



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

La magnetometría como herramienta de caracterización de unidades geológicas en el área de Palo Verde, S.L.P.

T E S I S

Que para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Lucía Juárez Hernández

Asesor:

Dr. Alfredo Aguillón Robles

Co-Asesor:

Dr. Héctor López Loera

Beca CONACyT
No. 590531

San Luis Potosí, S. L. P.

Marzo de 2018





UASLP

Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

16 de noviembre de 2017

**ING. LUCÍA JUÁREZ HERNÁNDEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Alfredo Aguillón Robles y Héctor López Loera** Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de noviembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“La magnetometría como herramienta de caracterización de unidades geológicas en el área de Palo Verde, S.L.P.”

- Introducción.
1. Generalidades
 2. Marco Geológico del Campo Volcánico de Santa María del Río
 3. Geoquímica del área de Palo Verde
 4. Método Magnético
 5. Discusión de resultados
- Conclusiones
Referencias
Anexos

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

DEDICATORIA

Al Creador, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme proporcionado las herramientas necesarias para lograr mis objetivos.

A mis padres Clara Hernández y Abraham Juárez, sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificios y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudó a conseguirlo fue su apoyo. Con cariño y admiración.

A mis hermanos: Susana, porque a pesar de la distancia, sé que siempre puedo contar contigo, Ricardo y Delia su apoyo en el trabajo de campo fue de vital importancia para la culminación de mi proyecto, Mary porque siempre tuviste palabras de aliento en momentos en los que las cosas parecían no tener sentido. Con cariño y respeto.

A Roberto Cruz García, gracias por la oportunidad de existir, por tu sacrificio en algún tiempo incomprendido, por tu ejemplo de superación incansable, por tu comprensión y confianza, por tu amor y amistad incondicional, porque sin tu apoyo no hubiera sido posible la culminación de esta epata de mi vida. Por lo que ha sido y será...

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer al Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por brindarme la oportunidad de desarrollo y potencializar mis capacidades.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

A mi asesor Dr. Alfredo Aguillón Robles, por creer en mí, por su tiempo dedicado a mi aprendizaje y estar atento a mi trabajo.

A mi co-asesor Dr. Héctor López Loera, por darme la oportunidad, una vez más, de trabajar con él, por su paciencia, por compartir sus conocimientos y por siempre brindarme su amistad.

A los miembros de mi comité académico: Dr. Alfredo Aguillón Robles, Dr. Héctor López Loera, Dr. Margarito Tristán González, Dr. José Ramón Torres Hernández y Dr. Miguel Morales Gámez, por aportar siempre a las mejoras de mi trabajo.

Agradezco de manera especial al Ing. Francisco Escandón Valle, por estar siempre presente de uno o de otro modo en mi formación de maestría, por confiar en mí y ser siempre un apasionado de la Geología.

Al personal de Laboratorio de Geoquímica de la U.A.S.L.P., por el apoyo y paciencia brindada para el análisis químico de muestras, Dr. Alfredo Aguillón Robles y L.Q. Miguel Ángel Cortina Rangel.

Al Laboratorio de Geofísica del IPICYT, por las facilidades prestadas tanto en equipo como en personal, para la realización del trabajo de campo, el cual está coordinado por el M. en C. David E. Torres Gaitán, quien además me brindó capacitación, entrenamiento y asesorías constantes en la interpretación geofísica utilizando las herramientas y filtros matemáticos del

programa Oasis Montaje y la creación de modelos VOXI, los cuales contribuyeron enormemente para un mejor discernimiento de la información geofísica.

Agradezco infinitamente a Betzabé de la Torre Rodríguez, por sus contantes aportaciones a mi trabajo y apoyo a lo largo de la maestría.

A mis amigos entrañables, que de una o de otra forma (a veces sin que ellos lo pensarán) aportaron un granito de arena y por ello son parte también de esta meta lograda: Lilibeth Jasso Lara, Erika Loyola Martínez, Oscar Govea Govea, Juan Esteban Ortiz López, Jorge Aceves de Alba, Humberto Hernández Torres, Jaime Garcés Gómez, Juan José Benítez Espinosa., Raúl Paz Castillo, Yuridia Martínez Huerta, Mayra Luna Arredondo, Araceli Quirino, Víctor Juárez García, Miguel Juárez Nieto (†), Irene Pérez Casillas, Juan Carlos Guel Casillas, Rosa María Hernández, Adriana Pérez Hernández, Juan José Vargas Martínez, Julio César Nava Loredo, Guillermo Alvarado Valdez, Javier Muñoz Quintana, Perla Castillo Rodríguez, Felipe Pineda, Macario Rocha Rocha, Cecilia Tristán Capetillo, Karina García Pérez, Ana Rocío Hernández García, Marissa Dávila.

Para finalizar, probablemente haya algunas personas que en este momento sus nombres no vengán a mi mente, aun así, a todas ellas agradezco infinitamente su tiempo y apoyo a mi crecimiento.

¡Gracias!

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO	I
INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
Introducción	1
1. Generalidades	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodología	4
1.4 Localización y vías de acceso.....	5
2. Marco Geológico del Campo Volcánico de Santa María del Río	6
2.1 Geología regional	6
2.2 Tectónica regional	9
2.3 Geología del Campo Volcánico de Santa María del Río.....	10
2.4 Estratigrafía del área de estudio	11
2.4.1 Formación El Abra.....	11
2.4.2 Intrusivo Palo Verde	13
2.4.3 Ignimbrita Santa María.....	14
2.4.4 Domo riolítico	15
3. Geoquímica del área de Palo Verde	18
3.1 Fundamentos.....	18
3.2 Muestreo geoquímico	20
3.3 Método analítico de determinación	21
3.4 Elementos de las tierras raras	23
3.4.1 Propiedades físicas y químicas	24

3.4.2 Grupos de minerales	28
3.5 Análisis e interpretación de resultados	33
4. Método Magnético.....	44
4.1 Fundamentos	45
4.2 Procesamiento de la información.....	54
4.2.1 Reducción al Polo (RP)	55
4.2.2 Señal Analítica (SA)	56
4.2.3 Continuaciones de campo (CA).....	56
4.2.4 Derivadas en dirección de Z (Dz)	57
4.3 Análisis e interpretación de resultados	57
4.3.1 Magnetometría aérea.....	57
4.3.1.1 Campo Aeromagnético Residual.....	58
4.3.1.2 Reducción al Polo	59
4.3.1.3 Dominios aeromagnéticos	61
4.3.1.4 Dominios Aeromagnéticos en Continuación Ascendente 10 km del Campo Magnético Reducido al Polo.....	65
4.3.1.5 Lineamientos aeromagnéticos.....	68
4.3.2 Magnetometría terrestre	70
4.3.2.1 Características del levantamiento magnético	70
4.3.2.2 Campo Magnético Total (CMT)	71
4.3.2.3 Campo Magnético Residual (CMR)	72
4.3.2.4 Campo Magnético Reducido al Polo (CMRP)	73
4.3.2.5 Dominios magnéticos	74
4.3.2.6 Lineamientos magnéticos.....	76
4.3.2.7 Señal Analítica (SA)	77
4.3.2.8 Continuación Ascendente 400 m del Campo Magnético Reducido al Polo	79
5. Discusión de resultados.....	81
5.1 Geología-Geofísica-Geoquímica.....	81
5.2 Geología-Dominios magnéticos-Anomalía poniente.....	81
5.2.1 Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía Poniente	84

5.3. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía central	87
5.3.1 Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía central.....	88
5.4. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía lantánidos (tierras raras ligeras)	89
5.4.1 Geología-CA-400m-SA-RP-CMR-Anomalía lantánidos (tierras raras ligeras)	91
5.5. Geología-Dominios Magnéticos-Anomalía lantánidos (tierras raras pesadas)	93
5.5.1 Geología-CA-400m-SA-RP-CMR-Anomalía lantánidos (tierras raras pesadas)	96
5.6. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía elementos asociados a las tierras raras.....	99
5.6.1 Geología-CA-400m-SA-RP-CMR-Anomalía elementos asociados a las tierras raras	101
Conclusiones	104
Referencias.....	106
Anexos	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área Palo Verde, Santa María del Río, S.L.P.	5
Figura 2. Mapa mostrando los terrenos tectonoestratigráficos y localización del área Palo Verde (modificado de García-Pérez, 2017)	6
Figura 3. Ubicación del Campo Volcánico de Santa María del Río (CVRSM) en relación a la Plataforma Valles-San Luis Potosí y Cuenca Mesozoica del Centro de México (modificado de Guerrero-Ibarra, 2012)	7
Figura 4. Localización del CVRSM dentro de la Provincia de cuencas y sierras de México (modificado de Guerrero-Ibarra, 2012)	8
Figura 5. Localización del CVSLP y CVRSM (modificado de Tristán-González, 2009).....	9
Figura 6. Fotografía mostrando afloramiento de caliza de la Formación El Abra en el área de Palo Verde.....	11
Figura 7. Fotografía mostrando afloramiento del Intrusivo Palo Verde. A) Se localiza hacia la margen este del área de estudio y corresponde a la muestra SJ1720. B) Se localiza en las cercanías de la localidad El Mezquite, en donde se presenta silicificado.	12
Figura 8. Fotografía mostrando afloramiento de Ignimbrita Santa María, localizado al noroeste del área de estudio.....	13
Figura 9. Mapa geológico del área Palo Verde.	14
Figura 10. Columna estratigráfica del área de Palo Verde	15
Figura 11. Tierras raras pesadas (HREE) y tierras raras ligeras (LREE). Modificado de Villela-Olavarría et al., 2016	22
Figura 12. Abundancia relativa de las tierras raras en corteza. Modificado de USGS, Rare Earth Elements-Critical Resources for High Technology, 2002	25
Figura 13. Muestreo geoquímico del área de Palo Verde	31
Figura 14. Concentraciones por encima del valor normal de corteza de Titanio (Ti), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Bario (Ba) en el área de Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de las concentraciones anómalas.	37
Figura 15. Concentraciones por encima del valor normal de corteza de Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr) y Samario (Sm) en el área de	

Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de las concentraciones anómalas	38
Figura 16. Concentraciones por encima del valor normal de corteza de Torio (Th) y Uranio (U) en el área de Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de las concentraciones anómalas	39
Figura 17. Grafica de valores normalizadas y separadas de acuerdo a litología del área de Palo Verde	40
Figura 18. Campo Geomagnético 1: Plano de la órbita de la Tierra, 2: Eje de rotación, 3: Eje magnético. Modificado de Calcina, 2009	43
Figura 19. Elementos del Campo Geomagnético.....	44
Figura 20. Comportamiento magnético. a) diamagnético, b) paramagnético, c) ferrimagnético y d) antiferromagnético.....	49
Figura 21. Líneas de flujo (-) y de igual intensidad de campo (---) de un polo. Modificado de Breiner,1973	51
Figura 22. Campo Aeromagnético Residual (San Luis Potosí, Guanajuato. y Querétaro)	57
Figura 23. Campo Aeromagnético Residual Reducido al Polo (San Luis Potosí, Guanajuato. y Querétaro)	58
Figura 24. Dominios Aeromagnéticos (DAM)	60
Figura 25. Dominios Aeromagnéticos (DAM) en mapa de continuación ascendente 10 km de la reducción al polo del campo magnético Residual ..	64
Figura 26. Lineamientos aeromagnéticos en el mapa de la CA-2km -2aDz-RP-CMR	67
Figura 27. Mapa del Campo Magnético Total (CMT) del área de Palo Verde	70
Figura 28. Mapa del Campo Magnético Residual (CMR) del área de Palo Verde	71
Figura 29. Mapa del Campo Magnético Residual Reducido al Polo (CMR-RP)	72
Figura 30. Dominios magnéticos en RP-CMR en el área de Palo Verde	74
Figura 31. Lineamientos magnéticos en RP-CMR en el área de Palo Verde	75
Figura 32. SA-RP-CMR del área de Palo Verde	76
Figura 33. Delimitación de cuerpos en CA-400m-SA-RP-CMR del área de Palo Verde	77

