, en esta imagen (Figura 24) se observaron 2 altos en el basamento (café) y un depocentro al suroeste de la Ciudad de Mexicali (azul). La interpolación del basamento mostró una buena correlación con los altos de la anomalía de Bouguer, siendo estas las primeras imágenes reportadas para el basamento oeste del Valle de Mexicali. Cabe mencionar que este horizonte pierde certidumbre conforme nos alejamos de las secciones sísmicas. Los pozos más cercanos son: TC-2, Mex001 y Mex002. Siendo el Pozo TC-2 el único que cuenta con información litológica donde corto basamento a las 1625 mts ([Cobo y Bermejo, 1982](#)), ya que en los pozos Mex0001 y Mex002 reportados por ([Prol Ledesma et al., 2018](#)) solo se reporta la profundidad final, sin embargo se cree que terminaron en basamento.

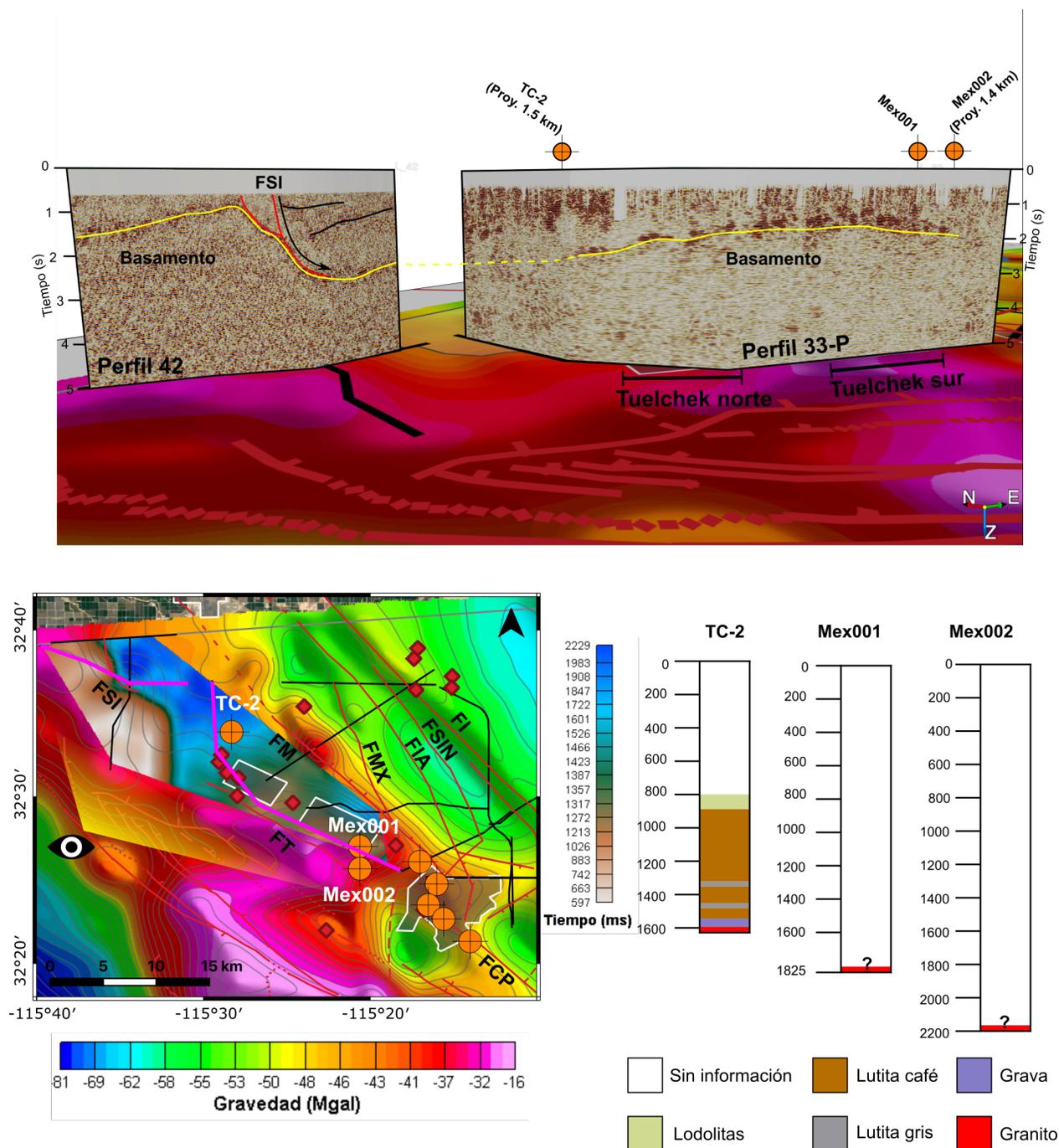


Figura 24: Basamento oeste del Valle de Mexicali observado en perfiles sísmicos 42 y 33-P, con información de pozos cercanos. En imágenes: Líneas color amarillo indican el basamento, líneas color rojo indican fallas, líneas color negro indican reflectores guía. En mapa: Líneas rojas indican fallas reportadas, líneas rojas punteadas indican fallas reportadas inferidas (Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019), líneas color magenta indican los perfiles mostrados en la imagen, líneas negras indican otros perfiles sísmicos utilizados en este trabajo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, contornos color gris indican la anomalía de Bouguer, diamantes color rojo indican emanaciones hidrotermales en superficie (Arango Galván *et al.*, 2015), círculos color naranja indican pozos cercanos que cortaron basamento (Cobo y Bermejo, 1982; Prol Ledesma *et al.*, 2018), icono de ojo indica el punto de vista de la imagen superior. Abreviaturas: Falla Santa Isabel—FSI, Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Isalas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP.

2.11. MODELO GRAVIMÉTRICO-MAGNÉTICO

En la imagen mostrada a continuación (Figura 25) se observa el modelo obtenido y sus curvas de ajuste tanto de gravedad como de magnetismo, este modelo cubrió una distancia de 62.5 km desde el Volcán Cerro Prieto en el Valle de Mexicali hasta la frontera México-EEUU cerca del volcán Pilot Knob en California, EEUU. El modelo se caracterizó por un error RMS (*root median square*) de 3.668 nT para la anomalía magnética y 0.592 mGals para la anomalía gravimétrica entre lo observado y lo calculado. Al tratarse de un modelado realizado de manera manual, y no mediante una inversión iterativa donde se busca llegar al error mínimo, se puede observar un ajuste estadísticamente significativo entre los datos observados y los calculados haciendo que los errores sean cualitativamente aceptables. Se identificaron 3 unidades sedimentarias, 2 unidades de basamento y una nueva unidad de intrusivo constreñidas por información geofísica y geológica. El modelo enfocó en los primeros 10 km de corteza en el Valle de Mexicali de acuerdo a la profundidad inferior de basamento reportado por [Ramírez-Ramos *et al.* \(2015\)](#).

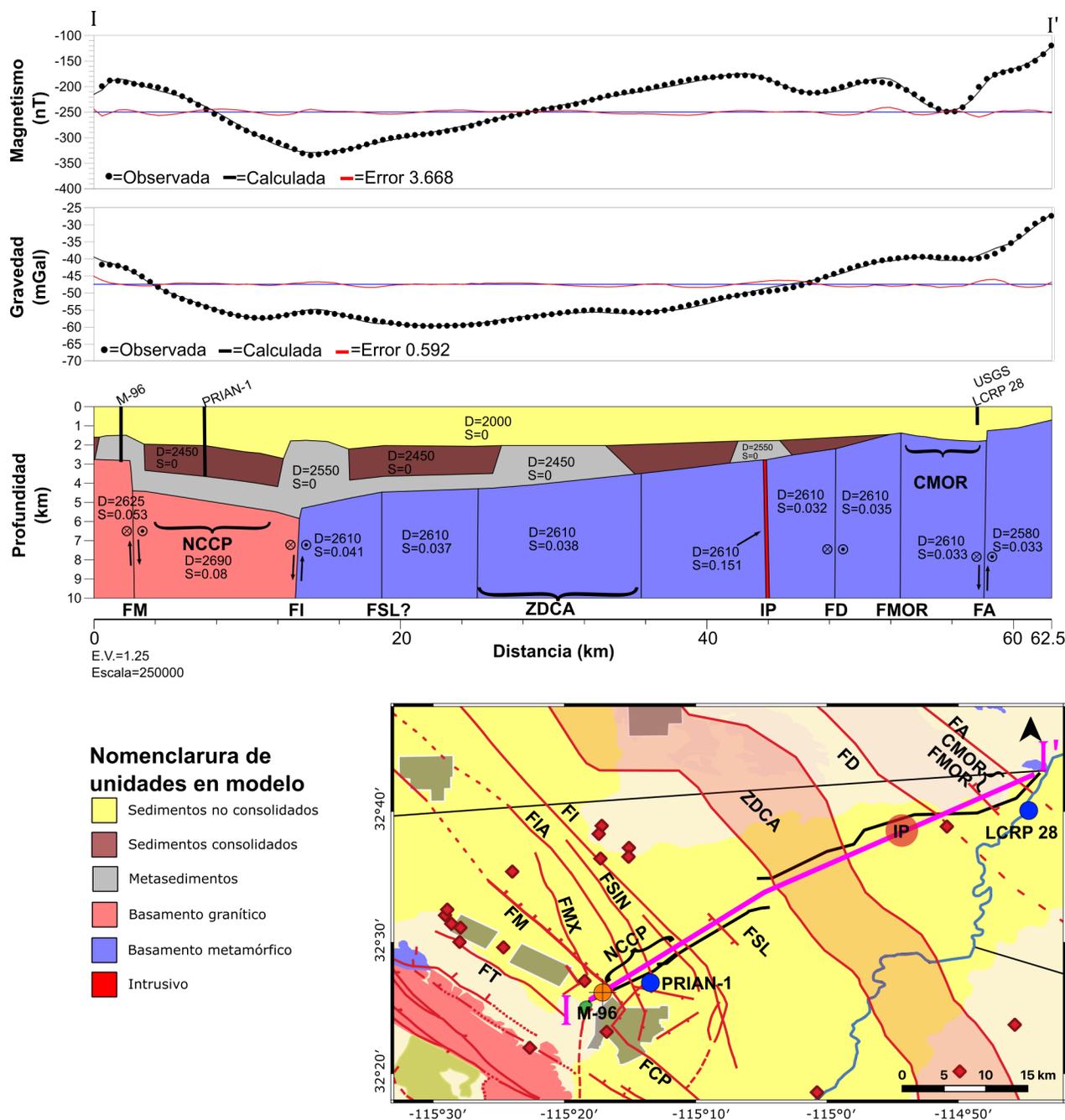


Figura 25: Modelo 2D gravimétrico—magnético, transversal al Valle de Mexicali y su ajuste de anomalías calculadas y observadas. Densidades (D) dadas en kg/m^3 y susceptibilidades magnéticas (S) dadas en 10^{-3}SI . En mapa: En mapa: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas (Lira, 2005; Fletcher et al., 2016; Dorsett et al., 2019; González Escobar et al., 2020), línea color magenta indica la ubicación del modelo 2D, líneas negras indican los perfiles sísmicos utilizados para construir el modelo, polígonos color gris indican yacimientos geotérmicos, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria, diamantes color rojo indican emanaciones hidrotermales en superficie (Arango Galván et al., 2015), círculos color naranja indican pozos cercanos que cortaron basamento, círculos color azul indican pozos que cortaron sedimentos (Olmsted et al., 1973; Cobo y Bermejo, 1982). Abreviaturas: Falla Tulechek—FT, Falla Mexicali—FMX, Falla Islas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSIN, Falla San Luis—FSL, Falla Morelos—FMOR, Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Cerro Prieto—FCP, Falla Calipatria—FCA, Falla Dunas—FD, Falla Algodones—FA, Norte de Cuenca Cerro Prieto—NCCP, Cuenca Morelos—CMOR, Intrusivo Paredones—IP.

2.11.1. BASAMENTO METAMÓRFICO

Esta unidad (morado Figura 25) fue dividida en ocho bloques separados por las principales fallas transversales de la región, mostró una densidad de 2610 kg/m^3 en siete de los ocho bloques. La intensidad magnética se incrementó en dirección al norte de la Cuenca Cerro Prieto. La geometría y profundidades fueron tomadas del perfil sísmico 19. No se logró observar desplazamiento vertical en la falla Dunas, mientras que en la Falla Morelos es observada como un levantamiento del basamento.

2.11.2. BASAMENTO GRANÍTICO

La unidad de basamento granítico fue dividido en dos bloques (rojo claro Figura 25). El primer bloque está ubicado en la parte más al suroeste del perfil, se obtuvo una profundidad de 2.73 km para este bloque con valores de 2635 kg/m^3 y 0.053×10^{-3} SI. El segundo bloque se encuentra subyaciendo el norte de la cuenca Cerro Prieto y se obtuvieron valores de 2700 kg/m^3 y 0.08×10^{-3} SI. La profundidad a la que aparece este bloque se incrementa de 4.5 a 6 km en dirección NE entre las fallas Morelia e Imperial.