Figura 34. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Bismuto (Bi), b) Zinc (Zn), c) Cesio (Cs) y d) Gadolinio (Ga) del área de Palo Verde	79
Figura 35. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Titanio (Ti), f) Hafmio (Hf), g) Cesio (Cs) y h) Zircón (Zr) del área de Palo Verde	81
Figura 36. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de a) Bismuto (Bi), b) Zinc (Zn), c) Cesio (Cs) y d) Galio (Ga) del área de Palo Verde	82
Figura 37. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de e) Titanio (Ti), f) Hafmio (Hf), g) Cesio (Cs) y h) Zircón (Zr) del área de Palo Verde	83
Figura 38. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Cromo (Cr), b) Níquel (Ni), c) Arsénico (As) y d) Cadmio (Cd) del área de Palo Verde	84
Figura 39. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de a) Cromo (Cr), b) Níquel (Ni), c) Arsénico (As) y d) Cadmio (Cd) del área de Palo Verde	85
Figura 40. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Cerio (Ce), b) Lantano (La), c) Praseodimio (Pr) y d) Samario (Sm) del área de Palo Verde	86
Figura 41. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Neodimio (Nd) y f) Europio (Eu) del área de Palo Verde	87
Figura 42. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de a) Cerio (Ce), b) Lantano (La), c) Praseodimio (Pr) y d) Samario (Sm) del área de Palo Verde	88
Figura 43. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de e) Neodimio (Nd) y f) Europio (Eu) del área de Palo Verde	89
Figura 44. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Itrio (Y), b) Tulio (Tm), c) Holmio (Ho) y d) Gadolinio (Gd) del área de Palo Verde	90
Figura 45. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Disproσιο (Dy), f) Terbio (Tb), g) Yb y h) Erbío (Er) del área de Palo Verde	91
Figura 46. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de i) Lutecio (Lu) del área de Palo Verde	92
Figura 47. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de a) Itrio (Y), b) Tulio (Tm), c) Holmio (Ho) y d) Gadolinio (Gd) del área de Palo Verde	93
Figura 48. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de e) Disproσιο (Dy) f) Tb g) Yb y h) Erbío (Er) del área de Palo Verde	94

Figura 49. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de i) Lutecio (Lu) del área de Palo Verde	95
Figura 50. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Talio (Tl), b) Plomo (Pb), c) Niobio (Nb) y d) Renio (Re) del área de Palo Verde	96
Figura 51. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Torio (Th) y f) Uranio (U) del área de Palo Verde	97
Figura 52. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de a) Talio (Tl), b) Plomo (Pb), c) Niobio (Nb) y d) Renio (Re) del área de Palo Verde..	98
Figura 53. CA-400m-SA-RP-CMR, geología y concentraciones de e) Torio (Th) y f) Uranio (U) del área de Palo Verde	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de las concentraciones de elementos en la corteza. Modificado de Rose et al., 1979.....	19
Tabla 2. Ácidos utilizados para disolver muestras.....	23
Tabla 3. Composición de los principales minerales de tierras raras, país, yacimiento y porcentaje de óxidos. Modificado de Greenland Minerals Annual Report, 2009	29
Tabla 4. Estimación de las concentraciones de tierras raras en corteza, ordenadas de acuerdo a su número atómico creciente (unidades de medida en ppm). Fuente: USGS, 2010.....	32
Tabla 5. Valores de significancia más altos en la matriz de correlación de Pearson de lote de muestras de Palo Verde	35
Tabla 6. Elementos con las concentraciones más relevantes y valores promedio de corteza (valores de Rose et al y USGS)	38
Tabla 7. Susceptibilidades magnéticas más comunes de las rocas. Modificado de Telford et al., 1990.....	49
Tabla 8. Relación de distancias lineales de las secciones levantadas	71

RESUMEN

El área de Palo Verde se sitúa al sur del estado de San Luis Potosí, en el municipio de Santa María del Río y forma parte del Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) constituido en su porción occidental por un paquete basal ignimbrítico de composición riolítica (Ignimbrita Santa María) sobre la cual se emplazaron una serie de domos, más al centro y oriente la secuencia se conforma por un paquete grueso de ignimbrita riolítica, lava riodacítica, andesítica e intrusivos sub-volcánicos con edades que van de 30 a 32 Ma. En éste estudio, se presentan los resultados del análisis de datos magnéticos (magnetometría regional y local). La revisión de datos magnéticos, magnetometría aérea regional comprende los estados de Guanajuato, San Luis Potosí y una porción del estado de Querétaro, la magnetometría local se realizó en el área de Palo Verde. Se emplearon filtros matemáticos para una mejor interpretación de datos de ambas zonas, tales como Reducción al Polo, Señal Analítica, Continuaciones de Campo y Primera y/o Segunda derivada, lo cual permitió generar diversos mapas. Los resultados la Magnetometría Aérea muestran una estructura regional con dirección N-S y comprende los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, se definieron también un sistemas de fallas, el principal N-S y NW-SE NE-SW, localmente se delimitó un cuerpo generador de anomalías, el cual se ajusta a la ubicación del domo riolítico de la zona y un sistema de fallas y/o fracturas NW-SE y NE-SW.

Se establecieron 3 anomalías geoquímicas: anomalía oeste (Bi, Cs, Sc, Ga, Hf, Rb, Ti, Zn y Zr), anomalía central (As, Cd, Cr y Ni) y anomalía de lantánidos. Las tierras raras normalizadas presentan un leve enriquecimiento de tierras raras ligeras, el contenido de las mismas en los carbonatos de Palo Verde es prácticamente nulo.

Palabras clave: Palo Verde, magnetometría, anomalía, geoquímica, tierras raras.

ABSTRACT

The Palo Verde area is located south of San Luis Potosi state, in the Santa Maria del Rio town and is part of the Santa Maria del Rio Volcanic Field (CVRSM) constituted in its western portion by an ignimbritic basal package of rhyolitic composition (Ignimbrita Santa Maria) over which a series of domes were placed, towards the center and east the sequence is formed by a thick packet of rhyolitic ignimbrite, riodacitic lava, andesitic and sub-volcanic intrusive with ages ranging from 30 to 32 Ma. In this study, the results of the magnetic data analysis (regional and local magnetometry) are presented. The review of magnetic data regional aerial magnetometry includes the states of Guanajuato, San Luis Potosi and a portion of Queretaro, the local magnetometry was performed in the Palo Verde area. Mathematical filters were used to the better interpret data from both areas, such as Reduced to Magnetic Pole, Analytical Signal, Field Continuation and First and/or Second Derivative, which allowed the generation of the different maps. The results of the Aerial Magnetometry show a regional structure with N-S direction and include the states of San Luis Potosi and Guanajuato, a fault system was also defined, the main N-S and another NW-SE and NE-SW; an anomaly generating body was delimited locally, which is adjusted to the location of the rhyolitic dome of the zone and a system of faults and/or fractures NW-SE and NE-SW.

Three geochemical anomalies were established: western anomaly (Bi, Cs, Sc, Ga, Hf, Rb, Ti, Zn and Zr), central anomaly (As, Cd, Cr and Ni) and lanthanide anomaly. The normalized rare earths elements present a slight enrichment of light rare earth, the content of them in the Palo Verde carbonates is practically null.

Key words: Palo Verde, magnetometry, anomaly, geochemistry, rare earths elements.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se ubica al sur del estado de San Luis Potosí, en la zona denominada como Palo Verde, en el municipio de Santa María del Río. Se encuentra ubicada en los límites de la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Cuenca Mesozoica del Centro de México y dentro del Campo Volcánico del Río Santa María.

En el área afloran rocas volcánicas así como un intrusivo granítico (de edad Oligoceno), existen también domos riolíticos emplazados en zonas de debilidad. La parte estructural en el área jugó un papel importante para el emplazamiento de plutones y magma.

El presente estudio de investigación hace referencia al uso de la magnetometría como una herramienta para poder caracterizar, de una manera más certera, unidades geológicas, en este caso particular nos ocupa una mejor definición del Intrusivo Palo Verde característico de la zona, pues no se ha establecido totalmente su distribución. Aunado a esta metodología, siempre será importante acompañarse de muestreos geoquímico para cuantificar y determinar con mayor certeza los elementos relacionados al intrusivo.

El trabajo se llevó a cabo por etapas, comenzando con el reconocimiento de la geología del área, posteriormente se efectuó la campaña de muestreo geoquímico y finalmente se realizó el levantamiento magnético terrestre.

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El primer reporte encontrado, relacionados al área de estudio, es el trabajo de García-Gutiérrez (1978) en el cual se menciona la posibilidad de que en el ejido de Badillo del Municipio de Santa María del Río exista un afloramiento de carbonatitas.

Ruíz *et al.*, (1980) realizaron un estudio en el cual se propone que el Intrusivo Palo Verde es ligeramente alcalino, así mismo se determinó, en la mina Las Cuevas, una temperatura de homogeneización de inclusiones fluidas entre 60° y 80° C; salinidades bajas de 0.0 a 3.0 en peso de NaCl eq, también se determinó que la depositación de fluorita fue causada por un descenso de temperatura, incremento del pH y reacción con las rocas ricas en Ca.

Labarthe-Hernández *et al.*, (1984) describen las unidades litológicas de la zona de Palo Verde, así como las estructuras principales, siendo de las más importantes la Caldera Milpa Grande, muestrearon las diferentes unidades y analizaron por elementos mayores y algunos traza. Con relación a la petrografía de las muestras, en una de ellas describen como minerales accesorios: monacita, xenotima y apatito.

Flores-Aguillón (1989) mediante levantamiento geoquímico y sus respectivos resultados de laboratorio del área Milpa Grande (prospecto Río Verde), establece que en la zona de rocas carbonatadas no refleja la presencia de sodio (Na), por esta razón se descarta la teoría de la clasificación de estas rocas como carbonatitas, siendo opinión del autor, que esta roca se trata de un *skarn* de reacción originado a partir de un basamento de roca calcárea. Recomienda una mayor investigación en la zona para establecer con exactitud el origen de los afloramientos, así como la presencia de tierras raras.

Por su parte Niño-Aguirre (1989) evalúa el lote minero La Merced, en la cual define dos sistemas de fallas preferentes: NW-SE y N-S, la mineralización consiste en fluorita como mineral de mena y sílice y carbonato de calcio como ganga, emplazados en zona de fallas formando una estructura tipo veta (dos estructuras: Merced I y Merced II).

Mérida-Montiel (1998) con base en la interpretación magnética y geológica, define áreas prospectivas entre las que menciona una zona la sur de San José Alburquerque en donde se delimita a profundidad un pórfido que señala el límite de una amplia zona prospectiva para depósito de fluorita (como el Realito y La Salitrera) y posiblemente de Sn, Hg, Au, Ag y Mo, W tipo clímax, los cuales se asocian a rocas volcánicas y domos silícicos ricos en flúor.

López-Rodríguez (2001) llevó a cabo un muestreo de sedimentos activos en la hoja La Salitrera, los resultado del muestreo definieron: Au, Ag, Pb, Cu, Zn, Fe, Mn, As, Ba, Cd, Sr, Bi, Se, Mo, W, P, y Sb como principales indicadores de la mineralización, además se definió un sistema principal de lineamientos geoquímicos con orientación NW-SE.

García-Pérez (2017) realizó un estudio sobre el modelo de emplazamiento de los domos félsicos de San José Aburquerque-Tierra Nueva y la asociación de estos con el intrusivo Palo Verde, determinado un par de sistemas principales de fallamiento NW-SE y NE-SW, así mismo los domos riolíticos se asocian a este fallamiento.

1.2. Objetivos

General

Caracterizar el Intrusivo Palo Verde en la zona de estudio (localidad denominada Palo Verde) mediante el uso de la magnetometría, apoyado a la par de datos geológicos y geoquímicos, para entender mejor la distribución espacial del mismo y su relación con el entorno.

Específicos

Delimitar cuerpos y/o estructuras en el subsuelo mediante la caracterización de parámetros físicos del área (magnetometría).

Analizar la relación de las anomalías magnéticas con la litología del área.

Analizar la relación entre la respuesta magnética y los resultados del muestreo geoquímico.

Relacionar los resultados geofísicos y geoquímicos con la geología.

1.3 Metodología

Trabajo de gabinete y campo

Como base inicial se recopiló la información referente al tema tratado de las diversas instituciones que han trabajado en la zona de estudio y/o áreas vecinas a ella. Mediante el análisis de dicha información, se elaboraron los mapas regionales y locales, para dar paso al respectivo trabajo de campo.

En lo que respecta al trabajo de campo, se realizó en visitas periódicas a la zona de Palo Verde, primero para el reconocimiento de la geología del área, posteriormente se llevó a cabo la recolección de muestras para el análisis geoquímico, finalmente se concluyó el trabajo de campo con el levantamiento de las secciones magnéticas del área.

Análisis de laboratorio

Se realizó la preparación de las muestras para análisis químico de los elementos traza (incluyendo las tierras raras) mediante ICP-MS. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de química analítica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

En cuanto al vaciado y transformación de la información magnética recolectada en campo y posterior manipulación de la misma, se realizó en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica mediante el programa *Oasis Montaje* (Geosoft).

1.4 Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza al sureste del estado de San Luis Potosí, en las coordenadas UTM 340500-2415000, 344500-2415000, 344500-2412000, 340500-2412000 zona 14 Q *datum* WGS84 (Figura 1), cubriendo una superficie de 16 kilómetros cuadrados, la cual corresponde a la porción austral de hoja La Salitrera (F14-C15), perteneciente al municipio de Santa María del Río, S.L.P.

El acceso al área, partiendo de la ciudad de San Luis Potosí es mediante la carretera federal No. 57, en su tramo San Luis-Querétaro, se toma la desviación al balneario de Lourdes para llegar al poblado del mismo nombre, a partir de este punto, se toma el camino que va hacia San José Alburquerque, de este camino se desprenden varios de terracería mediante los cuales se puede desplazar a diversos puntos de la zona, entre ellos al área de Palo Verde.

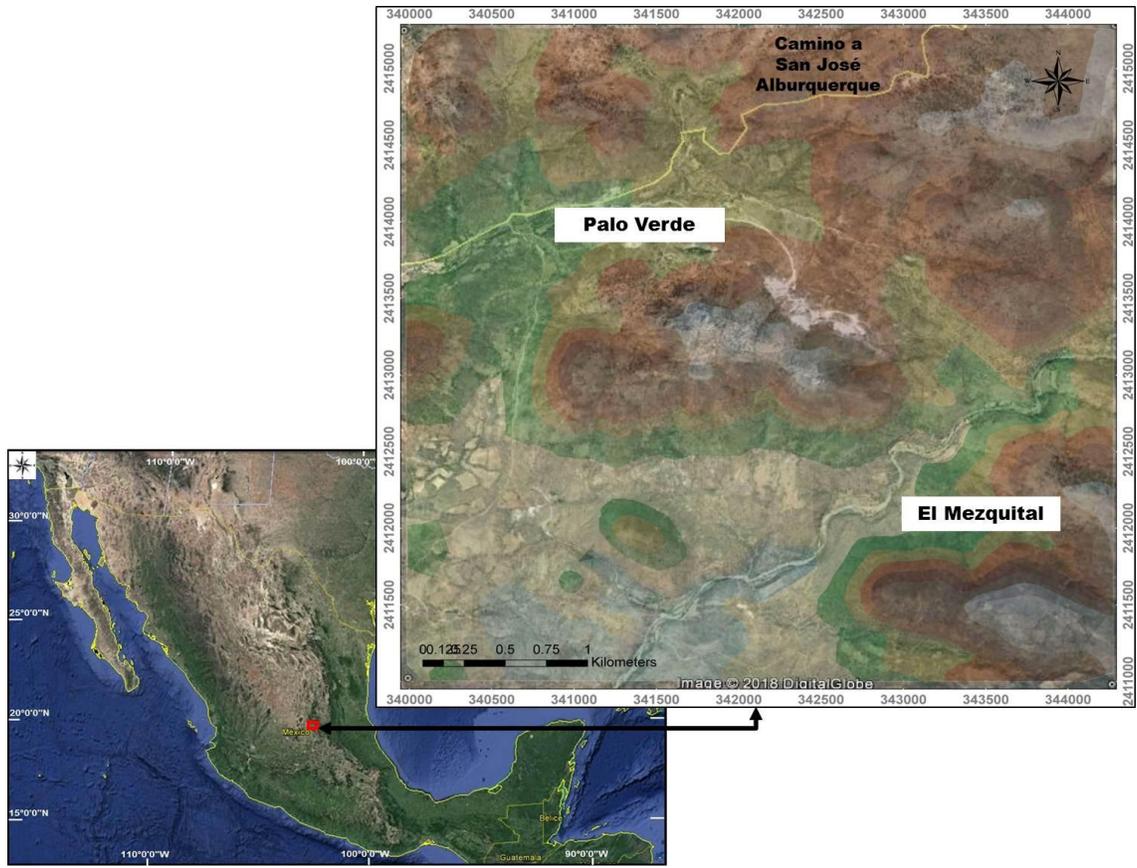


Figura 1. Localización del área Palo Verde, Santa María del Río, S.L.P.

2. MARCO GEOLÓGICO DEL CAMPO VOLCÁNICO DE SANTA MARÍA DEL RÍO

2.1 Geología regional

El basamento pre-volcánico Mesozoico de la Mesa Central está constituido por los terrenos tectonoestratigráficos terreno Guerrero y Sierra Madre Oriental (Campa y Coney, 1983, Figura 2). La geología de esta región se encuentra constituida principalmente de rocas ígneas extrusivas que proceden de un mismo complejo volcánico (Campo Volcánico del Río Santa María), a las cuales precede el intrusivo y/o plutón conocido como Palo Verde, el cual a su vez emplazó a través de las secuencias sedimentarias marinas del Cretácico, lo cual produjo marmolización por metasomatismo de contacto (García-Pérez, 2017).

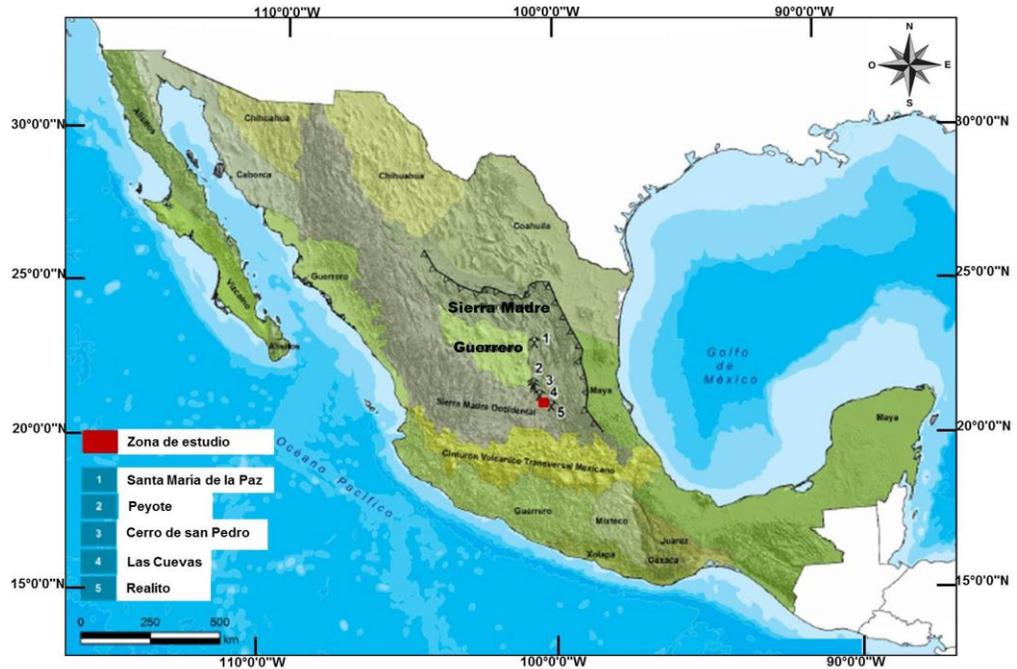


Figura 2. Mapa mostrando los terrenos tectonoestratigráficos y localización del área Palo Verde (modificado de García-Pérez, 2017).

Existen dos elementos paleogeográficos del Mesozoico, definidos por Carrillo-Bravo (1971, 1982), como lo son: Plataforma Valles San Luis Potosí (PVSLP) y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) como se observa en la Figura 3.

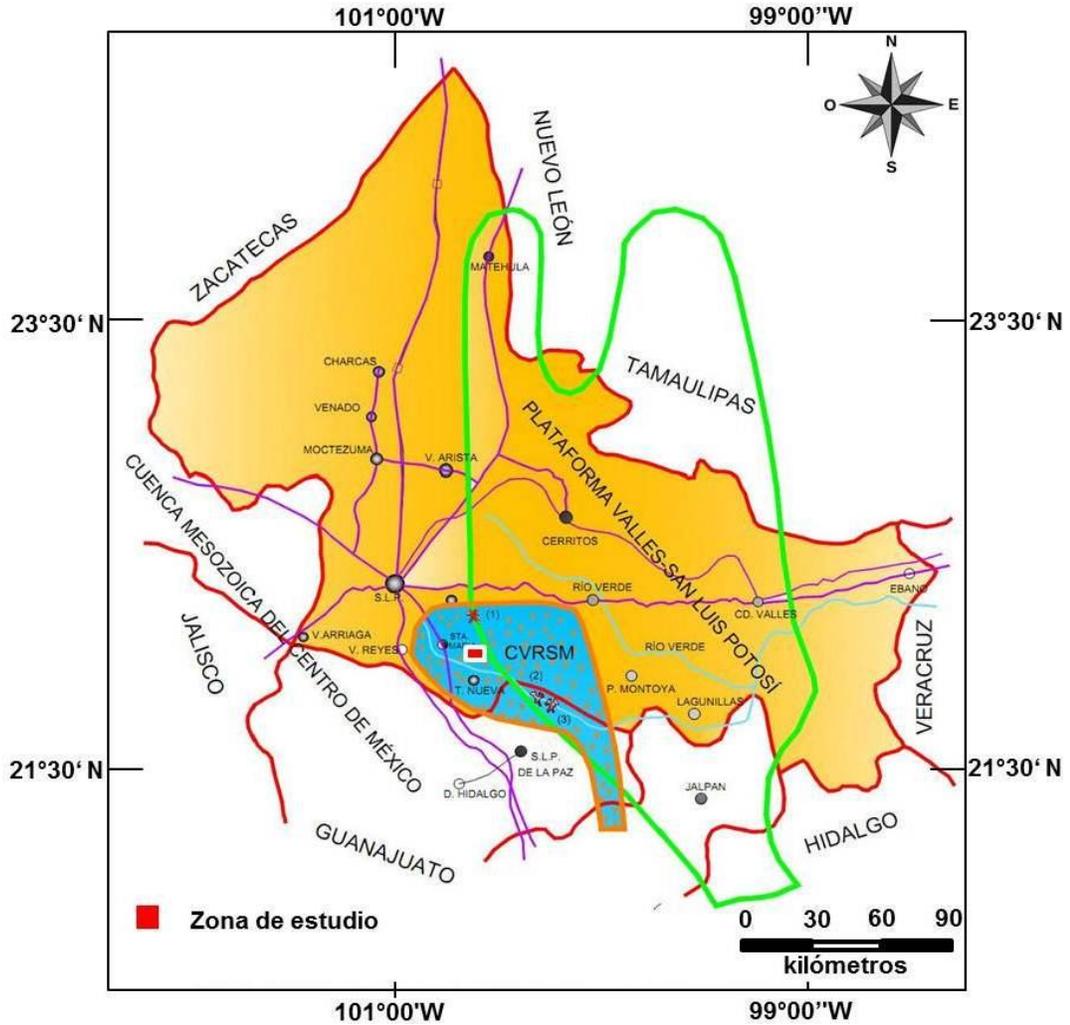


Figura 3. Ubicación del Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) en relación a la Plataforma Valles-San Luis Potosí y Cuenca Mesozoica del Centro de México (modificado de Guerrero-Ibarra, 2012).