2.11.3. INTRUSIVO

A 44 km del extremo NE del perfil sísmico 19 a una profundidad de 3 km, fue inferido un intrusivo (dique) (rojo Figura 25) con una densidad similar a la del basamento metamórfico, sin embargo esta unidad mostró intensidad magnética más alta (0.151×10^{-3}). Esta unidad se atribuye al Intrusivo Paredeones. En este trabajo, la geometría del intrusivo se modeló asumiendo que es un dique. Sin embargo, habría que realizar un modelado más detallado y puntual para definir de mejor forma las dimensiones del intrusivo.

2.11.4. SEDIMENTOS CONSOLIDADOS CON ALTERACIÓN HIDROTHERMAL (ROCAS METASEDIMENTARIAS)

Esta unidad (gris Figura 25) sobreyace la mayor parte del basamento en el área modelada. La densidad obtenida para esta unidad fue de 2550 kg/m^3 , la principal ocurrencia de esta unidad es sobre las fallas mayores (Imperial, Michoacán, Calipatria) y sobre el intrusivo. La ocurrencia de esta unidad es necesaria para el ajuste de los ligeros altos gravimétricos en el perfil y esta constreñida por las ASCBA observada en los perfiles sísmicos.

2.11.5. SEDIMENTOS CONSOLIDADOS SIN ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

Ésta unidad (café Figura 25) se encontró de manera intermitente a lo largo de todo el modelo: Está ausente en la región noreste y forma una cuña entre la unidad de los sedimentos no consolidados y la unidad de basamento metamórfico. Esta ausencia en la región noreste es necesaria para un buen ajuste en la anomalía, donde la profundidad del basamento esta constreñida por la información del perfil sísmico 19. Otra característica que se encontró sobre esta unidad es el remplazo de esta misma por la unidad de sedimentos consolidados con alteración hidrotermal debido a la presencia de fallas mayores y o el contacto directo sobre el basamento o intrusivo (sill), esta última característica también es necesaria para un buen ajuste en la anomalía. La densidad obtenida para esta unidad fue de 2450 kg/m^3 .

2.11.6. SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS

Ésta unidad (amarillo Figura 25) es la capa sedimentaria más somera que cubre la totalidad del área modelada y la mayor parte del Valle de Mexicali, se obtuvieron profundidades $\approx 2\text{km}$ en el norte de la Cuenca Cerro Prieto. Para esta unidad sedimentaria se obtuvo una densidad de 2000 kg/m^3 .

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo hemos aportado propiedades físicas de la rocas como velocidad de onda P, densidad y susceptibilidad magnética así como la manera en que el subsuelo reacciona a los distintos métodos geofísicos utilizados. Por otro lado, también se reportan nuevas estructuras geológicas como fallas y cuencas. Partiendo por la actualización del mapa de estructuras geológicas del Valle de Mexicali como se muestra en la Figura 26, podemos observar que el Valle de Mexicali aún mantiene varias sin revelar debido a que están sepultadas por sedimentos y a que gran parte de su territorio es zona de actividad agrícola, lo cual borra toda evidencia en superficie. Con los resultados obtenidos en este trabajo, continuamos a discutir las diferentes implicaciones que conllevan, direccionándolas hacia tectónica, riesgo sísmico y exploración geotérmica.

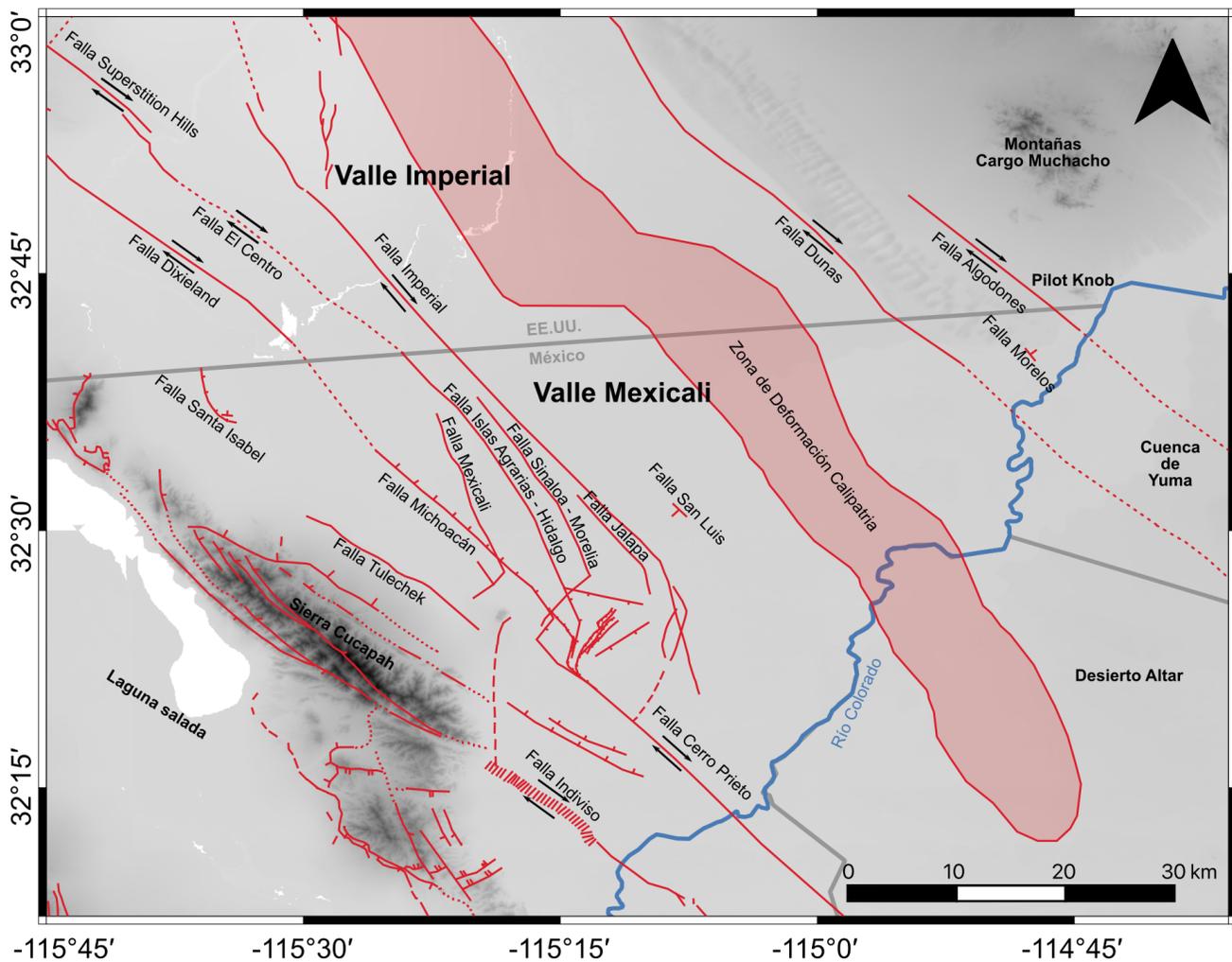


Figura 26: Mapa del Valle de Mexicali con nuevas fallas incorporadas y fallas antes reportadas (Lira, 2005; Fletcher *et al.*, 2016; Dorsett *et al.*, 2019; González Escobar *et al.*, 2020). Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas color rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria.

3.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Se han obtenido velocidades sísmicas de onda P para la cubierta sedimentaria del Valle de Mexicali resultando en valores de 1.7 a 2.6 km/s y para el basamento metamórfico se obtuvieron valores que van de 2.6 a 3.5 km/s. Las velocidades de la cubierta sedimentaria son consistentes con las velocidades de ≈ 2 km/s para la capa sedimentaria y ≈ 4 a >6 km/s para el basamento cristalino reportadas por [Han *et al.* \(2016\)](#) a partir de perfiles sísmicos de refracción de alto ángulo en el Valle Imperial, EE.UU. Sin embargo, las velocidades propuestas aquí para el basamento metamórfico son significativamente menores a las propuestas por [Persaud *et al.* \(2016\)](#) (5.65 km/s) en el Valle Imperial. Esta diferencia se puede deber, entre otras cosas, a que las velocidades sísmicas de [Persaud *et al.* \(2016\)](#) fueron basadas en velocidades de onda P reportadas por [Fuis *et al.* \(1984\)](#) las cuales fueron obtenidas a partir de experimentos de laboratorio y nuestras velocidades son V_{rms} , obtenidas a partir del método de semblanza durante el picado de velocidades, las cuales consideran toda la longitud del registro resultando en una velocidad con menor incertidumbre. Esta discrepancia en las velocidades de basamento puede explicar la diferencia entre las profundidades de este observadas en la región más oriental tanto del Valle Imperial como del Valle de Mexicali, donde [Persaud *et al.* \(2016\)](#) reporta profundidades de basamento de 3 km, mientras que en este trabajo obtuvimos profundidades de basamento de 1 km en el noreste del Valle de Mexicali.

Por otro lado, hablando de los métodos potenciales, comparando los valores de densidad y susceptibilidad magnética, encontramos que nuestro modelo resultó en valores de susceptibilidad magnética ligeramente más altos ($\approx 0,020 \times 10^{-3}$ SI) que los valores reportados por [Fuis *et al.* \(2017\)](#) en el Valle Coachela. Cabe mencionar que sus valores se tomaron como valores de inicio para nuestro modelo, sin embargo, se observó que era necesario este aumento en los valores de susceptibilidad magnética para tener un buen ajuste del modelo. Por otra parte, se coincidió en la idea de que el basamento metamórfico de la placa norteamericana tiene tanto una menor susceptibilidad magnética como una menor densidad que el basamento ígneo de la placa del Pacífico.

3.3. ANOMALÍAS CAÓTICAS DE BAJA AMPLITUD (ASCBA)

Una de las principales características del Valle de Mexicali es la respuesta sísmica que tienen las fallas que se encuentran en él. Esta respuesta sísmica se observa como una anomalía caótica de baja amplitud (ASCBA) la cual en la mayoría de los casos viene acompañada, en sus costados, por estratos reflectores muy bien definidos que súbitamente desaparecen conforme se acercan a estas anomalías. Sin embargo, no es la primera vez que se reportan este tipo de anomalías en la región, [Van de Kamp et al. \(1978\)](#) las reportaron como *poor reflection zone* (PRZ) en el campo geotérmico East Mesa, en el Valle Imperial, comentando que estas anomalías están fuertemente asociadas a zonas productoras para este campo. [Lyons y Van de Kamp \(1980\)](#) y [Majer y McEvelly \(1982\)](#) por su parte, reportaron estas mismas anomalías en el CGCP donde [Majer y McEvelly \(1982\)](#) las denominaron *zona de atenuación de reflejos* (ZAR). Estos estudios han sugerido que estas anomalías están relacionadas a zonas fracturadas que pueden causar dispersión de ondas sísmicas ([Van de Kamp et al., 1978](#)), lo que provoca estas ASCBA. En el CGCP estas zonas fracturadas pueden ser invadidas por fluidos geotérmicos de alta temperatura (150° C - 250° C) ([Elders et al., 1978](#)) generando alteración hidrotermal en la roca y endureciéndola, aumentando su densidad de manera considerable generando un alto en la anomalía de Bouger con ausencia de anomalía magnética, como se ha observado en el Campo Geotérmico East Mesa ([Van de Kamp et al., 1978](#)).

Teniendo esto en cuenta, el mapeo de las ASCBA's en el Valle de Mexicali apoyado de métodos potenciales como la gravimetría y magnetometría, puede ser un buen indicador para regiones de interés geotérmico. En este trabajo hemos observado la presencia de ASCBA a lo largo de las fallas principales (Michoacán, Imperial, Calipatria) así como en la Falla Islas Agrarias, esto puede sugerir que dichas fallas han generado importantes zonas de fracturamiento en la corteza sedimentaria en el Valle de Mexicali, siendo la de mayor ancho la Zona de Deformación Calipatria. Si complementamos con la información gravimétrica y magnética, observamos que la Falla Imperial se correlaciona de buena forma con un ligero alto gravimétrico con ausencia de anomalía magnética, siendo la anomalía Aeropuerto Oeste (Figura 13) el punto con la anomalía gravimétrica más alta,

este conjunto de características geofísicas también se observa de buena forma a lo largo de la Zona de Deformación Calipatria en los sitios de Aeropuerto Este y Lagunitas norte, haciendo de estos, importantes prospectos para la exploración geotérmica. Por otro lado, en el caso de la Falla Michoacán, esta presenta posible densificación, como se observa en el modelo gravimétrico-magnético (Figura 25) en el sur de la falla, sin embargo, conforme nos movemos hacia el noroeste, a lo largo de la falla, se vuelve complicado saber si existe o no una anomalía gravimétrica derivada de este fenómeno, debido a su cercanía con la anomalía gravimétrica Tulechek la cual puede estar enmascarando la posible existencia de esta anomalía gravimétrica, siendo el único punto observable la anomalía Puebla, sin embargo, el pozo M-4 perforado en este alto gravimétrico no presentó alteración hidrotermal ni temperaturas comercialmente atractivas (Cobo y Bermejo, 1982).