Hacia el sur y sur oriente de la Mesa Central (Figura 4) se produjo un paquete volcánico en su mayoría félsico de más de 1000 m de espesor, el cual se ha dividido en: Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) y Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) (Labarthe-Hernández *et al.*, 1989).

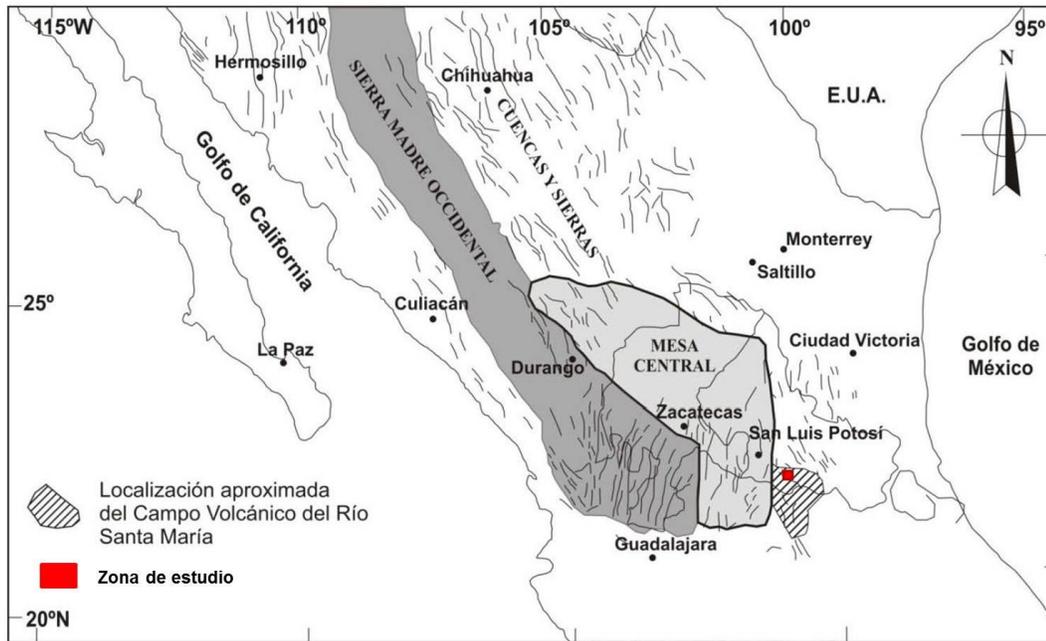


Figura 4. Localización del CVRSM dentro de la Provincia de cuencas y sierras de México (modificado de Guerrero-Ibarra, 2012).

2.2. Tectónica regional

Los efectos de la Orogenia Laramide se pueden observar en cabalgaduras y deformaciones en las secuencias sedimentarias marinas calcáreo-arcillosas y calcáreas del Cretácico que fueron depositadas y litificadas sobre un basamento volcanosedimentario y granítico de edad Jurásico y Precámbrico respectivamente (Campa y Coney, 1983; Ortega-Gutiérrez *et al*, 1995; Keppie, 2010). Por su parte, también la subducción de la placa Farallón causó grandes volúmenes de magma que emplazaron a través de la corteza terrestre por zonas de debilidad durante el Paleógeno (fallas, cabalgaduras, y junción de provincias geológicas). Este magmatismo y plutonismo formó *stocks*, diques, domos, derrames lávicos y piroclásticos, dentro y sobre la secuencia sedimentaria marina, todo ellos conformando lo que se le conoce como el arco volcánico denominado Faja Ignimbrítica Mexicana (FIM). El área de estudio se ubica al margen suroriental de la FIM y esta limita a su vez con el margen suroccidental de la Plataforma

Valles-San Luis Potosí (García-Pérez, 2017), en el límite de la PVSLP y la Cuenca Mesozoica del Centro de México se desarrolló en el Terciario un campo volcánico al cual se le denomina Campo Volcánico del Río Santa María (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984; Figura 5).

2.3. Geología del Campo Volcánico de Santa María del Río

Al sur oriente del Campo Volcánico de San Luis Potosí, se localiza el Campo Volcánico del Río Santa María (CVRSM) Figura 5, el cual está constituido en su porción occidental por un paquete basal ignimbrítico de composición riolítica con una edad de 32 Ma (Ignimbrita Santa María), sobre la cual se emplazaron domos de la Traquita Ojo Caliente (31 Ma). Hacia el centro y oriente del CVRSM la secuencia está formada por un paquete grueso de ignimbritas riolíticas, lava riodacítica, andesíticas e Intrusivos sub-volcánicos, con edades de 30 y 32 Ma (Tristán-González *et al.*, 2009).

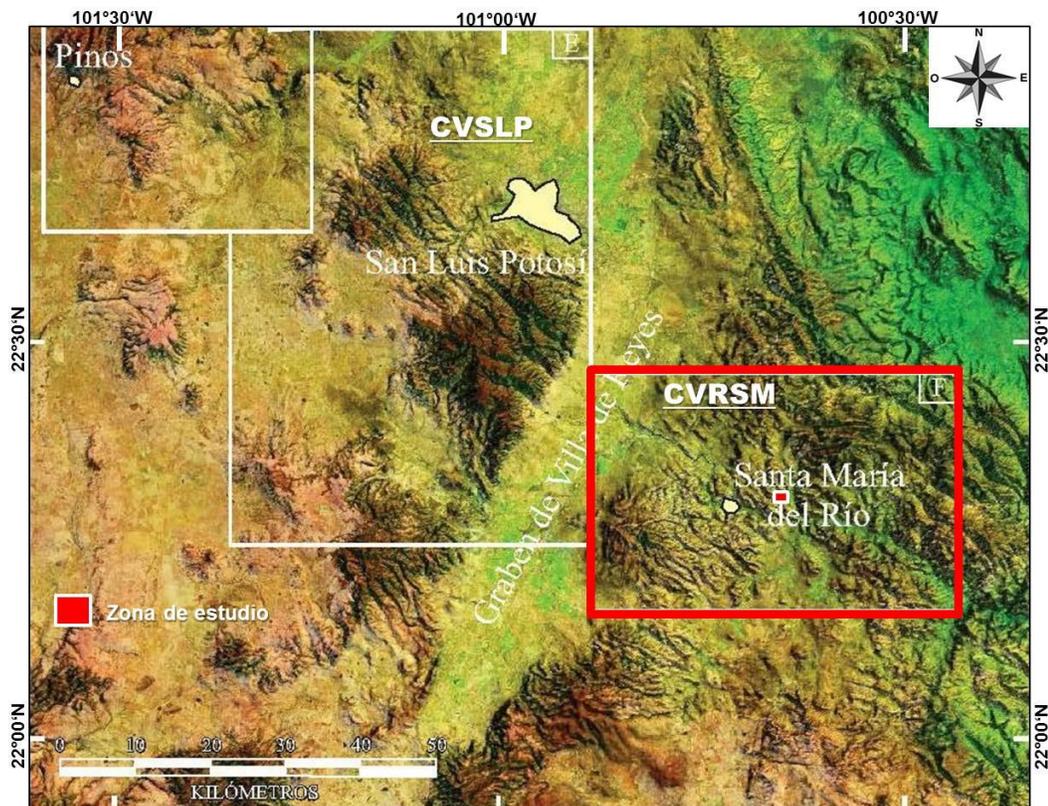


Figura 5. Localización del CVSLP y CVRSM (modificado de Tristán-González, 2009).

El paquete de rocas volcánicas que forman el CVRSM, descansa en su porción occidental sobre sedimentos marinos de la Formación Caracol del Cretácico tardío, acumulada en la Cuenca Mesozoica del Centro de México y en su parte oriental sobre sedimentos de las facies Abra y Tamabra de la Plataforma Valles San Luis Potosí (Tristán-González *et al.*, 2009). La Ignimbrita Santa María del Oligoceno temprano es la unidad basal más constante que cubre el CVRSM, la cual es un depósito de flujos de ceniza soldada de composición riolítica, sobre la cual se emplazaron una serie de lavas que formaron domos exógenos de composición traquítica y riodacítica de la Traquita Ojo Caliente y Latita Portezuelo respectivamente. El paquete volcánico del CVRSM fue afectado por una serie de fallas normales NW-SE formando un arreglo en domino y fosas tectónicas estrechas. Sirviendo algunas de estas fallas como un conducto para la salida de producto piroclástico de la riolita Panalillo inferior. El último evento efusivo del CVRSM corresponde a coladas de lava del basalto cabras, inyectado a lo largo de fallas normales (Tristán-González *et al.*, 2009).

2.4. Estratigrafía del área de estudio

En la zona de Palo Verde se encuentran cuatro unidades geológicas las cuales varían en edad del Cretácico Tardío (Cenomaniano-Maastrichtiano) predominando rocas del vulcanismo del Paleógeno y finalmente con depósitos recientes del Holoceno (García-Pérez, 2017), Figura 9 y 10, las cuales se describen a continuación.

2.4.1. Formación El Abra (kta)

Esta unidad litológica, fue formalmente elevada a la categoría de Formación por Kellum (1930), quien la dividió en fase Miliolina y fase Taninul. Posteriormente, el nombre de formación El Abra fue aplicado por Muir (1936), para un grupo de dos facies: la facie Taninul, con la localidad tipo en el túnel Taninul, al occidente de la estación Taninul sobre el

ferrocarril Tampico-San Luis Potosí y la facie El Abra, con la localidad tipo en la estación El Abra a 9.4 km al oriente de Ciudad Valles, S.L.P.

En lo que se refiere al área de estudio, esta formación se encuentra restringida a un solo afloramiento, el cual se encuentra ubicado en la porción noroccidental del área de estudio al meridional de la localidad de Palo Verde (Figura 6).



Figura 6. Fotografía mostrando afloramiento de caliza de la Formación El Abra, en el área de Palo Verde.

En la porción de Palo Verde llega a presentarse interdigitada con una unidad cretácica indefinida (García-Pérez, 2017).

El contacto inferior de esta unidad calcárea no es visible, por ende los colgantes pudieran ser el producto del empuje causado por el cuerpo intrusivo del área. Carrillo-Bravo asignó (1971) asignó una edad de Albiano-Cenomaniano para la Formación El Abra. Sin embargo, estudios realizados por Alencaster *et al* (1999) usando fauna arrecifal (rudistas) en

el borde del occidente de la PVSLP, determinó un rango estratigráfico amplio hasta Santoniano (García-Pérez, 2017).

La caliza El Abra es correlacionable con las formaciones Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura. El ambiente de depósito ha sido sugerido como plataforma amplia y estable de aguas someras (Carrasco, 1970).

2.4.2. Intrusivo Palo Verde (Tpv)

Labarthe-Hernández *et al.*, (1984), nombraron informalmente a una roca, que aflora en la comunidad de Palo Verde, como Intrusivo Palo Verde. Se trata de una roca con relaciones intrusivas y se considera responsable de la recristalización de la caliza El Abra en la mina de CaCO_3 del citado lugar.

Se trata de una roca de color gris a café claro, holocristalina, fanerítica, con un 30% de fenocristales de 2-3 mm, de ortoclasa, plagioclasa y cuarzo. Los ferromagnesianos (3-5% de la roca), están diseminados en la matriz como pequeños fenocristales de 1mm y son biotita, hastingsita y riebeckita. Como minerales accesorios se observan: monazita, xenotima (?), apatito, minerales opacos y fluorita esporádica.

Por su composición mineralógica se le clasifica como un granito alcalino.

Este Intrusivo se hace de grano más fino hacia sus márgenes y es frecuente encontrarle abundantes inclusiones de una roca metamórfica, gris oscuro, que van de tamaño desde 1 cm a 1 m, siendo más frecuentes de unos 3 cm. Intemperiza en forma esferoidal y un color café amarillento.

En el área cercana al Mezquital, éste Intrusivo se encuentra silicificado, de grano más fino pasando gradualmente a roca sin alteración. En la zona de San José Albuquerque se encuentra fuertemente cloritizado.

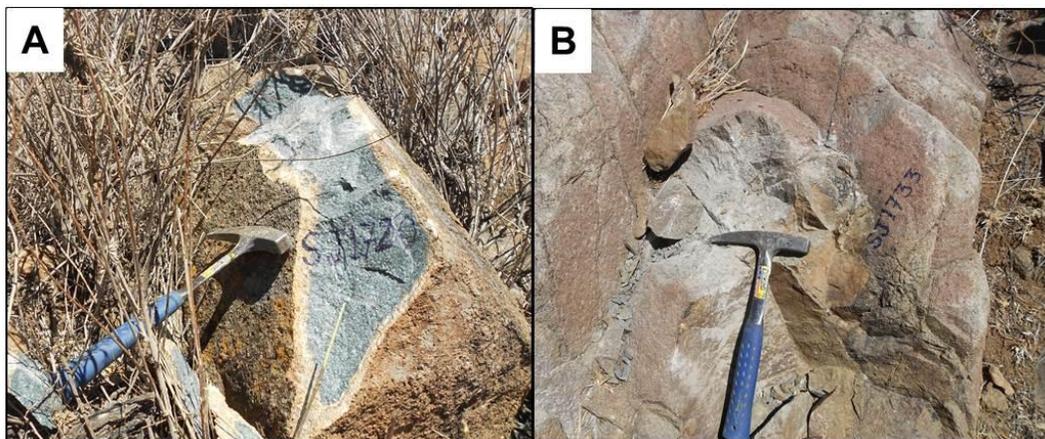


Figura 7. Fotografía mostrando afloramiento del Intrusivo Palo Verde. A) Se localiza hacia la margen este del área de estudio y corresponde a la muestra SJ1720. B) Se localiza en las cercanías de la localidad El Mezquital, en donde se presenta silicificado.

Tiene colgantes de un poco más de 1 km de longitud de caliza recristalizada (mina de CaCO_3) en Palo Verde.

Tristán-González *et al.*, (2009) reportó edades isotópicas para éste intrusivo de 31.5 ± 0.7 Ma (Oligoceno Tardío), así mismo lo clasificó como una sienita. García-Pérez (2017) realizó dataciones isotópicas en circones mediante el método U-Pb dando una edad de 32.42 ± 0.49 Ma con lo que se confirma una edad de cristalización del plutón durante el Oligoceno Medio.

2.4.3. Ignimbrita Santa María (Tis)

Originalmente descrita por Labarthe y Tristán (1981), en la cartografía de la Hoja Santa María (F14C14), posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), que considera su localidad y sección tipo en los cerros inmediatamente septentrional del Santa María del Río. En esta localidad consiste de flujos de ceniza riolítica, con zonas de cristalización bien definidas.

En el área de estudio, esta unidad litológica se encuentra distribuida en la porción noroccidental. La Ignimbrita Santa María se consta de una roca de color gris rosáceo, de textura porfirítica y eutaxítica, con un 30% de

fenocristales de 2 a 5 mm de sanidino euhedral y cuarzo subhedral con óxidos de hierro en una matriz desvitrificada. Es muy frecuente que presenten fragmentos alargados de 2 a 15 cm bien colapsados de pómez, que dejan cavidades al intemperizar en la roca.



Figura 8. Fotografía mostrando afloramiento de la Ignimbrita Santa María, localizado al noroeste del área de estudio.

Su edad está dada por su posición estratigráfica y resultado de análisis isotópico realizado por Tristán-González *et al.*, (2009) determinaron 32 ± 0.8 y 31 ± 0.7 Ma.

2.4.4. Domo Riolítico (Tdr)

Se ubica en la margen sur del arroyo San Jorge y encajonado en el Intrusivo Palo Verde, aflora un domo riolítico de aproximadamente 1 km de diámetro, el cual se correlaciona con la unidad Riolita San Miguelito, la cual fue descrita por primera vez en la Hoja F14A84 (San Luis Potosí) por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1987) y definida más formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982) considerando su localidad tipo en la estribación septentrional de la Sierra de San Miguelito.

Compuesto de una roca color gris claro rosáceo, porfirítica con 5-10% de fenocristales de 1-2 mm de sanidino y cuarzo, en matriz desvitrificada fluidal. Esta unidad es muy semejante megascópicamente a la Riolita San Miguelito que aflora en áreas adyacentes a la hoja Salitrera (Labarthe-Hernández *et al.*, 1984).

En la Figura 9 se puede ver el mapa geológico del área de Palo Verde.

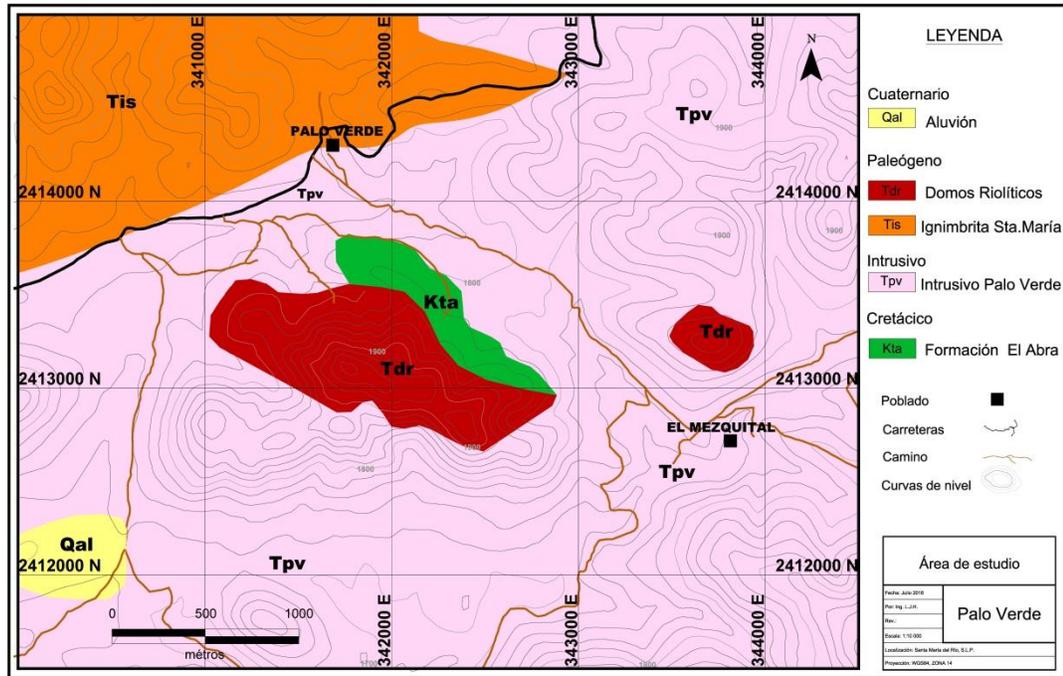


Figura 9. Mapa geológico del área Palo Verde.

Como ya se mencionó antes, en el área de Palo Verde se encuentran cuatro unidades litológicas, todas ellas del Oligoceno, además de material de relleno del Cuaternario (Figura 10).

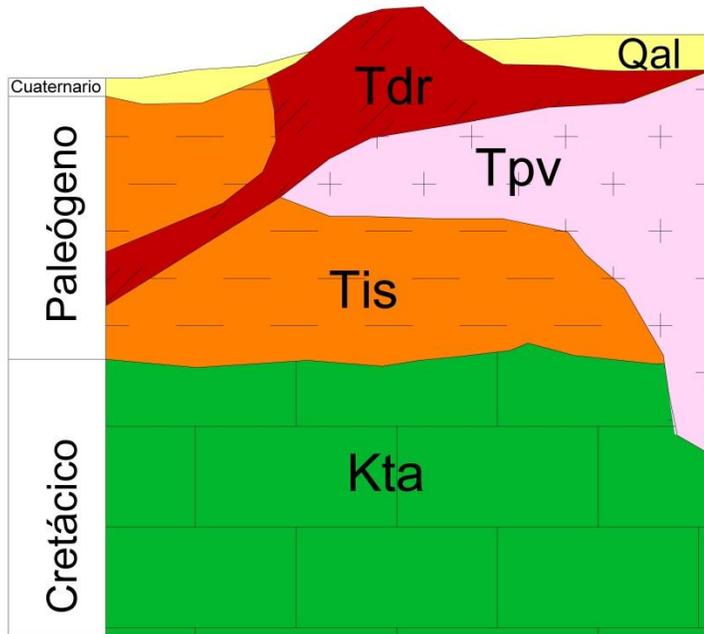


Figura 10. Columna estratigráfica del área de Palo Verde.

3. GEOQUÍMICA DEL AREA DE PALO VERDE

La Geoquímica se apoya del uso de análisis de elementos mayores y traza, con el fin de ayudar a entender cuestionamientos geológicos, siendo los elementos mayores definidos como aquellos que sobrepasan el 1 % en la roca, los elementos menores se encuentran en el rango de 0.1-1 %, mientras que los elementos traza son aquellos menores al 0.1 % los cuales se expresan generalmente en partes por millón.

Los elementos del grupo de los lantánidos muestran un carácter lillófilo, según la clasificación de Goldschmidt, por su escasez en la naturaleza (<0.1%) se clasifican como elementos traza, unos tienden a incorporarse a minerales tempranos y otros a minerales tardíos.

3.1. Fundamentos

Dispersión Geoquímica: Proceso mediante el cual átomos y moléculas se mueven a nuevas localizaciones y medios ambientes geoquímicos. La dispersión puede ser afectada por procesos o agentes mecánicos tales como la inyección del magma o movimientos superficiales, así como por fenómenos químicos como disolución y precipitación.

Dispersión primaria: Incluye todos los procesos que conducen al emplazamiento de elementos durante la formación del depósito mineral (se conoce también como zoneamiento).

Dispersión secundaria: Se aplica a la redistribución del patrón primario, se lleva a cabo después de la formación del yacimiento mineral (es producto de la alteración de una roca huésped).

Movilidad geoquímica: Es la capacidad que tiene un elemento de ser transportado de un ambiente geológico a otro. Algunos elementos muestran un alto grado de movilidad durante la dispersión en ambientes particulares. El pH es uno de los principales factores que controlan la movilidad de los elementos en ambientes geoquímicos (Rose *et al.*, 1979).

Coefficiente de partición: El coeficiente de partición de un elemento en un mineral específico es una expresión de su capacidad para formar parte de la red cristalina. Dicho de otra manera, el coeficiente de partición de un elemento en un mineral, representa la cantidad de un elemento que entra o permanece en una masa fundida durante el calentamiento o enfriamiento, en comparación con la proporción que se captura dentro de la red cristalina del mineral (McIntire, 1963).

Valores promedio en la corteza terrestre: A la abundancia normal de un elemento en materiales de la Tierra es a lo que se le conoce como valor normal de fondo o *background* (Rose et al., 1979).

Elementos litófilos: elementos que tienen afinidad por el oxígeno y cuyos electrones están más disponibles para formar iones, son los mayores componentes de la corteza terrestre, ejemplo de ellos: Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba y las tierras raras.

Abundancia de elementos en la corteza terrestre

En la tabla 1 se muestran las estimaciones de abundancia de algunos de los elementos en la corteza (Rose et al, 1979).

Tabla 1. Estimación de las concentraciones de elementos en corteza. Modificado de: Rose et al., 1979.