3.4. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS EN EL VALLE DE MEXICALI

3.4.1. ZONA DE DEFORMACIÓN CALIPATRIA

Poco se ha hablado de la geometría de la falla Calipatria, se ha propuesto su inicio en el Mar Salton, California (Lynch y Hudnut, 2008) y se ha inferido su continuación hacia el Valle de Mexicali. El mapa de anomalía de Bouguer reportado por Biehler (1971) muestra una serie de altos gravimétricos asociados a zonas y yacimientos geotérmicos (East Brawley y East Mesa) en el Valle Imperial (Figura 27). Estos han sido asociados a metamorfismo de la corteza sedimentaria debido al ascenso de fluidos geotérmicos Van de Kamp *et al.* (1978). En el Valle de Mexicali también hemos encontrado este tipo de anomalías gravimétricas, caracterizadas por ausencia de anomalía magnética, como Aeropuerto Este y Lagunitas Norte mostradas en la Figura 15. Estas anomalías gravimétricas también muestran una alineación NW-SE. Por otro lado, existe correlación de ASCBA's reportadas en el Campo Geotérmico East Mesa (Van de Kamp *et al.*, 1978), con la observada en el perfil 19 (Figura 17) en el Valle de Mexicali y con las inferidas en los perfiles de Puente Huerta (2019) y Pacheco *et al.* (2006) en el Desierto de Altar, Sonora, incluso se han

observado más al sureste en el perfil sísmico 4993 mostrado por [Vega-Saucedo \(2016\)](#). Todas estas ASCBA's y altos gravimétricos con ausencia de anomalía magnética (Aeropuerto Este y Lagunitas Norte) tienen una tendencia que se alinea en dirección NW-SE. Pozos perforados en el Campo Geotérmico East Mesa sobre las ASCBA, han mostrado corteza sedimentaria altamente fracturada, lo que puede provocar dispersión de las ondas sísmicas, y por ende una falta de reflexión sísmica y coherencia en los perfiles sísmicos ([Van de Kamp *et al.*, 1978](#)). Siendo esto evidencia de una zona de deformación ocasionada por una falla transformante con rumbo NW-SE probablemente activa, debido a la sismicidad observada en la Figura 11, que si bien es poca en comparación con la sismicidad observada a lo largo de la Falla Imperial, se ha documentado un sismo de magnitud $M=6.5$ en el año 1852 sobre dicha zona de deformación. En todo caso el periodo de recurrencia para un sismo grande ($M>6$) sobre esta zona de deformación debe ser más largo que el de las fallas con mayor actividad sísmica (Imperial, Cerro Prieto, Indiviso) pero aun así con gran probabilidad de ocurrencia.

Basándose en el ancho de las ASCBA's en los perfiles sísmicos, se puede observar una anchura de la zona de deformación de 10 a 15 km aproximadamente, siendo cinco o seis veces más ancha que las ASCBA's observadas en las fallas Imperial y Cerro Prieto (2.5 km), esta diferencia en el ancho de la zona de deformación puede deberse a que la corteza estuvo sujeta a deformación durante un periodo de tiempo más largo. Posiblemente debido a que fungió como el límite de placas Pacífico—Norte América antes de que migrara hacia el SW a lo largo de las Fallas Cerro Prieto e Imperial, siendo un este un fenómeno similar al observado al ocurrir el sismo El Mayor Cucapah ($M=7.2$), el cual a partir de su generación la sismicidad migró hacia la Falla Indiviso, lo que ha sugerido a esta falla como el nuevo límite de placas Pacífico—Norteamérica ([Hauksson *et al.*, 2011](#); [Wei *et al.*, 2011](#); [Fletcher *et al.*, 2014, 2016](#)).

La extensión de la zona de deformación Calipatria hacia el sureste del Valle de Mexicali-Delta del Colorado aún no es clara, sin embargo, a pesar de la aparición de una ASCBA en el perfil 4993 mostrado por [Vega-Saucedo \(2016\)](#), que en conjunto con una anomalía gravimétrica con ausencia de anomalía magnética podrían correlacionarse con esta zona de deformación. Sin embargo, el perfil sísmico 4985-B y 4989 mostrados por [Chanes Martínez et al. \(2014\)](#) y [Sánchez-García \(2013\)](#) ubicados entre la anomalía antes mencionada y la ASCBA observada en el perfil 35 de [Pacheco et al. \(2006\)](#), no muestra con claridad las características sísmicas de las ASCBA como en otros perfiles sísmicos reportados. Con todo esto, es probable que la zona de deformación Calipatria tenga su inicio en el Mar Salton justo donde termina la Falla San Andres, y se extienda hasta el Desierto de Altar como una ramificación del *abanico* formado por la terminación de la Falla San Andres similar al modelo observado en la Figura 2 teniendo al menos una longitud de 135 km.

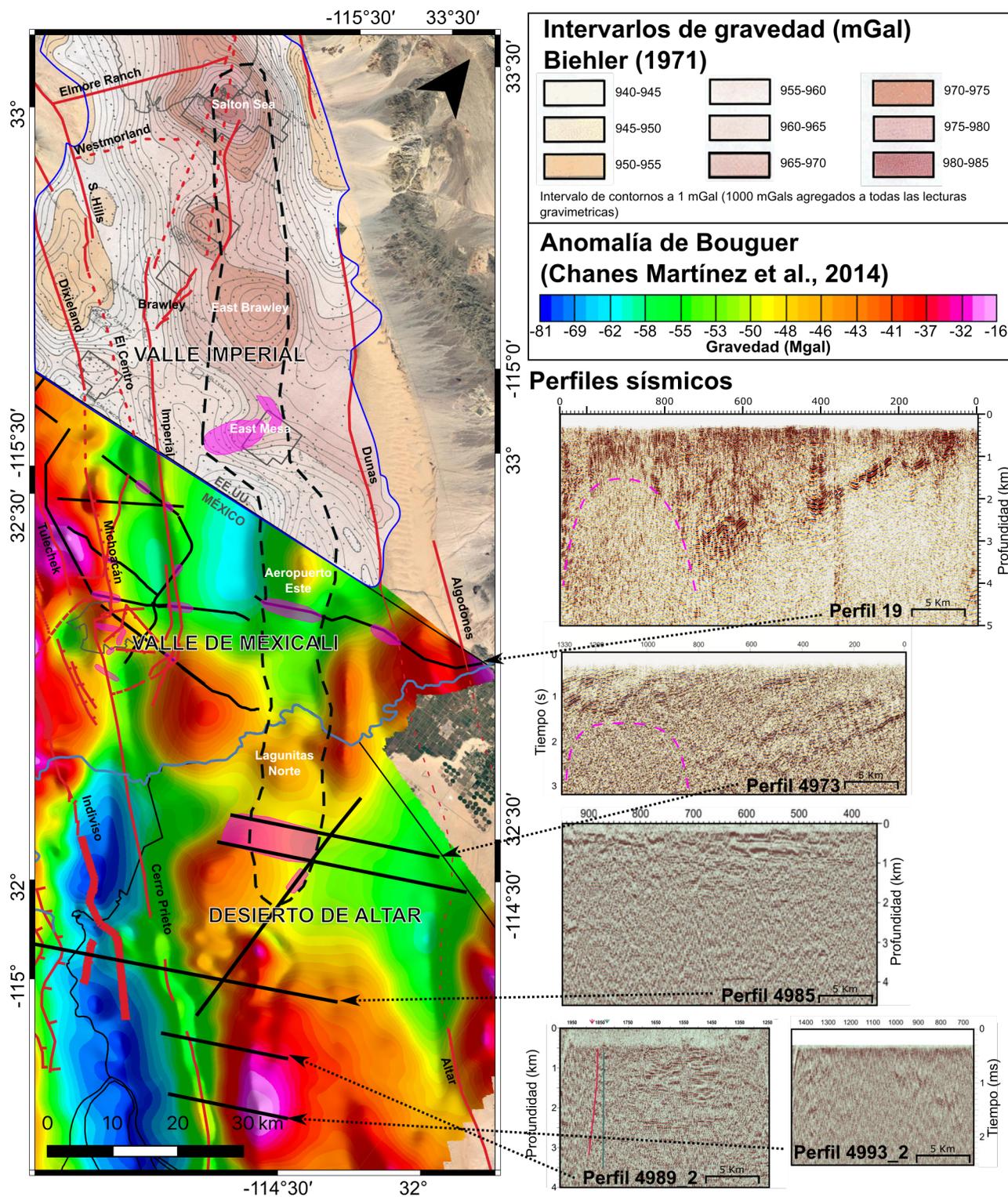


Figura 27: Zona de deformación Calipatria en mapas de anomalía de Bouguer (Biehler, 1971; Chanes Martínez et al., 2014). Polígono punteado color negro indica la Zona de deformación Calipatria, líneas negras indican los perfiles sísmicos, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígonos color gris indican campos geotérmicos en explotación, polígonos color magenta indican ASCBA reportadas en este trabajo y por Van de Kamp et al. (1978); Pacheco et al. (2006); Puente Huerta (2019), polígono color azul indica el límite del levantamiento gravimétrico de Biehler (1971). Letras en color negro indican el nombre de las fallas y letras en color blanco indican el nombre de las anomalías gravimétricas. Fallas tomadas de Lira (2005); Fletcher et al. (2016); González Escobar et al. (2020); Dorsett et al. (2019).

3.4.2. FALLA MICHOACÁN

Uno de los principales aportes de este trabajo es la confirmación de la Falla Michoacán ([Puente y De la Peña, 1978](#)) en el Valle de Mexicali. Su importancia radica en que esta falla puede ser la conexión entre la Falla Cerro Prieto, en el Valle de Mexicali, y la Falla Dixieland en el Valle Imperial ([Dorsett *et al.*, 2019](#)). Pudiendo ser estas tres fallas un límite de placas importante en el Valle de Mexicali. Sin embargo, aún queda abierto a discusión la geometría del enlace entre Michoacán y Dixieland. Pudiendo ser una conexión directa como se propone en la Figura 26, o esta conexión podría estar dada por una falla normal con escalonamiento derecho y rumbo N10°E la cual sirve como conducto para alimentar el Campo Geotérmico Heber ([James *et al.*, 1987](#)) como lo ha propuesto [Magistrale \(2002\)](#) uniendo los lineamientos sísmicos L1 y L3. Sin embargo, la geometría para la Falla Michoacán propuesta por [Magistrale \(2002\)](#) (L3) se encuentra a 9 km de separación de la falla Dixieland. Si proyectamos el extremo noreste de lo que se conoce de la Falla Michoacán propuesta en este trabajo, la distancia resultante entre Dixieland y Michoacán sería de 2 km aproximadamente. Sin embargo la geometría de dicha falla reportada por [James *et al.* \(1987\)](#) no se acomoda a las geometrías de las fallas aquí propuestas. Se recomienda trabajo más puntual para solucionar la manera en que estas dos fallas se unen.

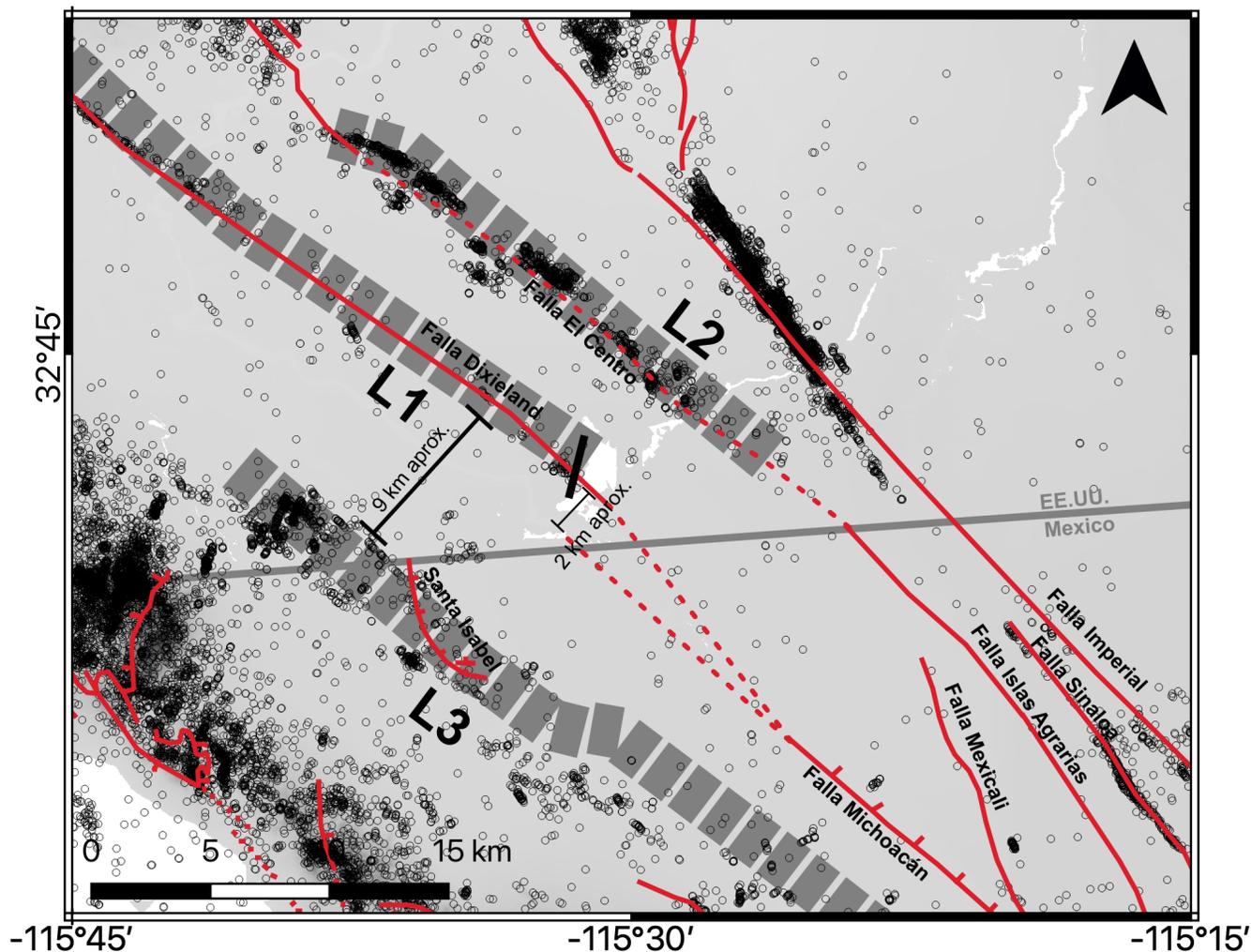


Figura 28: Posibles uniones entre Michoacán y Dixieland. Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, líneas gruesas punteadas color gris indican los lineamientos propuestos por Magistrale (2002), círculos negros indican sismicidad de la base de datos de SCEDC, línea gruesa negra indica la falla que alimenta al Campo Geotérmico Heber reportada por James *et al.* (1987) .