Elemento	Abundancia (ppm)	Elemento	Abundancia (ppm)
Arsénico	2	Plomo	10
Bismuto	0.1	Magnesio	17000
Cadmio	0.1	Manganeso	1000
Cerio	81	Molibdeno	1.5
Cesio	3	Níquel	75
Cromo	100	Niobio	20
Galio	26	Renio	0.0006
Hafnio	3	Escandio	13
Lantano	25	Telurio	0.002
Torio	10	Uranio	2.5
Titanio	4400	Zinc	80

3.2. Muestreo geoquímico

Es relevante recordar que, el muestreo es una operación cuantitativa, los resultados tiene valores máximos y mínimos, lo que implica contrastes en lo que se mide. Desde una perspectiva geoquímica, justamente esta particularidad es notable ya que como sabemos en la corteza terrestre la abundancia de los elementos (producto de la dispersión primaria) pocas veces está distribuida en forma regular (Vargas-Rodríguez, 2007). Los métodos de muestreo se han diversificado, existiendo actualmente diversas técnicas, entre las más usuales se encuentran:

- Muestreo de sedimentos de arroyo; se emplea casi exclusivamente para estudios de reconocimiento.
- Muestreo de suelo (con fines exploratorios); básicamente es aplicado en donde el estudio de reconocimiento por sedimentos de arroyo ha encontrado una anomalía o donde algún otro método indica la posibilidad de mineralización, puede utilizarse como de reconocimiento en algunas zonas áridas.
- Muestreo de roca, se aplica en trabajos a detalle donde se han encontrado anomalías geoquímicas y/o geofísicas, para determinar la extensión de un depósito mineral conocido.

El muestreo geoquímico de roca en esquirla es la técnica más común para la obtención de muestras representativas de un determinado material natural colectado de una manera estandarizada. El muestreo de esquirlas puede efectuarse en diversos puntos donde la roca se encuentra expuesta en superficies.

El muestreo deberá de estar controlado por medio de una retícula de acuerdo al tipo de depósito que se pretende encontrar. En relación a los espaciamientos entre cada punto de muestra, estos se definen de acuerdo

al tamaño del objetivo y la etapa de exploración en la que se efectúe el muestreo (reconocimiento, detalle o semi-detalle).

El punto de muestreo se indica en campo con una clave mediante el uso de pintura en aerosol generalmente, así como también se indicará en la libreta de campo y plano base con las respectivas coordenadas y clave de la muestra (Ortiz-Aguirre, 1976).

Los puntos a considerar, habitualmente, a la hora de realizar un muestreo son:

- ✓ Fecha de toma de muestra
- ✓ Clave de la muestra
- ✓ Localidad
- ✓ Coordenadas
- ✓ Tipo de muestra
- ✓ Características geológicas del punto de muestreado
- ✓ Nombre de la persona que tomó la muestra

3.3. Método analítico de determinación

Espectrometría

La espectrometría de masas es actualmente el detector más potente de cromatografía, pues el espectrómetro de masas es capaz de detectar bajas concentraciones del analito, suministra información tanto cualitativa como cuantitativa.

La espectrometría de masas es una técnica para estudiar las masas de átomos, moléculas o fragmentos de moléculas, para obtener un espectro de masas, las moléculas gaseosas o especies desorbidas de fases condensadas se ionizan, los iones se aceleran en un campo eléctrico y a

continuación se separan según su relación masa/carga (m/z) (Harris, 2012).

Espectrómetro de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

Desde principios de los ochentas la espectrometría de masas-plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) se ha desarrollado hasta convertirse en una de las técnicas más importantes para el análisis elemental, debido a sus bajos límites de detección para la mayoría de los elementos, su alto grado de selectividad y su grado de exactitud.

Una de las ventajas de utilizar la detección espectrométrica de masas con acoplamiento inductivo en comparación con la detección óptica es que los espectros de masa suelen ser mucho más sencillos y fáciles de interpretar que los correspondientes espectros ópticos. Esta propiedad es especialmente cierta para aquellos elementos como las tierras raras, que tienen miles de líneas de emisión. En lo que respecta a los límites de detección, éstos varían entre 0.002 y 0.7 ppb, con la mayoría de los elementos en el intervalo 0.02 – 0.1 ppb (Skoog *et al.*, 2001).

Preparación de muestras para el análisis

El primer paso para preparar la muestra, es fraccionarla a un tamaño adecuado para poderse manipular en el laboratorio, para ello se emplea una trituradora de mandíbula, la cual debe de limpiarse cuidadosamente cada que se termina de triturar una muestra, cuando el tamaño de grano de la muestra es el requerido (para el caso que nos ocupa, tamiz No. 200), éste se homogeneiza y es depositado en un recipiente y se sella para ser llevado al laboratorio.

Teniendo el material con el tamaño adecuado para el análisis químico, lo siguientes es:

- ✓ Pesado de la muestra (0.1 g)

- ✓ Digestión de la muestra (lo que implica la adición de diferentes ácidos para una mejor dilución de la misma).
- ✓ Análisis de la muestra
- ✓ Resultados

Los ácidos aplicados a las muestras durante el proceso de digestión fueron HCL, HF y HNO₃, los cuales se describen brevemente en la tabla 2.

Tabla 2. Ácidos utilizados para disolver muestras

Ácido	Breve descripción
HCl	Ácido no oxidante, útil para muchos metales, óxidos, sulfuros, carbonatos y fosfatos.
HF	Usado primariamente para disolver silicatos.
HNO ₃	Además de disolvente es un agente oxidante, es buen disolvente de los metales.

3.4 Elementos de las tierras raras

Las tierras raras se componen de 15 elementos (grupo de los lantánidos en la tabla periódica) con número atómico que va del 57 (La) al 71 (Lu) más el itrio (Y) y el escandio (Sc) por sus características físicas y químicas similares a los lantánidos.

Cabe mencionar que este grupo de elementos no es raro, muy contrariamente a como lo indica su nombre, fueron llamados así debido a su descubrimiento en el siglo XVIII y XIX en forma de óxidos (los cuales en ésta época eran denominados como tierras).

Basándose en el número atómico, los elementos de las tierras raras se han dividido, por lo general, en dos grupos: tierras raras ligeras (Light Rare Earth Elements, LREE, con número atómico entre 57-63, que incluyen a La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm y Eu) y las tierras raras pesadas (Heavy Rare Earth Elements, HREE, con números atómicos de 64 a 71, los cuales son Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), Figura 8.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.008												5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
2 Li 6.941	4 Be 9.012											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.948
3 Na 22.990	4 Mg 24.305	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 52.00	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.63	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
4 K 39.098	20 Ca 40.078	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc [98]	44 Ru 101.07	45 Rh 101.07	46 Pd 106.32	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
5 Rb 85.468	38 Sr 87.62	57 La 138.905	58 Ce 140.12	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm [145]	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.930	70 Yb 173.054	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49
6 Cs 132.905	56 Ba 137.327	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.222	78 Pt 195.084	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]	87 Fr [223]	88 Ra [226]
7 Ac [227]	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np [237]	94 Pu [244]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [251]	99 Es [252]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [260]	104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [263]

Figura 11. Tierras raras, pesadas (HREE) y ligeras (LREE). Modificado de: Villela-Olavarría *et al*, 2016.

Las tierras raras pesadas (HREE) son por lo general (aunque no siempre) mucho más escasas que las tierras raras ligeras (LREE). Por ello la mayoría de los depósitos de minerales de tierras raras están dominados en términos de tonelaje por la presencia de LREE. También las HREE se presentan más frecuentemente en minerales que son más difíciles de procesar que los minerales más comunes ricos en LREE.

3.4.1. Propiedades físicas y químicas

En lo que respecta a las propiedades, tanto físicas como químicas, los lantánidos poseen configuraciones electrónicas únicas, lo cual explica sus especiales e irrepetibles características, que los hacen insustituibles en multitud de aplicaciones.

Las relevantes propiedades magnéticas de los elementos de las tierras raras se debe a la presencia de electrones desapareados en la capa 4f. Los electrones ocupan los orbitales 5p y 6s antes que el orbital 4f, más interno, que permanece desocupado o solo parcialmente ocupado. Como consecuencia, los orbitales más externos 5p y 6s cubren al orbital 4f, más interno.

Los electrones responsables de las propiedades de los iones lantánidos, como ya se mencionó antes, son los electrones de los orbitales 4f, los cuales se encuentran protegidos muy efectivamente de las influencias del exterior por los orbitales más externos 5s, 5p y 6s. En consecuencia los estados de las diversas configuraciones $4f^n$ solo se ven afectados muy ligeramente por el medio que rodea a los iones.

Propiedades físicas

En lo que respecta a las propiedades físicas las tierras raras poseen una excepcional propiedad magnética y óptica. El origen del fuerte magnetismo de los átomos de los elementos de las tierras raras se debe casi completamente a la contribución de los electrones desapareados de la capa 4f, cuyos momentos magnéticos no solo no se cancelan entre sí, sino que se alinean con los campos exteriores, reforzándolos, las diferencias en el comportamiento del campo magnético entre ellos se explica por las diferencias en el número de electrones 4f que poseen.

La subcapa 4f se encuentra parcialmente protegida por las subcapas más externas y completas 5s, 5p y 6s, como resultado se reducen los posibles efectos de los demás iones del sólido sobre dichos orbitales 4f, esto permite que el acoplamiento spin-orbita sea más fuerte que los efectos de los campos eléctricos homogéneos procedentes de otros iones del cristal.

Propiedades químicas

Las tierras raras presentan un comportamiento químico extraordinariamente similar entre sí. El comportamiento químico de los elementos, como ya se mencionó anteriormente, viene determinado por las estructuras de sus capas más externas ya que, lógicamente, son estas las que sirven a los átomos para establecer enlaces con los otros átomos. El factor que influye principalmente en las propiedades de los lantánidos es el radio iónico. A partir de estas consideraciones, es fácil entender el comportamiento químico tan similar de los distintos elementos de las tierras raras y es precisamente esta estrecha analogía química lo que dificulta la separación de los elementos de las tierras raras de otros. Así mismo como consecuencia de su gran similitud química, estos elementos se han mantenido agrupados en determinadas rocas, incorporándose solo a ciertos minerales (Montero-Montero, 2012).

Minerales que contienen tierras raras

Es importante mencionar que 12 de los 20 elementos estables más raros del sistema solar pertenecen a las tierras raras. En los que respecta a la corteza terrestre, no corresponden a elementos raros, pues no son de los más escasos, por ejemplo, el Ce es de los elementos más abundantes de todas las tierras raras, incluso es más abundante que el Cu, a su vez, el Nd y el La son más abundantes que el Pb o que el Ni, incluso los elementos de tierras raras más escasos (Tm y el Lu), son más abundantes que el Pt o la Ag y casi unas 200 veces más que el Au, en la Figura 12 se puede apreciar la abundancia relativa de las tierras raras en corteza en comparación con los elementos formadores de rocas. En la naturaleza, no se encuentran como elementos metálicos, si no, que lo hacen en una amplia variedad de minerales, como haluros, carbonatos, óxidos y fosfatos.

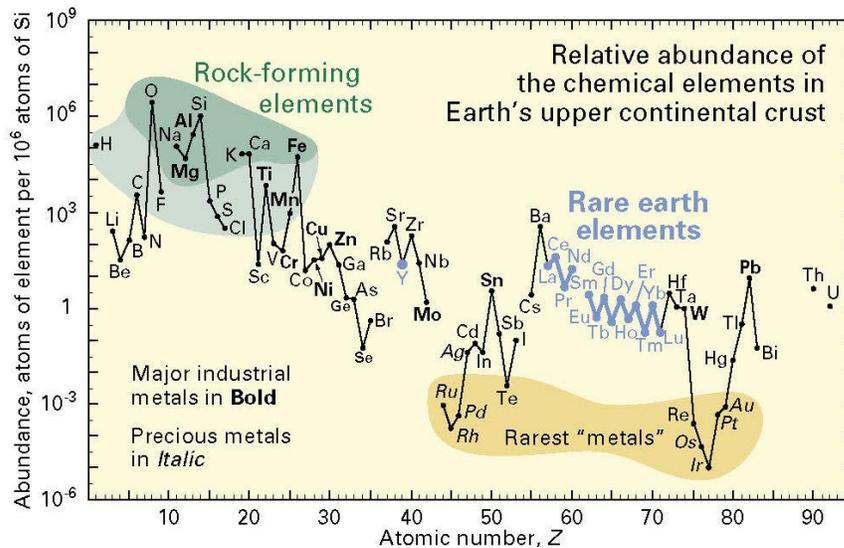


Figura 12. Abundancia relativa de las tierras raras en corteza. Modificado de: USGS, Rare Earth Elements-Critical Resources for High Technology, 2002.

Los lantánidos se pueden encontrar en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las cuales se han enriquecido en dichos elementos mediante diversos procesos primarios ígneos o hidrotermales o procesos secundarios sedimentarios.