Otra característica importante de esta falla es que cuenta con una componente normal, convirtiéndola en una falla transformante oblicua, todo esto aumenta la probabilidad de que esta falla controle la profundidad del basamento que existe al oeste de ella y a su vez el basamento existente entre las Falla Michoacán y la Falla Imperial, esta idea también es sustentada por los pozos (Cobo y Bermejo, 1982; Lira, 2005; Prol Ledesma *et al.*, 2018) que cortaron basamento al oriente de dicha falla (Figura 3).

3.4.3. CUENCA CERRO PRIETO

Dentro del *step over* formado entre las fallas Imperial y Michoacán, hemos observado que el perfil sísmico 19 muestra una estructura de flor negativa como se observa en la Figura 29, estas estructuras se observan con claridad en cortes transversales a las cuencas de tipo *pull apart* formadas en este tipo de ambiente tectónico. La imagen de esta estructura pone en evidencia que la extensión hacia el norte de la cuenca Cerro Prieto va más allá de la falla Morelia como se había propuesto (Suárez Vidal *et al.*, 2008). Por otro lado, en el horizonte mostrado en la figura 23 se observa de mejor manera la geometría de la cuenca Cerro Prieto, que es cortada por una serie de fallas semi paralelas con orientación NW-SE, siendo la falla Mexicali el límite noroeste de la cuenca. Con todo esto la extensión norte de la cuenca Cerro Prieto podría proyectarse hasta el oriente de la Ciudad de Mexicali.

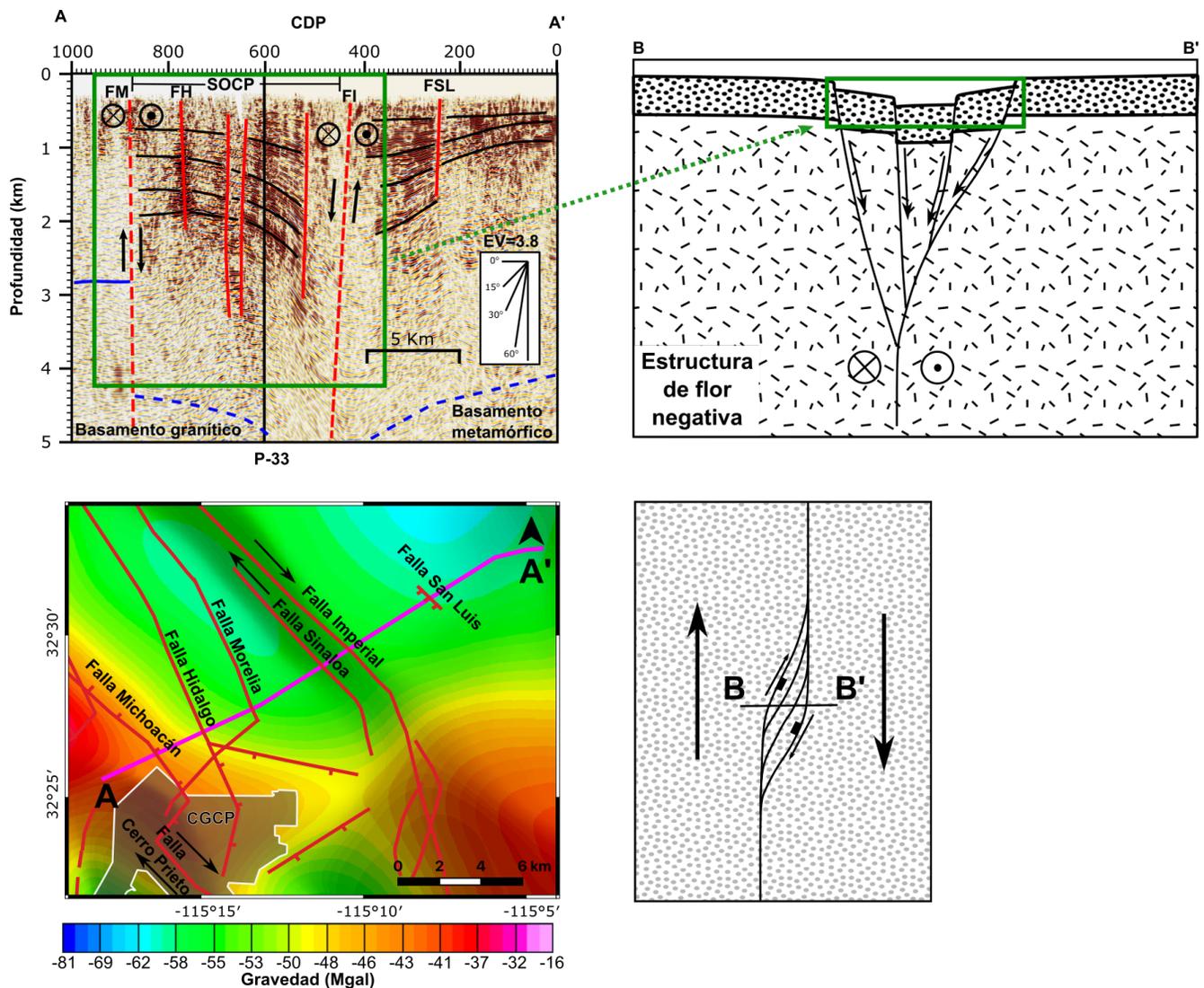


Figura 29: Estructura de flor negativa observada en el step over Cerro Prieto: Líneas rojas indican fallas, líneas rojas punteadas indican fallas inferidas, líneas color azul indican basamento, líneas punteadas color azul indican basamento inferido. En Mapa: Líneas rojas indican fallas, polígono gris indica el Campo Geotérmico Cerro Prieto, Línea magenta indica el perfil sísmico mostrado. Abreviaturas: Falla Imperial—FI, Falla Michoacán—FM, Falla Hidalgo—FH, Falla San Luis—FSL, Step Over Cerro Prieto—SOCP, Campo Geotérmico Cerro Prieto—CGCP, Exageración vertical—EV. Modelo tomado de [Kearey et al. \(2009\)](#).

3.4.4. RAZÓN LARGO–ANCHO DE TRASLAPE

[van Wijk *et al.* \(2017\)](#) propusieron modelos numéricos para la deformación de corteza superior direccionándolo al origen y evolución de cuencas de tipo *pull apart*. Estos autores sugirieron que las cuencas *pull apart* con una *razón largo–ancho de traslape* alto ($> 3 : 1$), son más propensas a tener ruptura continental que aquellas cuencas con *razón largo–ancho de traslape* menor. Teniendo esto en cuenta, al tratar a la Fallas Cerro Prieto–Michoacán–Dixieland como una misma falla, implica que la *razón largo–ancho de traslape* actual del *step over* formado entre estas dos fallas transformantes (FCP-FM-FDX y FI) sería de aproximadamente 5:1 (80 x 15 km) (Figura 30 A), siendo este valor relativamente alto, resultando en una cuenca de forma romboidal alargada con muy poca o nula elevación de sus flancos, donde este tipo de geometría cae en una cuenca que comenzó con un traslape entre sus fallas mayor al ancho entre estas mismas fallas (Figura 30 B), haciendo de esta una cuenca donde la *razón largo–ancho de traslape* es propicia para el rompimiento de corteza, diferente a las cuencas del norte del Golfo de California, donde esta razón es menor o igual a 1 ([van Wijk *et al.*, 2017](#)). Otra característica de este *step over* es que las fallas principales son oblicuas (Dextrales con componente normal), como se ha observado en los perfiles sísmicos que cortan estas fallas (Perfiles 23, 23-P, 33 y 40), siendo esta otra característica del modelo propuesto por [van Wijk *et al.* \(2017\)](#) (Figura 30 C). El que la *razón largo–ancho de traslape* sea alta podría ser la causa de la existencia de intrusiones magmáticas que puedan estar llegando a la superficie como el caso del Volcán Cerro Prieto, o de intrusiones que quedan relativamente someras y que solo reflejan en la gravimetría y magnetometría. Con todo esto, la única incógnita sería sobre la ubicación del extremo noroeste de este *step over*, ya que las únicas fallas transversales a las fallas principales son Westmorland y Elmore Ranch ubicadas en el Valle Imperial al sur del Mar Salton.

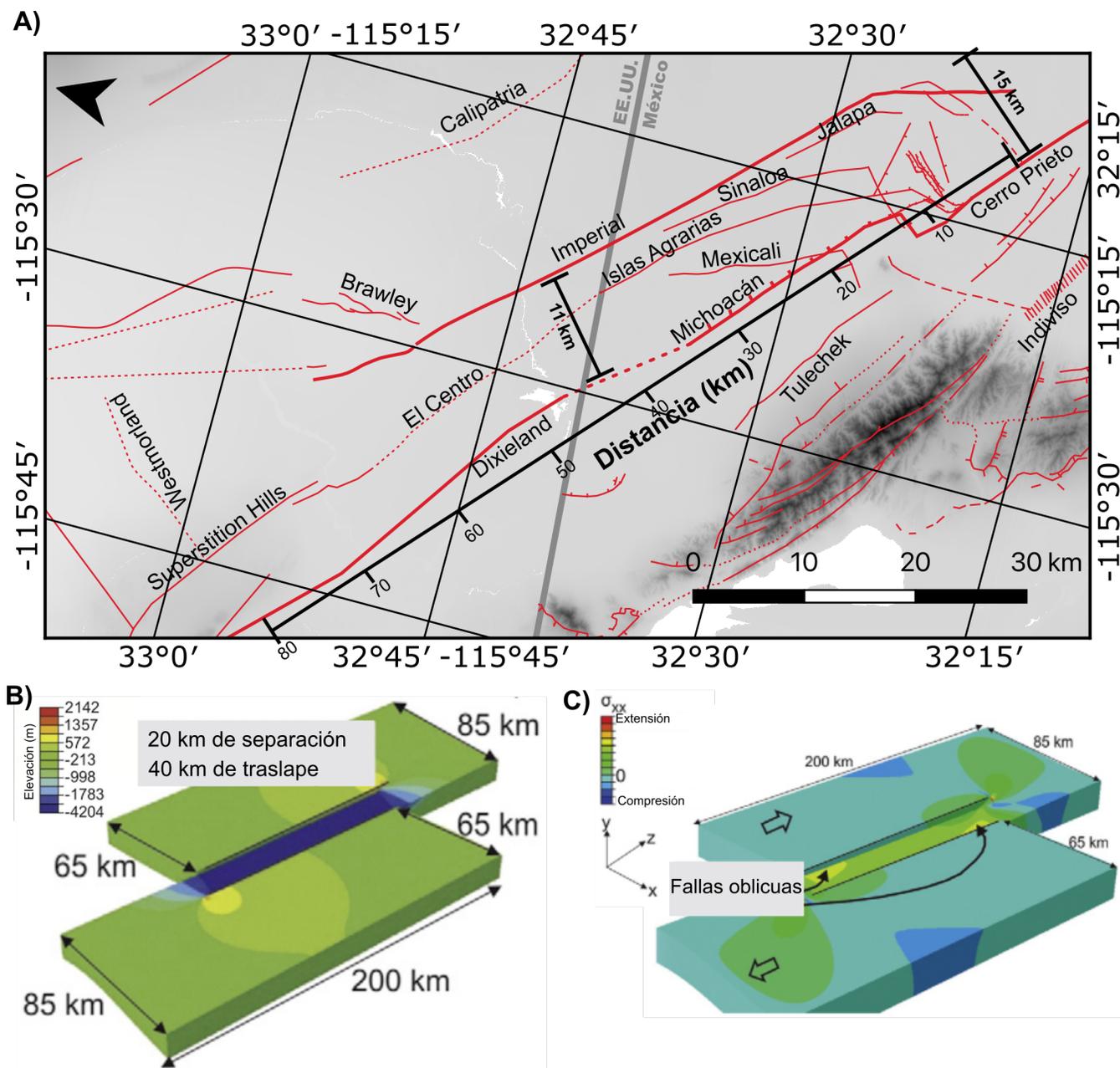


Figura 30: Comparación del *step over* formado entre Imperial y Dixieland–Michoacán–Cerro Prieto y el modelo de evolución de [van Wijk et al. \(2017\)](#). A) Mapa con nuevas fallas propuestas para el Valle de Mexicali e Imperial con su distancia de traslape y distancia entre fallas maestras. Líneas gruesas color rojo indican las fallas maestras tomadas en cuenta, líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas. B) Geometría inicial de las fallas para una separación de 20 km y 40 km de traslape. Mostrando una cuenca *pull apart* de forma romboidal. C) Tensión desviadora en la dirección σ_{xx} de un *step over* con traslape de fallas después de 5 ma. El modelo predice movimiento normal en las fallas maestras. Modelos tomados de [van Wijk et al. \(2017\)](#).

De igual manera, el conjunto de fallas observadas entre las Fallas Michoacán e Imperial son de gran relevancia. La forma escalonada de este conjunto de fallas puede ser un indicador de como el intrusivo que ocasiona la anomalía Tulechek impide el rompimiento cortical sobre él, obligando a transferir el desplazamiento a través de fallas con un escalonamiento derecho hacia el noreste, incluyendo el posible límite de placas Cerro Prieto-Michoacán.

3.4.5. TASAS DE DESLIZAMIENTO

Más allá de la geometría de las fallas, la conexión entre estas fallas y las fallas ubicadas en el Valle Imperial se vuelve relevante para el modelado de tasas de deslizamiento en esta región. Ya que para la Falla Imperial se ha propuesto una tasa de deslizamiento de 15 a 40 mm/a , sugiriendo los 35 mm/a como la más recomendada (Field *et al.*, 2014). Sin embargo, algunos autores han sugerido tasas de deslizamiento menores. Thomas y Rockwell (1996) reportan de 15 - 20 mm/a en los últimos 300 a 550 años a través de mediciones en trincheras sobre la Falla Imperial. Por su parte Lindsey y Fialko (2016) reportaron 25 mm/a de tasa de desplazamiento para la Falla Imperial por medio de observaciones con GPS, proponiendo una falla oculta entre Imperial y el Sur de la Falla San Jacinto que puede aportar el desplazamiento faltante. Más recientemente Dorsett *et al.* (2019) propone las fallas El Centro y Dixieland a través de modelado mecánico en el Valle Imperial proponiendo por primera vez tasas de deslizamiento de $< 2mm/a$ y de 3.5 - 9.6 mm/a respectivamente para estas fallas. Sin embargo a pesar de todo esto sigue habiendo una faltante de ≈ 15 mm/a . Por lo cual las nuevas estructuras reportadas en este trabajo son de gran importancia para la búsqueda de esta faltante.

Teniendo en cuenta lo anterior, la geometría de la extensión de la Falla Cerro Prieto hacia el norte no ha sido tomada en cuenta acorde a la manera expuesta en este trabajo, así como su conexión con la Falla Dixieland. Para esta falla se han medido tasas de deslizamiento de 3.2 mm/a utilizando deslizómetros (Louie *et al.*, 1985) y más recientemente, Dorsett *et al.* (2019) estimaron

hasta un máximo de 9.6 mm/a para esta misma falla, comentando que aún así no se completa el déficit que existe entre los 35 mm/a propuestos por Field *et al.* (2014) y el modelo que predice un máximo de 15.1 mm/a para la Falla Imperial.

Por otro lado, la similitud entre las ASCBA's provocadas por las fallas Islas Agrarias e Imperial observadas en el perfil 23-P (Figura 31) puede ser un indicio de que la falla Islas Agrarias - El Centro es una superficie importante de deslizamiento en el límite de placas, y la tasa de deslizamiento propuesta por Dorsett *et al.* (2019) (1.1 -1.9 mm/a) pudo haber sido subestimada, ya que no se tomó en cuenta la geometría propuesta en este trabajo, en donde dicha falla no se conecta con la Falla Imperial. Pudiendo estar en esta falla el faltante para completar la tasa de deslizamiento de la Falla Imperial.

Dicho esto, es necesario incorporar todas estas fallas y su geometría en futuros modelados de tasas de deslizamiento para encontrar ese faltante. También hay que comenzar a tomar a la cuenca Cerro Prieto solo como el extremo suroeste del *step over* formado entre Imperial y Cerro Prieto-Michoacan-Dixieland, el cual se puede extender hasta la Ciudad de Mexicali e incluso hasta el Valle Imperial.

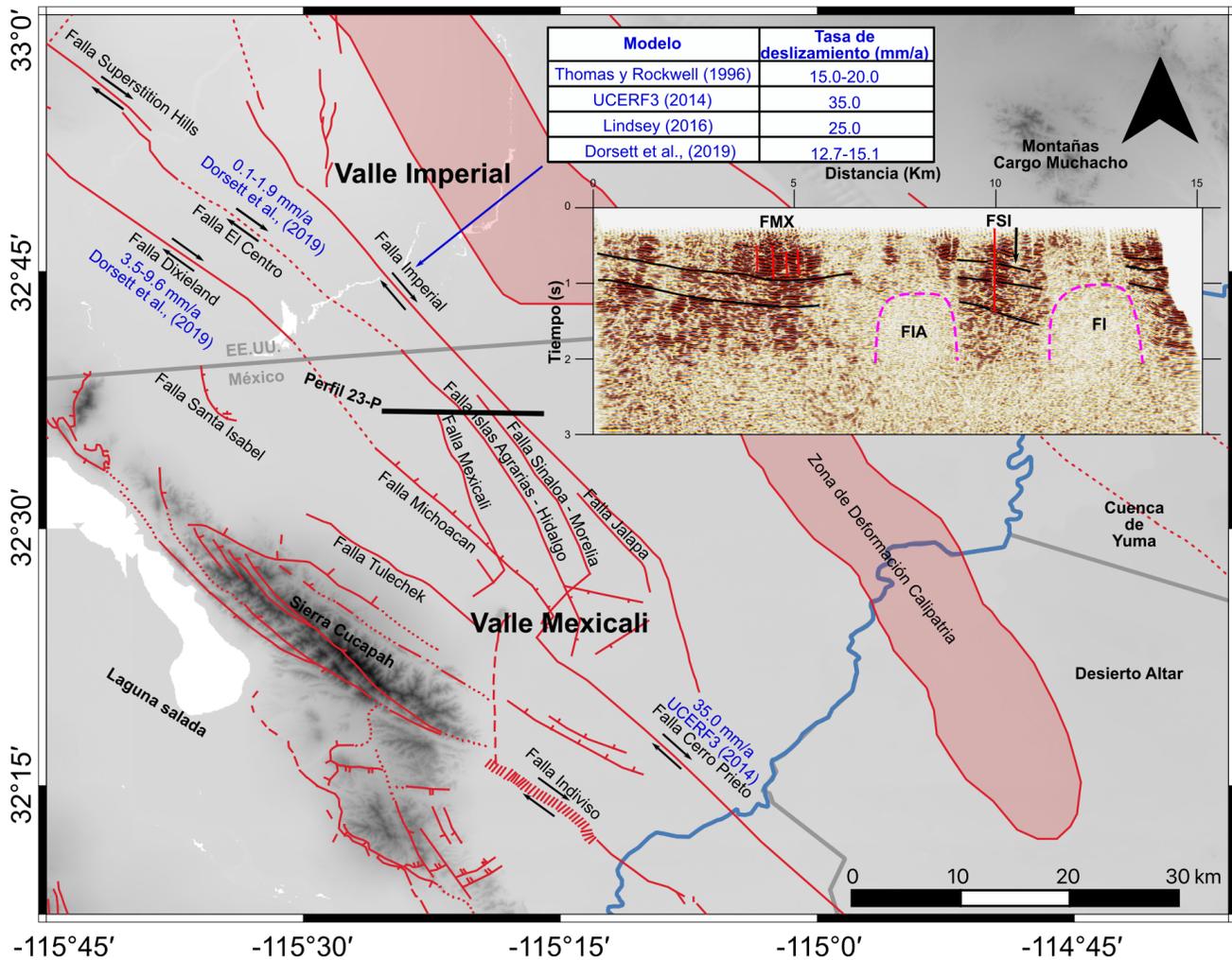


Figura 31: Mapa actualizado con las fallas propuestas en este trabajo con tasas de deslizamiento reportadas e imagen sísmica interpretada del perfil 23-P. En mapa: Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en color rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígono rojo indica la Zona de Deformación Calipatria. En imagen sísmica: Líneas color rojo indican principales fallas, líneas negras indican reflectores sísmicos, líneas punteadas magenta indican ASCBA. Abreviaturas: Falla Mexicali—FMX, Falla Islas Agrarias—FIA, Falla Sinaloa—FSI, Falla Imperial—FI.

3.5. PELIGRO SÍSMICO EN EL VALLE DE MEXICALI

La mayor información sobre peligro sísmico que se tiene actualmente está resumida en el atlas de riesgo sísmico del municipio de Mexicali (*Ley García et al., 2011*). Sin embargo, centrándose en la zona urbana de la ciudad de Mexicali, este informe solo toma en cuenta dos fallas principales, las Fallas Imperial y Michoacán (Figura 7). Y si bien es cierto que, a estas fallas junto con las fallas Cerro Prieto e Indiviso, se les atribuye la generación de sismos grandes y que los sismos menores se generan entre estas fallas o cerca de ellas, las fallas propuestas en este trabajo no se han tomado en cuenta para este tipo de estudios. Estas fallas son de suma importancia ya que se encuentran cerca o debajo de lo que actualmente es la zona urbana de la ciudad de Mexicali, siendo la localidad con mayor número de habitantes ($\approx 1,000,000$) y localidades con concentración de habitantes menores pero importantes (15,000 a 50,000), como lo son Santa Isabel, Ejido Puebla y Guadalupe Victoria. Principalmente las fallas Islas Agrarias, Mexicali y Santa Isabel ubicadas al este, sureste y oeste de la zona urbana de la ciudad de Mexicali respectivamente,.

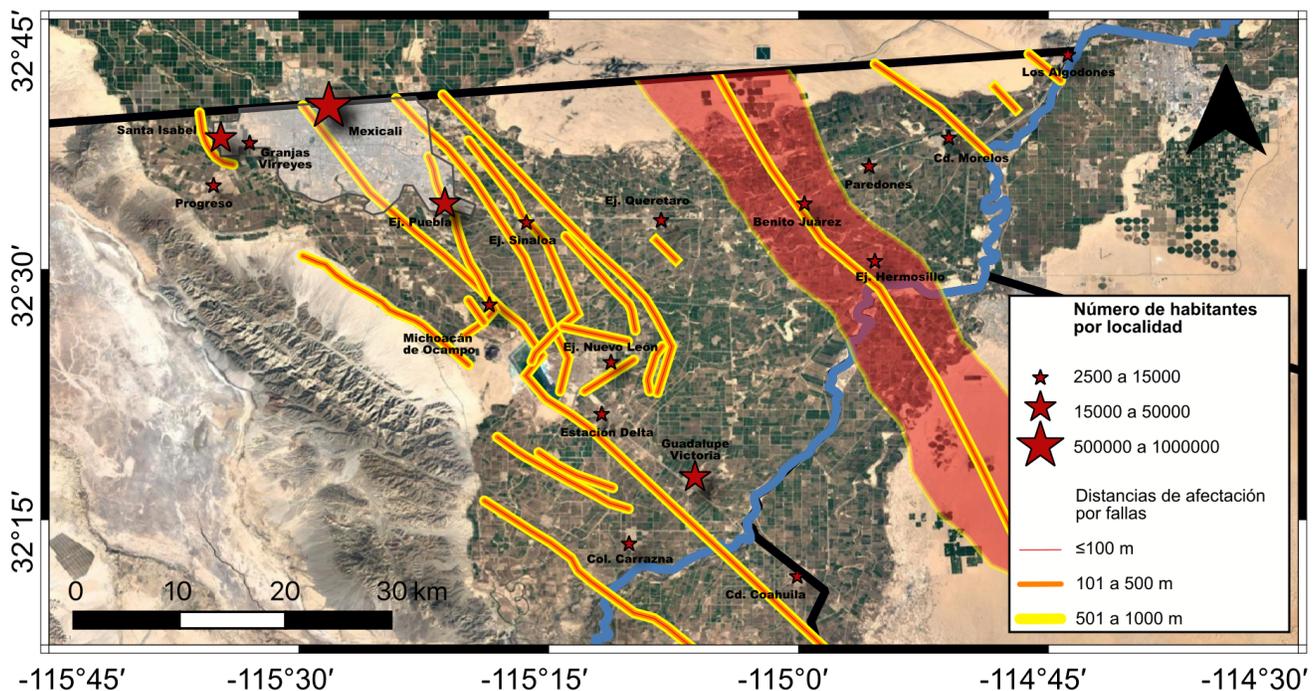


Figura 32: Zonificación por fallas del Valle de Mexicali incluyendo fallas de este trabajo.