Como sabemos la corteza de la Tierra se ha generado a partir de procesos ígneos (aquellos en los que el magma se enfría y se solidifica, lo que incluye mezcla de roca fundida, volátiles y sólidos que se encuentran en el interior de la Tierra). El enfriamiento del magma de manera sucesiva, va dando lugar a cristalizaciones de diferentes minerales (minerales específicos para determinadas temperaturas).

Los minerales de tierras raras son producto de la concentración de estos elementos. Los mecanismos de concentración dividen a los minerales de tierras raras en dos grupos: minerales primarios y minerales secundarios.

Minerales primarios: Son rocas ígneas con cantidades significativas de tierras raras, concentradas por fusión parcial y/o cristalización fraccionada o concentraciones hidrotermales de tierras raras que fueron ordenadas por

disolución y precipitación de iones por agua subterránea caliente y ácida (fluidos hidrotermales).

Minerales secundarios: Son concentraciones de tierras raras que se forman a partir y durante el desgaste y transporte de los minerales primarios, generalmente partículas clasificadas mediante gravedad.

Actualmente se conocen más de 200 minerales que contienen tierras raras, con una estimación de 100 millones de toneladas de reservas mundiales.

3.4.2. Grupos de minerales

Carbonatitas.- Son rocas ígneas poco comunes, derivadas de magmas ricos en carbonatos en contraste a las rocas ricas en sílice (SiO_2) y se caracterizan, además, por ser ricas en LREE. En estas rocas los carbonatos, principalmente la calcita y la dolomita, corresponden a más del 50% de la composición de la roca. El principal mineral de tierras raras presentes es la bastnasita.

Rocas ígneas alcalinas.- Se forman a partir de proceso geológicos que extraen y concentran elementos que no encajan en las estructuras de los minerales comunes formadores de rocas. Están empobrecidas en sílice respecto al sodio, potasio y calcio pero ricas en HREE, Y y Zr.

En la tabla 3 se muestra algunos de los principales minerales que contienen tierras raras y lugar de mayor ocurrencia.

Tabla 3. Composición de los principales minerales de tierras raras, país donde se localiza yacimiento y porcentaje de óxidos. Modificado de: Greenland Minerals Annual Report, 2009.

Mineral	Formula	Major Occurrences	REO max (%)
Bastnasite	LnFCO ₃	China, USA	75
Monazite	(Ln,Y,Th)PO ₄	China, Australia, Brazil, India, Malaysia, Africa	65
Loparite	(Na,Ca,Ln,Y)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	Former Soviet Union	32
Xenotime	YPO ₄	China, Australia, Malaysia, Africa	62
Apatite	(Ca,Ln) ₅ [(P ₂ Si)O ₄] ₃	Former Soviet Union, Australia, Canada	12
Ionic Clays	Weathered Xenotime and Apatite	China	n/a

Como una segunda clase de minerales primarios, están los de origen hidrotermal. En muchos casos, las tierras raras están asociadas con apatito o fluorita como minerales de ganga en muchos depósitos hidrotermales, donde ellos pueden haber jugado un papel dominante en la formación de minerales de tierras raras, por lo tanto hay muchas rocas comunes que forman minerales incorporando relativamente pequeños, pero significativas cantidades de tierras raras dentro de sus estructuras, por ejemplo sistemas hidrotermales que incluyen anhidrita, barita, calcita, granate, scheelita, turmalina y wolframita. Minerales de tierras raras hidrotermales pueden encontrarse en una gran variedad de ambientes geológicos extendiéndose como rellenos de fisura y vetas con brechas, *stockwork*, *skarn* y una larga escala de cuerpos metasomáticos de reemplazamiento. La variabilidad de los datos demuestra que la concentración de tierras raras es generalmente bajos comparado a otros componentes en aguas hidrotermales, sin embargo aguas con bajo pH parecen estar enriquecida en tierras raras a diferencia de las neutras o soluciones alcalinas de similares condiciones. La presencia y concentración de tierras raras en fluidos hidrotermales es muchas veces controladas por la temperatura, presión y composición de la fase fluida,

además de los factores cristaloquímicos y reacciones cinéticas que también controlan la partición de las tierras raras entre el mineral y solución, así como entre soluciones y el fundido del cual pueden haberse derivado (Carro *et al*, 2006).

Patrón de zig-zag de tierras raras y normalización

Generalmente las concentraciones de tierras raras se normalizan antes de hacer una comparación e interpretación. Esto significa que se hace una corrección a valores comunes o estándares. Al comparar datos, hay que asegurarse siempre de normalizarlos (ponerlos en términos comunes).

Una pregunta importante a la hora de normalizar, es ¿Comparar contra qué?, el resultado de la normalización es la comparación de dos grupos de datos, los datos del muestreo contra unos ya establecidos. Se asume que la abundancia de las tierras raras en meteoritos condriticos, que representan el material primitivo del sistema solar, deben de ser igual a las que habían en la Tierra primitiva (Vargas-Rodríguez, 2007).

La normalización tiene dos propósitos, primero eliminar las variaciones en los valores iniciales de los datos, ya que de entrada pudieran ocultar cambios y/o anomalías significativas, y en segundo lugar elige y establece un punto de partida común específico contra el cual se pueden comparar los cambios en dos o más conjuntos de datos, la normalización de datos, es de vital importancia para construir relaciones significativas entre eventos conectados.

La normalización es un proceso simple, se trata de dividir la abundancia del elemento entre la medida estándar a la cual se está comparando (normalmente se normaliza a condritas o MORB), de estos dos, la normalización a condritas es la más usada, ya que estos valores son el análogo más cercano que se posee de la abundancia original del sistema solar (antes de que otro proceso tuviese lugar). Los datos normalizados siempre deben de especificar con que valores se hizo la normalización.

Solo en circunstancias poco comunes, y en unos pocos minerales de baja temperatura (en rocas carbonáticas y fosfáticas) llegan los elementos de las tierras raras a formar minerales estables. No obstante debido a su incompatibilidad química con otros elementos, hace que se incorporen con dificultad en las estructuras cristalinas de los minerales que forman las rocas.

Los elementos de las LREE son de radio iónico mayor y los menos compatibles, mientras que las HREE son los de menor radio iónico y los más compatibles. Esto explica la diferencia de abundancia existente entre los diferentes elementos constituyentes de las tierras raras de la corteza terrestre: los elementos de las LREE (más incompatibles) se encuentran concentrados en mayor medida en la corteza terrestre en comparación a las HREE (más compatibles). En la mayoría de los yacimientos de minerales de la tierras raras, los primeros 4 elementos (lantano, cerio, praseodimio y neodimio) constituyen el 80%, y el 99% del total de metales de tierras raras presentes en el mineral.

Distribución de las tierras raras

Hasta ahora se conocen pocos países que poseen yacimientos de tierras raras. Los países que cuentan con producción de estos metales, están liderados, en gran parte, por China, seguido de India, Australia, Brasil, Malasia, Estados Unidos y Rusia. Por otro lado Guatemala, Argentina, Chile y México cuentan con algunas reservas que han sido objeto de estudios parciales.

La bastnaesita, que es el mineral primario, existe en los yacimientos de China y E.U.A., lo que constituye el porcentaje de recursos económicos más grandes de tierras raras en el mundo, mientras que la monacita se haya en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y E.U.A.

Apatito, scheralita, eudialita, monacita secundaria, loparita, fosforita, soluciones de uranio gastadas y xenotima, constituyen la mayoría de los recursos restantes (Vargas-Rodríguez, 2007).

En la tabla 4 se muestra la concentración media en ppm de los elementos de las tierras raras en la corteza terrestre.

Tabla 4. Estimación de las concentraciones de tierras raras en corteza, ordenadas de acuerdo a su número atómico creciente (valores en ppm). Fuente: USGS, 2010

Elemento	Mason y Moore (1982)	Jackson y Christiansen (1993)	Sabot y Maestro (1995)	Wedephol (1995)	Lide (1997)	McGill (1997)
Lantano (La)	30	29	18	30	39	5 a 18
Cerio (Ce)	60	70	46	60	66.5	20 a 46
Praseodimio (Pr)	8.2	9	5.5	6.7	9.2	3.5 a 5.5
Neodimio (Nd)	28	37	24	27	41.5	12 a 24
Samario (Sm)	6	8	6.5	5.3	7.05	4.5 a 7
Europio (Eu)	1.2	1.3	0.5	1.3	2	0.14 a 1.1
Gadolinio (Gd)	5.4	8	6.4	4	6.2	4.5 a 6.4
Terbio (Tb)	0.9	2.5	0.9	0.65	1.2	0.7 a 1
Disproseo (Dy)	3	5	5	3.8	5.2	4.5 a 7.5
Holmio (Ho)	1.2	1.7	1.2	0.8	1.3	0.7 a 1.2
Erbio (Er)	2.8	3.3	4	2.1	3.5	2.5 a 6.5
Tulio (Tm)	0.5	0.27	0.4	0.3	0.52	0.2 a 1
Yterbio (Yb)	3.4	0.33	2.7	2	3.2	2.7 a 8
Lutecio (Lu)	0.5	0.8	0.8	0.35	0.8	0.8 a 1.7
Yttrio (Y)	33	29	28	24	33	28 a 70
Escandio (Sc)	22		10	16	22	5 a 10

En México, de acuerdo a estudios previos, presenta potencial favorable para la localización de estos elementos. Existen datos de ocurrencia de elementos de tierras raras en alanita de las pegmatitas del estado de

Oaxaca, en las rocas fosfóricas de Baja California, así mismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana, la cual se extiende desde Coahuila hasta Veracruz.

3.5. Análisis e interpretación de resultados

El muestreo se llevó a cabo en un área de 4 km por 4 km aproximadamente en la comunidad de Palo Verde, siendo un total de 25 muestras colectadas y analizadas, 15 de las cuales corresponden al Intrusivo Palo Verde, 5 al domo riolítico, 2 a ignimbrita y 3 de carbonatos. En la Figura 13 se puede observar la malla de muestreo realizado.

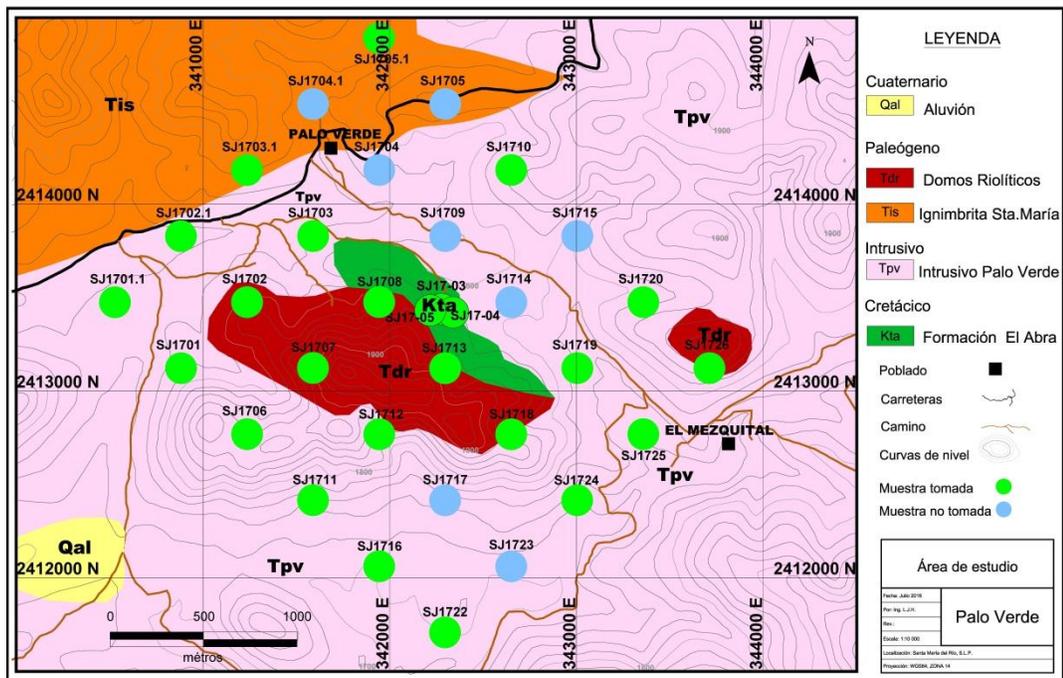


Figura 13. Muestreo geoquímico del área de Palo Verde.