De estas tres nuevas fallas la que llama más la atención con respecto a este tema es la Falla Islas Agrarias, debido a lo comentado con anterioridad, esta falla puede fungir como un límite de placas importante (Dorsett *et al.*, 2019) por su similitud con la Falla Imperial (Figura 31), y si se toma en cuenta que la baja tasa de deslizamiento modelada para la falla El Centro ($< 2\text{mm/a}$) podría ser similar a la tasa de deslizamiento de la falla Islas Agrarias debido a su posible conexión, todo esto podría indicar una lenta acumulación de energía y a su vez un periodo de retorno más largo comparado con la Falla Imperial. Sin embargo, es necesario realizar nuevos modelados mecánicos para determinar las tasas de deslizamiento de estas nuevas estructuras en el Valle de Mexicali.

Por otro lado, una tasa de deslizamiento baja para la Falla Michoacán podría justificar la disminución de actividad sísmica registrada en las cercanías de la zona urbana de Mexicali con respecto a resto de los Valles de Mexicali e Imperial (Figura 11). Aunque también existe la posibilidad de que este fenómeno sea efecto del ruido que produce la zona urbana y este ruido este enmascarando los sismos que pudieran estar ocurriendo debajo la ciudad de Mexicali. Sin embargo, este fenómeno no es atípico en la región, la Falla Imperial también muestra ausencia de sismos en un sector ubicado en la frontera con EE.UU. Donde la mancha urbana se encuentra aproximadamente a 2.5 km, pero llama la atención que justo en este sector esta localizado el sismo histórico de 1979 con $M=6.5$ pudiendo indicar que en este sector la liberación de esfuerzos no es tan constante como en el resto de la Falla Imperial provocando mayor acumulación de energía y por ende liberando sismos de mayor magnitud.

El otro punto a tomar en cuenta es, si el ascenso de fluidos que pudiera estar ocasionando la anomalía gravimétrica Aeropuerto Oeste influye en el ciclo sísmico (Lui *et al.*, 2021) de este sector de la Falla Imperial, sin embargo, en caso de ser así, estos fluidos deberían desencadenar sismicidad en ese sector debido a la presión de poro como se ha visto en otras regiones (Parotidis *et al.*, 2003; Shelly *et al.*, 2016), contrario a lo observado en este sector. Por lo cual la naturaleza de la sismicidad en ese sector debería ser objeto de estudios en el futuro.

3.6. GEOTERMIA DEL VALLE DE MEXICALI

La provincia geotérmica de Cerro Prieto solo contiene al CGCP como único campo geotérmico en explotación. Sin embargo se han propuesto varios prospectos geotermiales: Tulechek, Riíto, Aeropuerto, Laguna Salada, Cerritos, Amarillo, Calderón-Cucapah y Morelos-Paredones, en concordancia con lo reportado por [Prol Ledesma y Morán Zenteno \(2019\)](#). Siendo Tulechek y Riíto los únicos con temperaturas de pozo reportadas, 178-242°C y 221°C respectivamente ([Arango Galván et al., 2015](#)). Tomando esto en cuenta, el CGCP y los prospectos Tulechek y Riíto no se discutirán en este trabajo y nos centraremos en los prospectos y zonas menos estudiadas. Basado en los resultados obtenidos y las estructuras principales, se han propuesto distintos dominios geotérmicos en el Valle de Mexicali.

3.6.1. DOMINIO GEOTÉRMICO NORESTE DEL VALLE DE MEXICALI

El Dominio Geotérmico Noreste del Valle de Mexicali (Figura 33 I) esta constituido por la cuenca Morelos y el intrusivo Paredones, nombrado así por su cercanía con el ejido Paredones. La única información sobre este prospecto esta en el trabajo de [Fonseca et al. \(1981\)](#), asociándolo a una intrusión ígnea intrasedimentaria y la posibilidad de alteración metamórfica. La presencia de ASC-BA en el perfil 19 (Figura 17) junto con la presencia una Unidad de sedimentos consolidados con alteración hidrotermal sobre la Unidad Intrusivo observadas en el modelo gravimétrico-magnético (Figura 25), soportan esta idea. Por otro lado, también proponemos un espesor sedimentario de 2.5 km aproximadamente sobre el intrusivo Paredones. Esta información es importante para una posible exploración futura. Ya que, asumimos que el intrusivo aún esta caliente, debido a manifestaciones hidrotermales en superficie reportadas por [Arango Galván et al. \(2015\)](#). Análisis estratigráfico más detallado es requerido para establecer claramente el potencial geotérmico y *play* geotérmico en este dominio.

3.6.2. DOMINIO GEOTÉRMICO CALIPATRIA

El Dominio Geotérmico Calipatria (Figura 33 II) comienza en los campos geotérmicos East Mesa y Border en el Valle Imperial, sin embargo, podría extenderse más al norte hasta el Área geotérmica East Brawley, en California, mientras que al sur pasa por el Valle de Mexicali hasta finalmente llegar al Desierto de Altar e incluye a las zonas geotérmicas Aeropuerto Este y Lagunitas norte. Este dominio está principalmente constreñido por las ASCBA reportadas en el perfil 19 (Figura 17) de este trabajo y las reportadas por Pacheco *et al.* (2006) y Puente Huerta (2019) así como con la correlación con el bajo (azul) en la señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo que se observa en la Figura 33. Aunado a todo esto, la presencia de sedimentos consolidados con alteración hidrotermal en el modelo gravimétrico-magnético soporta la idea de Fonseca *et al.* (1981) donde las zonas geotérmicas de Aeropuerto Este y Lagunitas norte se deben al ascenso de fluidos geotérmicos a través de la Zona de de Deformación Calipatria, provocando un alto en el campo gravimétrico, siendo esta idea similar a lo reportado por Van de Kamp *et al.* (1978) en el Campo Geotérmico East Mesa, donde la Zona de de Deformación Calipatria ha generado fracturamiento en la corteza sedimentaria, creando vías de ascenso para los fluidos geotérmicos que generan alteración hidrotermal y endurecimiento de la roca. Se observa un espesor sedimentario entre 3 y 4 km como se observa en la Figura 17. Se recomiendan estudios más puntuales a lo largo de todo este dominio para determinar su potencial geotérmico, ya que, se han reportado manifestaciones geotérmicas en superficie (Arango Galván *et al.*, 2015), priorizando la zonas de Aeropuerto Este y Lagunitas Norte debido a su similitud con el Campo Geotérmico East Mesa el cual de acuerdo a lo expuesto por Van de Kamp *et al.* (1978) se necesita fracturamiento en los pozos para generar un flujo geotérmico necesario para la explotación. Por otro lado, dicho campo geotérmico se encuentra actualmente en producción con seis plantas instaladas, teniendo una capacidad instalada de 105.4 MWe (Sifford y Bloomquist, 2000).

3.6.3. DOMINIO GEOTÉRMICO IMPERIAL

El Dominio Geotérmico Imperial (Figura 33 III) incluye a la zona geotérmica de Aeropuerto Oeste, ubicada sobre la anomalía gravimétrica de mismo nombre (Figura 15), que de acuerdo a [Fonseca *et al.* \(1981\)](#), es producto de la alteración hidrotermal debido al flujo de agua de altas temperaturas, y junto a la existencia de los pozos perforados A-1 (80° C) y A-2 (85° C) a 1.1 km de profundidad han indicado un área de oportunidad, proponiendo que la zona geotérmica de Aeropuerto Oeste podría representar la extensión sur del campo geotérmico Heber hacia el territorio mexicano. Sin embargo, en este trabajo observamos que el área de oportunidad podría extenderse hacia el sureste a lo largo de la anomalía gravimétrica que se observa a lo largo de la Falla Imperial en el Valle de Mexicali (Figura 13). A pesar de que las fallas Imperial y Calipatria deberían tener el mismo sentido de desplazamiento (dextral), la Falla Imperial muestra valores altos (rojo) cuando se analiza con la señal analítica de los datos magnéticos reducidos al polo, contrario a lo observado en la Falla Calipatria donde mostró valores bajos (azul) (Figura 14). Por otro lado, este dominio muestra una correlación con las ASCBA en distintos perfiles sísmicos (Figura 18). Así como la aparición de una ASCBA ocasionada por la falla Islas Agrarias en el Perfil 23 al oeste de la falla imperial sugiere que esta falla (Islas Agrarias) pudiese servir como una vía por donde también podrían estar ascendiendo fluidos hidrotermales, por lo cual podría ser de interés geotérmico, al menos en la zona norte del Valle de Mexicali, todo esto aunado a que se encuentra relativamente más cerca al Campo Geotérmico Heber que cuenta con una capacidad instalada de 80 MWe ([Sifford y Bloomquist, 2000](#)).

3.6.4. DOMINIO GEOTÉRMICO MICHOACÁN

El dominio Geotérmico Michoacán (Figura 33 IV) se extiende desde el norte del Campo Geotérmico Cerro Prieto hasta el sur de la zona urbana de la ciudad de Mexicali a lo largo de la Falla Michoacán y toma la anomalía gravimétrica Puebla, siendo este lugar donde se reporta el Pozo M-4 el cual no obtuvo temperaturas comerciales (Cobo y Bermejo, 1982). Este dominio está correlacionado con ASCBA de dos perfiles sísmicos y dos manifestaciones en superficie (Arango Galván *et al.*, 2015). Al igual que el dominio Imperial, puede ser una extensión del campo geotérmico Heber hacia el territorio mexicano.

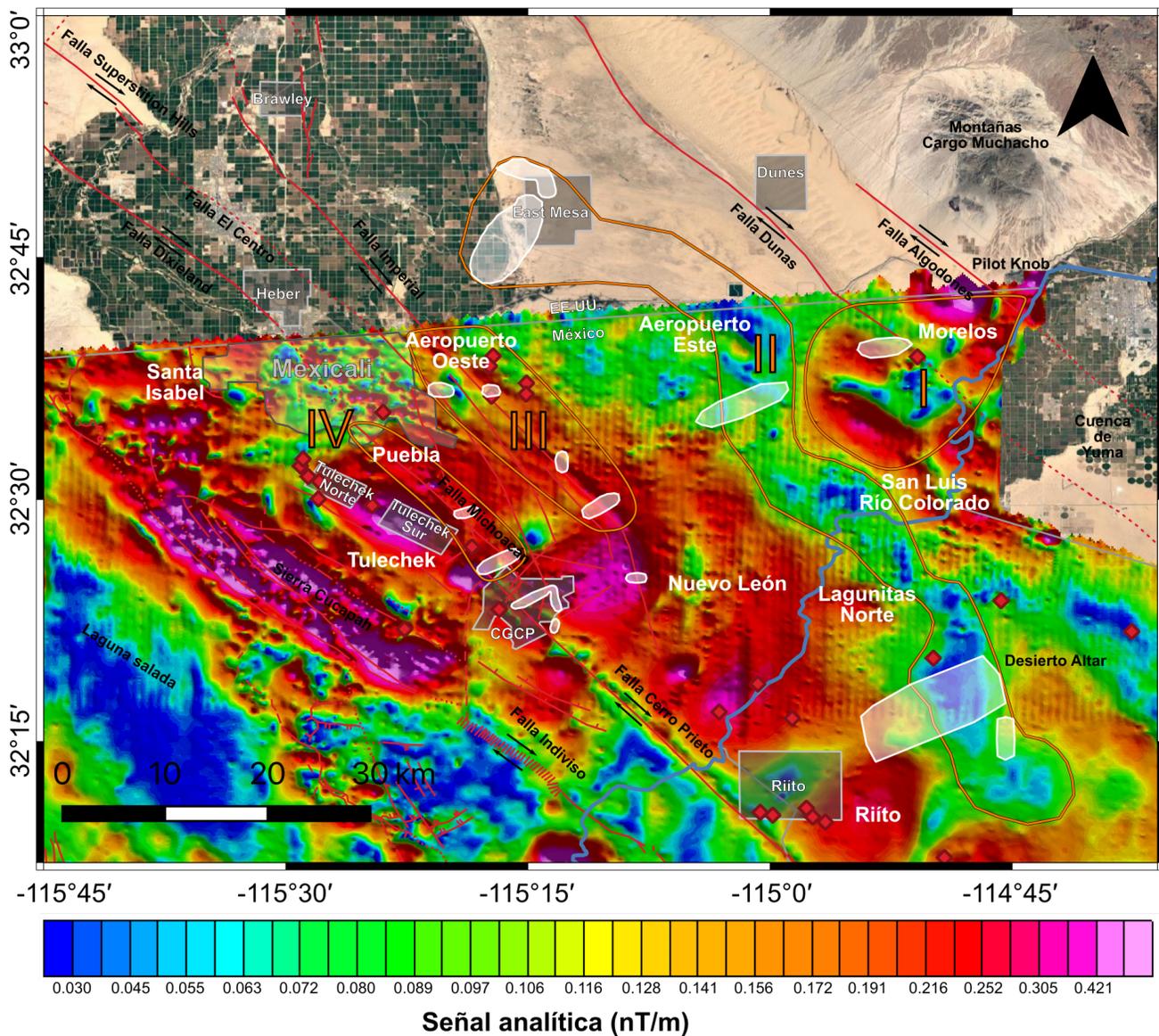


Figura 33: División de dominios geotérmicos propuesta para el Valle de Mexicali (polígonos naranja). Líneas color rojo indican principales fallas geológicas, líneas punteadas en rojo corresponden a fallas geológicas inferidas, polígonos color gris indican yacimientos y zonas geotérmicas importantes, polígonos color blanco indican zonas con presencia de ASCBA de este trabajo y reportadas por [Majer y McEvilly \(1982\)](#); [Goldstein y Carle \(1986\)](#); [Pacheco *et al.* \(2006\)](#); [Puente Huerta \(2019\)](#), diamantes color rojo indican manifestaciones geotérmicas en superficie reportadas por ([Arango Galván *et al.*, \(2015\)](#)).

CONCLUSIONES

A través del procesamiento de imágenes sísmicas de reflexión 2D, del análisis de información de mapas de gravimetría, magnetometría y sismicidad se logró contribuir con conocimiento que impacta directamente en las problemáticas sociales actuales como lo son: energía y desarrollo urbano. Además de conocimiento de ciencia básica en el ámbito geológico. Obteniendo importantes avances en: tectónica, peligro sísmico y exploración geotérmica. Las principales conclusiones de este estudio son:

- ✦ Se obtuvieron imágenes sísmicas del subsuelo del Valle de Mexicali, en las cuales se identificaron fallas geológicas antes reportadas (Imperial, Michoacán, Calipatria, Dunas, Algodones) y documentadas por primera vez (Santa Isabel, Tulechek, Mexicali, Islas Agrarias, Sinaloa, Jalapa, San Luis, Morelos). Se generaron imágenes del basamento metamórfico perteneciente a la placa Norteamericana así como el paquete sedimentario que los sobreyace, la presencia del intrusivo Paredones y la cuenca Morelos.

- ✦ Se generó un modelo de velocidades de hasta ≈ 4 km de profundidad que recorre de manera perpendicular las fallas dominantes del Valle de Mexicali, obteniendo valores de velocidad de onda P para la capa sedimentaria y el basamento metamórfico.
- ✦ Se propone por primera vez un modelo gravimétrico-magnético 2D para el Valle de Mexicali sustentado por información de pozos y perfiles sísmicos de reflexión 2D.
- ✦ A partir de los perfiles sísmicos se cartografiaron zonas con anomalías sísmicas caóticas de baja amplitud (ASCBA), geometría del basamento occidental y el límite geológico entre sedimentos clásticos no consolidados y sedimentos consolidados en el Valle de Mexicali.
- ✦ Existe una relación entre las zonas de ASCBA con altos gravimétricos con ausencia de anomalía magnética, los cuales pueden ser un buen indicio para proponer zonas de interés geotérmico.
- ✦ Se corroboró el trazo las fallas Imperial y Michoacán a través de ASCBA observados en perfiles sísmicos.
- ✦ Se propone unión de la Falla Michoacán en el con la Falla Dixieland en el Valle Imperial.
- ✦ Se propone la conexión Michoacán–Dixieland y la Falla Imperial como las fallas maestras que forman un *step over* entre ellas. Este cubre desde la cuenca Cerro Prieto hasta al menos la ciudad de Mexicali, no obstante, existe la posibilidad de que se extienda hasta el sur del Valle Imperial.
- ✦ La relación largo–ancho del *step over* formado entre las fallas Michoacán e Imperial puede ser la causa de existencia de intrusivos ígneos en la región de acuerdo a los modelos propuestos por [van Wijk et al. \(2017\)](#).
- ✦ Se encontró evidencia de la existencia de fallas (Mexicali, Islas Agrarias y Sinaloa) dentro del *step over* formado por Michoacán e Imperial. Dichas fallas se conectan con las reportadas de forma previa en la cuenca Cerro Prieto (Islas Agrarias–Hidalgo, Sinaloa–Morelia).

- ✦ Las fallas ubicadas dentro del *step over* pueden ocupar el faltante en tasa de deslizamiento que existe en este límite de placas.
- ✦ La falla Islas Agrarias se une con la falla El Centro en el Valle Imperial, la evidencia apunta a que debe ser una parte importante del límite de placas debido a la ASCBA observada en el perfil sísmico 23-P.
- ✦ Las fallas que nacen en la Falla Cerro Prieto tienen un patrón de escalonamiento derecho probablemente debido al intrusivo ígneo que ocasiona la anomalía Tulechek.
- ✦ Se propone la existencia de la Zona de deformación Calipatria y su extensión hacia el Desierto de Altar.
- ✦ Una gran cantidad de las fallas reportadas aquí tienen una importante cercanía con la ciudad de Mexicali (>3 km), por lo que deben considerarse al momento de evaluar el peligro sísmico en este municipio.
- ✦ Se proponen cuatro dominios geotérmicos, de gran importancia para realizar exploración geotérmica de manera más puntual, estos se encuentran ligados a los yacimientos geotérmicos ubicados en el Valle Imperial.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agarwal, B. N. P. y Shaw, R. K. (1996). Comment on ‘an analytic signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies’ by shuang qin1. *Geophysical Prospecting*, 44(5):911–914.
- Al-Zoubi, A., Shulman, H., y Ben-Avraham, Z. (2002). Seismic reflection profiles across the southern Dead Sea basin. *Tectonophysics*, 346(1):61–69.
- Arango Galván, C., Prol Ledesma, R. M., y Torres Vera, M. A. (2015). Geothermal prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, 55:39–57.
- Bennett, S. E. K., Oskin, M. E., e Iriondo, A. (2013). Transtensional rifting in the proto-Gulf of California near Bahía Kino, Sonora, México. *Geological society of America Bulletin*, 125(11-12):1752–1782.
- Biehler, S. (1971). Gravity studies in the Imperial Valley. En Rex, R. W., Babcock, E. A., Biehler, S., Combs, J., Cople, T. B., Elders, W. A., Furgerson, R. B., Garfunkel, Z., Meidav, T., y Robinson, P. T., editores, *Cooperative Geological-Geophysical-Geochemical Investigations of Geothermal Resources in the Imperial Valley of California*, pp. 29–41. Riverside Education Research Service, Riverside, CA.
- Brothers, D. S., Driscoll, N. W., Kent, G. M., Harding, A. J. and Babcock, J. M., y Baskin, R. L. (2009). Tectonic evolution of the Salton Sea inferred from seismic reflection data. *Nature Geoscience*, 2(8):581–584.

- BSSA (1916). The earthquake at Volcano Lake, México november 20, 1915. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 6:181–184.
- Buchner, M., Höfler, K., Henne, B., Ney, V., y Ney, A. (2018). Tutorial: Basic principles, limits of detection, and pitfalls of highly sensitive SQUID magnetometry for nanomagnetism and spintronics. *Journal of Applied Physics*, 124:161101.
- CFE (1993). *Manual de diseño de obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad*. Comisión Federal de Electricidad.
- Chanes Martínez, J. J., González Escobar, M., Suárez Vidal, F., y Gallardo Mata, C. G. (2014). Structural geometry of a sector of the Colorado River delta, Baja California, Mexico, based on seismic reflections. *Pure and Applied Geophysics*, 171(7):1107–1127.
- Cobo, J. M. y Bermejo, F. J. (1982). Analysis of exploratory wells in the Cerro Prieto Field and the Mexicali Valley. En *Proceedings 4th Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, August 10–12*, volumen 2, pp. 415–421, Guadalajara, México. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Cruz-Leya, M., Hernández-Pérez, I., Cuevas-Covarrubias, A., y Bori-Segura, E. (2001). Carta Magnética de Campo Total Mexicali I11-12, B.C., Esc. 1:250,000.
- Cunningham, W. D. y Mann, P. (2007). Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1):1–12.
- Dobson, P. F. (2016). A review of exploration methods for discovering hidden geothermal systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, 40:695–706.
- Dorsett, J. H., Madden, E. H., Marshall, S. T., y Cooke, M. L. (2019). Mechanical models suggest fault linkage through the Imperial Valley, California, U.S.A. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(4):1217–1234.
- Dorsey, R. J. (2010). Sedimentation and crustal recycling along an active oblique-rift margin: Salton Trough and northern Gulf of California. *Geology*, 38(5):443–446.

- Dorsey, R. J., Flurette, A., McDougall, K., Housen, B. A., Janecke, S. U., Axen, G. J., y Shirvell, C. R. (2007). Chronology of Miocene–Pliocene deposits at Split Mountain Gorge, southern California: A record of regional tectonics and Colorado River evolution. *Geology*, 35(1):57–60.
- Dumas, A. (2010). Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 23(2):33–40.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., y Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4):2825–2852.
- Ekström, G., Nettles, M., y Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201:1–9.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., McDowell, S. D., y Cobo R., J. M. (1978). Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto. En *proceedings 1st Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, September 20-22*, pp. 68–75, San Diego, CA. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Elders, W. A., Rex, R. W., Robinson, P. T., Biehler, S., y Meidav, T. (1972). Crustal Spreading in Southern California: The Imperial Valley and the Gulf of California formed by the rifting apart of a continental plate. *Science*, 178(4056):15–24.
- Ellsworth, W. L. (1990). The San Andreas Fault System, California. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1515:153–185.
- Etris, E. L., Crabtree, N. J., Dewar, J., y Pickford, S. (2001). True depth conversion: more than a pretty picture. *CSEG recorder*, 26(9):11–22.
- Felzer, K. R. y Cao, T. (2008). WGCEP historical California earthquake catalog. Technical Report 2007-1437-H, U.S. Geological Survey.

- Field, E. H., Arrowsmith, R. J., Biasi, G. P., Bird, P., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Jackson, D. D., Johnson, K. M., Jordan, T. H., Madden, C., Michael, A. J., Milner, K. R., Page, M. T., Parsons, T., Powers, P. M., Shaw, B. E., Thatcher, W. R., Weldon, R. J., y Zeng, Y. (2014). Uniform California earthquake rupture forecast, version 3 (UCERF3)—The time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3):1122–1180.
- Fletcher, J. M., Oskin, M. E., y Teran, O. J. (2016). The role of a keystone fault in triggering the complex El Mayor–Cucapah earthquake rupture. *Nature Geoscience*, 9(4):303.
- Fletcher, J. M., Teran, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hudnut, K. W., Mueller, K. J., Spelz, R. M., Akciz, S. O., Masana, E., Faneros, G., Ielding, E. J., Leprince, S., Morelan, A. E., Stock, J. M., Lynch, D. K., Elliott, A. J., Gold, P., Liu Zeng, J., González Ortega, A., Hinojosa Corona, A., y González García, J. (2014). Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor–Cucapah (Mexico) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, 10(4):797–827.
- Fonseca, H. L., de la Peña, A., Puente, I., y Díaz, E. (1981). Extension of the Cerro Prieto field and zones in the Mexicali Valley with geothermal possibilities in the future. En *Proceedings 3rd Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, March 24-26*, pp. 415–421, San Francisco, CA. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Fowler, C. M. R. (1990). *The solid earth: an introduction to global geophysics*. Cambridge University Press.
- Fuis, G. S., Bauer, K., Goldman, M. R., Ryberg, T., Langenheim, V. E., Scheirer, D. S., Rymer, M. J., Stock, J. M., Hole, J. A., Catchings, R. D., Graves, R. W., y Aagaard, B. (2017). Subsurface geometry of the San Andreas fault in southern California: Results from the Salton Seismic Imaging Project (SSIP) and strong ground motion expectations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(4):1642–1662.
- Fuis, G. S., Mooney, W. D., Healy, J. H., McMechan, G. A., y Lutter, W. J. (1984). A seismic

refraction survey of the Imperial Valley Region, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B2):1165–1189.

García Abdeslem, J., Espinosa Cardeña, J. M., Munguía Orozco, L., Wong Ortega, V. M., y Ramírez Hernández, J. (2001). Crustal structure from 2-D gravity and magnetic data modeling, magnetic power spectrum inversion, and seismotectonics in the Laguna Salada basin, northern Baja California, Mexico. *Geofísica Internacional*, 40(2):67–85.

García Sánchez, L., Macías, J. L., Sosa Ceballos, G., Arce, J. L., Garduño Monroy, V. H., Saucedo, R., Avellán, D. R., Rangel, E., Layer, P. W., López Loera, H., Rocha, V. S., Cisneros, G., Reyes Agustín, G., Jiménez, A., y Benowitz, J. A. (2017). Genesis and evolution of the Cerro Prieto Volcanic Complex, Baja California, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 79(6):44.

Garg, S. K., Pritchett, J. W., y Combs, J. (2010). Exploring for hidden geothermal systems. En *Proceedings World Geothermal Congress*, pp. 25–29, Bali, Indonesia.

Ghosh, S. K. (2013). *Structural geology: fundamentals and modern developments*. Elsevier.

Goldstein, N., Wilt, M. J., y Corrigan, D. (1984). Analysis of the Nuevo León magnetic anomaly and its possible relation to the Cerro Prieto magmatic-hydrothermal system. *Geothermics*, 13(1):3–11.

Goldstein, N. E. y Carle, S. (1986). Faults and gravity anomalies over the East Mesa hydrothermal-geothermal system. En *The 1986 Annual Meeting of the Geothermal Resources Council*, Palm Springs, CA. Lawrence Berkeley National Laboratory.

González Escobar, M., Mares Agüero, M. A., y Barajas, A. M. (2020). Subsurface structure revealed by seismic reflection images to the southwest of the Cerro Prieto pull-apart basin, Baja California. *Geothermics*, 85:101779.

González Escobar, M., Martín-Barajas, A., Fletcher, J. M., Pacheco, M., Oskin, M., y Dorsey, R. (2013). Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: Analysis of seismic reflection profiles. *Tectonics*, 32(5):1294–1311.

- Gutiérrez Negrín, L. C. A., Canchola Félix, I., Romo Jones, J. M., y Quijano León, J. L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. En *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, p. 12, Reykjavik, Iceland.
- Han, L., Hole, J. A., Stock, J. M., Fuis, G. S., Kell, A., Driscoll, N. W., Kent, G. M., Harding, A. J., Rymer, M. J., González Fernández, A., y Lázaro Mancialla, O. (2016). Continental rupture and the creation of new crust in the Salton trough rift, southern California and northern Mexico: Results from the Salton Seismic Imaging Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10):7469–7489.
- Hauksson, E., Stock, J. M., Hutton, K., Yang, W., Vidal Villegas, J. A., y Kanamori, H. (2011). The 2010 M w 7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake sequence, Baja California, Mexico and southernmost California, USA: active seismotectonics along the Mexican Pacific Margin. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8-9):1255–1277.
- Hauksson, E., Yang, W., y Shearer, P. M. (2012). Waveform relocated earthquake catalog for southern California (1981 to June 2011). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(5):2239—2244.
- Hernández Márquez, J. M. (2016). Interpretación de datos gravimétricos en el Valle de Mexicali, B.C. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- James, E. D., Hoang, V. T., y Epperson, I. J. (1987). Structure, Permeability and Production Characteristics of the Heber, California Geothermal Field. En *Proceedings twelfth workshop geothermal reservoir engineering Stanford University, January 20-22*, Stanford, CA. Chevron Resources Company.
- Jennings, C. W. y Bryant, W. A. (2010). Fault activity map of California: California Geological Survey Geologic Data Map No. 6, scale 1:750,000.
- Kearey, P. and Brooks, M. y Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Science Ltd, third edición.

- Kearey, P., Klepeis, K. A., y Vine, F. J. (2009). *Global tectonics*. John Wiley & Sons.
- Ley García, J., Denegri de Dios, F. M., García Cueto, R., Ochoa García, M. J., y Venegas Cardoso, F. R. (2011). Atlas de riesgos del municipio de Mexicali, B.C. Technical Report 020021ME042, Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California.
- Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2):L13–L16.
- Lindsey, E. O. y Fialko, Y. (2016). Geodetic constraints on frictional properties and earthquake hazard in the Imperial Valley, Southern California. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 121(2):1097–1113.
- Lino, L. M., Cavallaro, F. A., Vlach, S. R. F., y Coelho, D. C. (2018). 2D magnetometric modeling of a basic-intermediate intrusion geometry: geophysical and geological approaches applied to the Limeira intrusion, Paraná Magmatic Province. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2):305–315.
- Lira, H. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 18(1):37–46.
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California. En Winterer, E. L., Hussong, D. M., y Decker, R. W., editores, *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*, volumen N de *The geology of North America*, capítulo 26, pp. 499–521. Geological Society of America, Boulder, CO.
- Louie, J. N., Allen, C. R., Johnson, D. C., Haase, P. C., y Cohn, S. N. (1985). Fault slip in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(3):811–833.
- Lui, S. K. Y., Huang, Y., y Young, R. P. (2021). The role of fluid pressure-induced aseismic slip in earthquake cycle modulation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4):e2020JB021196. e2020JB021196 2020JB021196.
- Lynch, D. K. y Hudnut, K. W. (2008). The Wister Mud Pot Lineament: Southeastward Extension or Abandoned Strand of the San Andreas Fault? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4):1720–1729.

- Lyons, D. J. y Van de Kamp, P. C. (1980). Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. Technical Report LBL-10540, University of California, Berkely, CA.
- Magistrale, H. (2002). The relation of the southern San Jacinto fault zone to the Imperial and Cerro Prieto faults. *Contributions to Crustal Evolution of the Southwestern United States*, Special paper 365:271–278.
- Majer, E. L. y McEvelly, T. V. (1982). Seismological studies at the Cerro Prieto Field. En *Proceedings 4th Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, August 10–12*, volumen 1, pp. 145–151, Guadalajara, México. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3):507–517.
- Nabighian, M. N. (1974). Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1):85–92.
- Nava, A. (2002). *Terremotos*. Fondo de cultura económica, 4ta edición.
- Olmsted, F. H., Loeltz, O. J., e Irelan, B. (1973). Geohydrology of the Yuma area, Arizona and California. Technical report, US Government Printing Office.
- Oskin, M. y Stock, J. (2003). Pacific–North America plate motion and opening of the Upper Delfín basin, northern Gulf of California, Mexico. *Base of the Kiaman Its definition and global stratigraphic significance*, 115(10):1173–1190.
- Oskin, M., Stock, J., y Martín-Barajas, A. (2001). Rapid localization of Pacific–North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29(5):459–462.
- Pacheco, M., Barajas, A. M., Elders, W., Espinosa Cardaña, J. M., Helenes Escamilla, J., y Segura, A. (2006). Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for

- the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1):1–22.
- Parotidis, M., Rothert, E., y Shapiro, S. A. (2003). Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophysical Research Letters*, 30(20):2075.
- Persaud, P., Ma, Y., Stock, J. M., Hole, J. A., Fuis, G. S., y Han, L. (2016). Fault zone characteristics and basin complexity in the southern Salton Trough, California. *Geology*, 44(9):747–750.
- Phillips, R. P. (1964). Seismic refraction studies in Gulf of California. En van Andel, T. H. y Shor, G. G., editores, *Marine geology of the Gulf of California*, pp. 90–121. American Association of Petroleum Geologists.
- Prol Ledesma, R. M., Carrillo de la Cruz, J. L., Torres Vera, M. A., Membrillo Abad, A. S., y Espinoza Ojedac, O. M. (2018). Heat flow map and geothermal resources in Mexico / Mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos de México. *Terra Digitalis*, 2(2):1–38.
- Prol Ledesma, R. M. y Morán Zenteno, D. J. (2019). Heat flow and geothermal provinces in Mexico. *Geothermics*, 78:183–200.
- Puente, I. y De la Peña, A. (1978). Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. En *proceedings 1st Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México September 20-22*, pp. 17–40, San Diego, CA. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Puente Huerta, J. A. (2019). Estructura de un sector del norte de la Cuenca de Altar, Sonora, a partir de sísmica de reflexión 2D. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Ramírez-Ramos, E. E., Vidal-Villegas, A. and González-Fernández, A., y Stock, J. M. (2015). A crustal velocity model for the southern Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Seismological research letters*, 86(1):181–191.

- Razo, A., Arellano, F., y Fonseca, H. (1978). Estudios de resistividad realizados por CFE en Cerro Prieto. En *proceedings 1st Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México September 20-22*, pp. 167–178, San Diego, CA. Comisión Federal de Electricidad en cooperación con el United States Department of Energy.
- Reznikov, M., Ben-Avraham, Z., Garfunkel, Z., Gvirtzman, H., y Rotstein, Y. (2004). Structural and stratigraphic framework of Lake Kinneret. *Israel Journal of Earth Sciences*, 53:131–149.
- Rodriguez, M., Chamot-Rooke, N., Fournier, M., Huchon, P., y Delescluse, M. (2019). Structural reorganization of the india-arabia strike-slip plate boundary (owen fracture zone; nw indian ocean) 2.4 million years ago. En *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones*, capítulo 7, pp. 145–155. Elsevier.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., y Ushijima, K. (2002). Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49(4):231–244.
- Şengör, A. M. C., Zabcı, C., y Natal'in, B. A. (2019). Continental Transform Faults: Congruence and Incongruence With Normal Plate Kinematics. En Duarte, J. C., editor, *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones*, capítulo 9, pp. 169–247. Elsevier.
- Shelly, D. R., Ellsworth, W. L., y Hill, D. P. (2016). Fluid-faulting evolution in high definition: Connecting fault structure and frequency-magnitude variations during the 2014 Long Valley Caldera, California, earthquake swarm. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3):1776–1795.
- Sifford, A. y Bloomquist, R. G. (2000). Geothermal Electric Power Production in the United States: A Survey Update for 1995-1999. *Geothermal Resources Council Transaction*, pp. 389–396.
- Stock, J. M. y Lee, J. (1994). Do microplates in subduction zones leave a geological record? *Tectonics*, 13(6):1472–1487.
- Suárez Vidal, F., Mendoza Borunda, R., Nafarrete Zamarripa, L. M., Ramírez, J., y Glowacka, E. (2008). Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, México, based on the regional seismic record and surface structures. *International Geology Review*, 50(7):636–649.

- Suárez Vidal, F. y Quintanilla Montoya, A. L. (1996). Cerro Prieto y su correlación con los centros de dispersión del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 22(1):91–110.
- Sánchez-García, A. C. (2013). Rasgos estructurales en el suroeste del delta del Río Colorado: Interpretación de perfiles de sísmica de reflexión. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Talwani, M. (1965). Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, 30(5):797–817.
- Talwani, M., Worzel, J. L., y Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 64(1):49–59.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*, volumen 1. Cambridge university press.
- Thomas, A. P. y Rockwell, T. K. (1996). A 300- to 550-year history of slip on the Imperial fault near the U.S.-Mexico border: Missing slip at the Imperial fault bottleneck. *Journal of Geophysical Research*, 101(B3):5987–5997.
- Tromp, J. (2019). Seismic wavefield imaging of Earth’s interior across scales. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(1):40–53.
- Van de Kamp, P. C., Howard, J., y N., G. A. (1978). *Geothermal resource and reservoir investigations of US Bureau of Reclamation leaseholds at East Mesa, Imperial Valley, California*, capítulo Geology, pp. 1–32. Lawrence Berkeley Laboratory.
- van Wijk, J., Axen, G., y Abera, R. (2017). Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: Implications for opening of the Gulf of California. *Tectonophysics*, 719-720:37–50.
- Vega-Saucedo, G. A. (2016). Características sismoestructurales de una región al suroeste del delta del Río Colorado, a partir de sísmica de reflexión 2D. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

- Wei, S., Fielding, E., Leprince, S., Sladen, A., Avouac, J. P., Helmberger, D., Hauksson, E., Chu, R., Simons, M., Hudnut, K., Herring, T., y Briggs, R. (2011). Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nature Geoscience*, 4(9):615–618.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*, volumen 1 de *Investigations in Geophysics*, chapter 1, pp. 90–123. Society of Exploration Geophysicists, 2nd edición.

APÉNDICE A

ARTÍCULO PUBLICADO EN REVISTA CIENTÍFICA

Geothermics 89 (2021) 101984

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Geothermics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/geothermics

Extension in geothermal fields between the Imperial and Mexicali Valleys revealed by 2D seismic imaging and joint gravity-aeromagnetic modeling

Carlos Simón Reyes-Martínez^a, Mario González-Escobar^{b,*}, Juan Carlos Montalvo-Arrieta^a, Fernando Velasco Tapia^a, Uwe Jenchen^a

^a Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, Mexico

^b División de Ciencias de la Tierra, Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Seismic reflection
Gravity and magnetic modeling
Mexicali Valley
Geothermic exploration
Calipatria fault
Imperial fault

ABSTRACT

We present 2D seismic reflection images covering 64 km along with 62.5 km of gravity and aeromagnetic models. The modeled region extends from the Cerro Prieto volcano, across the Mexicali Valley, Baja California, Mexico, to the USA-Mexico border near Pilot Knob, California, USA. The seismic images illustrate the shallow structure to the north of the Cerro Prieto basin, and a seismic reflector in the northeastern part of the profiles corresponds to the metamorphic basement. Some major faults were identified through discontinuities in the reflectors (Dunes and San Luis faults), while others (Michoacán, Imperial, and Calipatria faults) are expressed as chaotic low-amplitude anomalies in the seismic images. 2D gravimetric and aeromagnetic models constrained by seismic data demonstrate the presence of zones of sediments metamorphosed by hydrothermal alteration fronts due to major faults and intrusions. We present for the first time a geologic model supported by geophysical data that cover transversely the entire Mexicali Valley. Finally, we identify three domains for future geothermal exploration in the Mexicali Valley, supported by the analytic signal of the aeromagnetic data after reduction to the pole and seismic reflection profiles from previous papers.