Las muestras se prepararon y analizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el método analítico empleado fue el ICP-MS, con el cual se determinó la concentración de 48 elementos traza (incluyendo a las tierras raras). Para fines de un buen control de calidad en el análisis químico, se emplearon

dos muestras de referencia certificadas: IGLd-1 y GSP-2, así como 3 blancos.

Debido a la gran cantidad de información que se generan durante un muestreo geoquímico para su procesado e interpretación, se debe recurrir a métodos de las ciencias exactas que permitan manejar bases de datos de una manera confiable.

La estadística cuenta con bases matemáticas que hacen referencia a la recolección, análisis e interpretación de datos que busca explicar condiciones regulares en fenómenos de tipo aleatorio, se divide en dos ramas: estadística descriptiva y estadística inferencial. La estadística descriptiva se enfoca en los métodos de recolección, visualización y resumen de datos originales, dichos datos pueden ser resumidos numéricamente (Infante-Gil *et al.*, 2001). La estadística tiene gran uso en la interpretación geoquímica.

La matriz de correlación es otro método estadístico, utilizado para establecer relaciones entre determinados elementos, la matriz de correlación es una tabla de doble entrada para A, B, C, etc. Que muestra una lista multivariable horizontal y la misma lista verticalmente, con el correspondiente coeficiente de correlación llamado r , expresado con un número que va de 0 a 1. El modelo o tabla mide y muestra la interdependencia en relaciones asociadas, entre cada pareja de variables y todas al mismo tiempo. La correlación es el grado de relación entre variables (Murray *et al.*, 1991).

Con los resultados de laboratorio y el programa XLSTAT, se elaboró una matriz de correlación (coeficiente de correlación de Pearson) para poder visualizar las afinidades entre elementos, incluyendo al grupo de las tierras raras.

Observando la matriz de correlación, se tiene que los elementos que muestran los valores de correlación positiva más altos son Bi, Mn, Fe, Sc,

y el Ga (con valores de grado de significancia entre 0.8 y 0.9), como se puede ver en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de significancia más altos en la matriz de correlación de Pearson de lote de muestras de Palo Verde.

Elemento	Sc	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Bi
Bi	0.9628	0.9772	0.9858	0.9365	0.7097	0.9433	1.0000
Fe	0.9519	0.9978	1.0000	0.9818	0.7369	0.9505	0.9858
Ga	0.8807	0.9389	0.9505	0.9240	0.6681	1.0000	0.9433
Mn	0.9466	1.0000	0.9978	0.9869	0.7455	0.9389	0.9772
Sc	1.0000	0.9466	0.9519	0.9149	0.8216	0.8807	0.9628

Por su parte el grupo de las tierras raras presentan, como es de esperarse, buena afinidad entre sí (alrededor de 0.9). Para más detalle se pueden consultar el anexo de la matriz de correlación.

Es interesante notar que existen 3 elementos en el lote del muestreo, que no presentan relación clara ni positiva ni negativa, de igual manera, las concentraciones de los mismos son bajas, se trata del As, Cd y Cs, para mayor detalle se puede consultar el anexo de la matriz de correlación del muestreo geoquímico.

Los programas computacionales también juegan un papel importante para la manipulación de datos geológicos en general.

Para visualizar la distribución espacial de los datos obtenidos se utilizan así mismo herramientas computacionales basadas en algoritmos de interpolación. *Surfer* es un programa gráfico de interpolación que provee de varias opciones de representación de mallas (*grids*) y mapas, proporcionando las opciones para editar la información (como filtrados, recortes, transformaciones matemáticas, etc.). Los métodos empleados para efectuar las interpolaciones son muy diversos (distancia inversa a una potencia, mínima curvatura, *kriging*, vecino natural, etc.), en *Surfer* el método que normalmente arroja mejores resultados para la interpolación

con fines de interpretación de la distribución geoquímica de una variable es el método de *kriging*, el cual es de los más flexibles, por default trabaja con variogramas lineales. Un semivariograma, conocido también como variograma, es la herramienta central de la geoestadística. Dada una variable regionalizada $Z(x)$ que cumpla una hipótesis intrínseca, entonces existe una función semivarianza. El semivariograma es una función que relaciona la semivarianza con un vector h , el cual denota la separación en distancia y dirección de cualquier par de valores $Z(x)$ y $Z(x+h)$, (Díaz-Viera, 2002).

Método de interpolación: *kriging*

El *kriging* es una técnica de valoración que proporciona la mejor estimación lineal imparcial de cada parámetro, y proporciona un error de estimación conocido como varianza de *kriging*, el cual depende del modelo de semivariograma obtenido y de las localizaciones de datos originales. El método de *kriging* ordinario consiste en interpolar espacialmente el valor desconocido de un parámetro en un punto mediante una combinación lineal de sus “ n ” vecinos más cercanos (Hergt, 2009).

Planteamiento del *kriging*

La información que se recibe por el muestreo debe de estar ordenada y regularizada con la localización del punto, en este caso las coordenadas. El *kriging* consiste en encontrar la mejor estimación posible del valor de interés en esta zona, teniendo en cuenta la información disponible. Se efectúa una ponderación, es decir, atribuye un peso a cada valor observado mediante un cálculo que minimice la varianza de estimación resultante, pero con la consideración de las características geométricas del problema (Matheron, 1970). La minimización de la varianza de estimación garantiza el uso óptimo de la información disponible.

El algoritmo del *kriging* incorpora 4 etapas esenciales:

- Al calcular los valores de interpolación, el algoritmo considera el espaciamiento entre punto, interpolando y localizando los datos.
- Al calcular los valores de interpolación, el algoritmo considera la longitud de la escala inherente de los datos.
- Al calcular los valores de interpolación, el algoritmo considera el grado de fiabilidad inherente a los datos. Si la medición de los datos es muy precisa y exacta, la superficie interpolada pasa a través de todos y cada uno de los valores observados. Si la medida de los datos es dudosa, la superficie de interpolación no puede pasar por este valor; todo ello hace un ciclo repetitivo.
- Los fenómenos naturales son creados por procesos físicos y a menudo ellos crean orientaciones preferentes. En *Surfer* al calcular los pesos de interpolación el algoritmo incorpora la anisotropía natural, anisotropía es una propiedad natural de la materia, según la cual, determinada propiedad física como elasticidad, temperatura, conductividad, etc., varían según la dirección en que son examinadas (*Golden Software, 2002*).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se procedió a analizar los datos correspondientes, y tomando como referencia las concentraciones promedio en corteza de los elementos y cotejándola con los valores reales del muestreo, se elaboró la tabla 6, en la que se resumen los elementos que mostraron contenido (en ppm) por encima de la concentración normal de corteza. Como se puede observar, entre los valores de elementos que se encuentran por encima del contenido normal, encontramos cuatro elementos pertenecientes al grupo de los lantánidos (tierras raras) Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr) y Samario (Sm).

Tabla 6. Elementos con las concentraciones más relevantes y valores promedio de corteza (valores de Rose et al., 1979 y USGS).

Elemento	Concentración promedio corteza	Contenido promedio de muestreo geoquímico
Ti	4400	5500
Ni	75	226
Zn	80	105
Ba	580	1268
La	39	60
Ce	66	131
Pr	9	15
Sm	7	13

Para una mejor visualización de la información, se configuraron los *grids* de cada uno de ellos, los cuales se encuentran en las Figuras 14, 15 y 16, en donde en línea de color blanco se marca el límite del contenido promedio de corteza (Rose et al, 1979).

En la Figura 14, la configuración del Titanio (Ti) es la que tiene valores más marcados, es curioso el observar que la distribución de este elemento presenta una relación inversa en cuanto a una de las anomalías del Zinc, pues mientras que la anomalía del Zinc se muestra alargada en una dirección norte-sur y las dimensiones aproximadas de su eje más largo es de 1000 metros por 500 metros de ancho (y es en ésta anomalía donde se concentran los valores más significativos), la anomalía de Ti, justamente en esta área es donde se localizan los valores más bajos y el resto del área es donde están los valores por encima del porcentaje de corteza. En cuanto a la segunda anomalía del Zinc, se localiza hacia la parte media del área, y comparte su distribución con los valores del Níquel.

En cuanto a la configuración de los valores del Bario, muestran una amplia distribución en la zona, concentrándose los valores hacia el noreste del área. Los valores medios para estos elementos son, Titanio 5600 ppm, Níquel 226.1 ppm, Zinc 105.71 y Bario 1268.6 ppm.

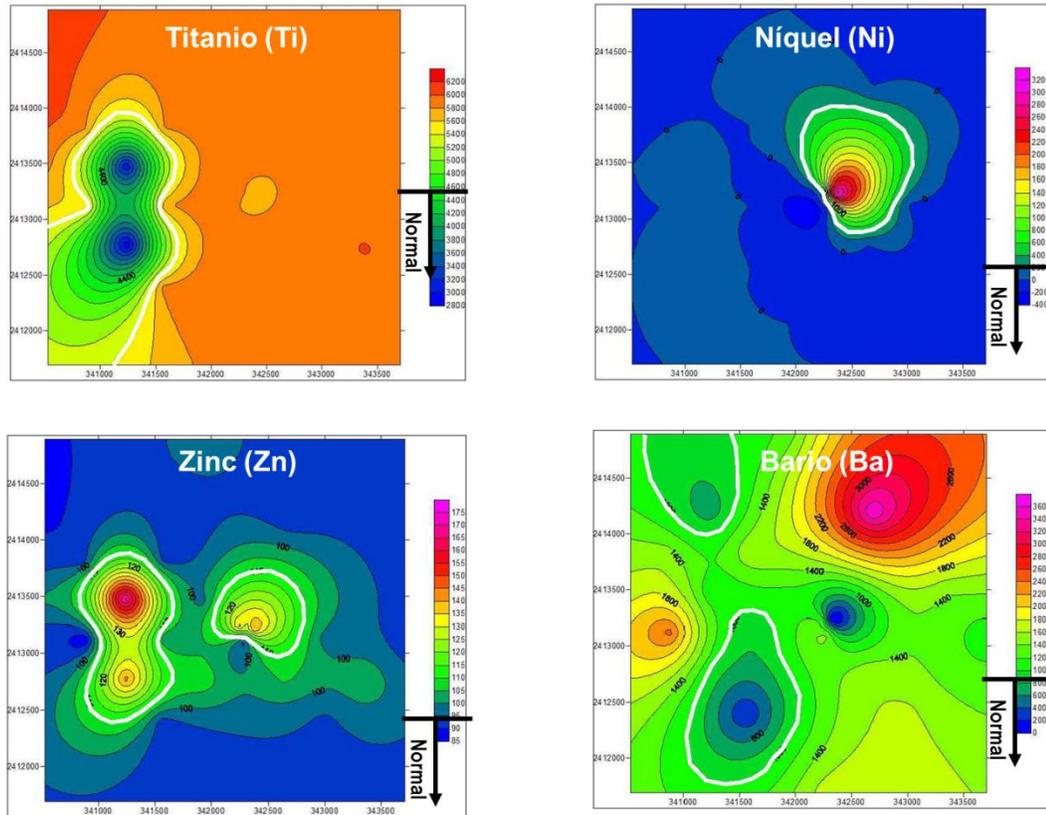


Figura 14. Concentraciones por encima de valor normal de corteza de Titanio (Ti), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Bario (Ba) en el área de Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de la concentración anómala.

Los valores de los elementos de las tierras raras, Figura 15, muestran un patrón de distribución muy similar, siendo los valores más bajos los ubicados hacia la parte central del área de estudio y hacia las periferias los valores más realzados, los valores promedio son, para el Lantano 60.9 ppm, Cerio 131.9 ppm, Praseodimio 15.6 ppm y Samario 13.3 ppm.

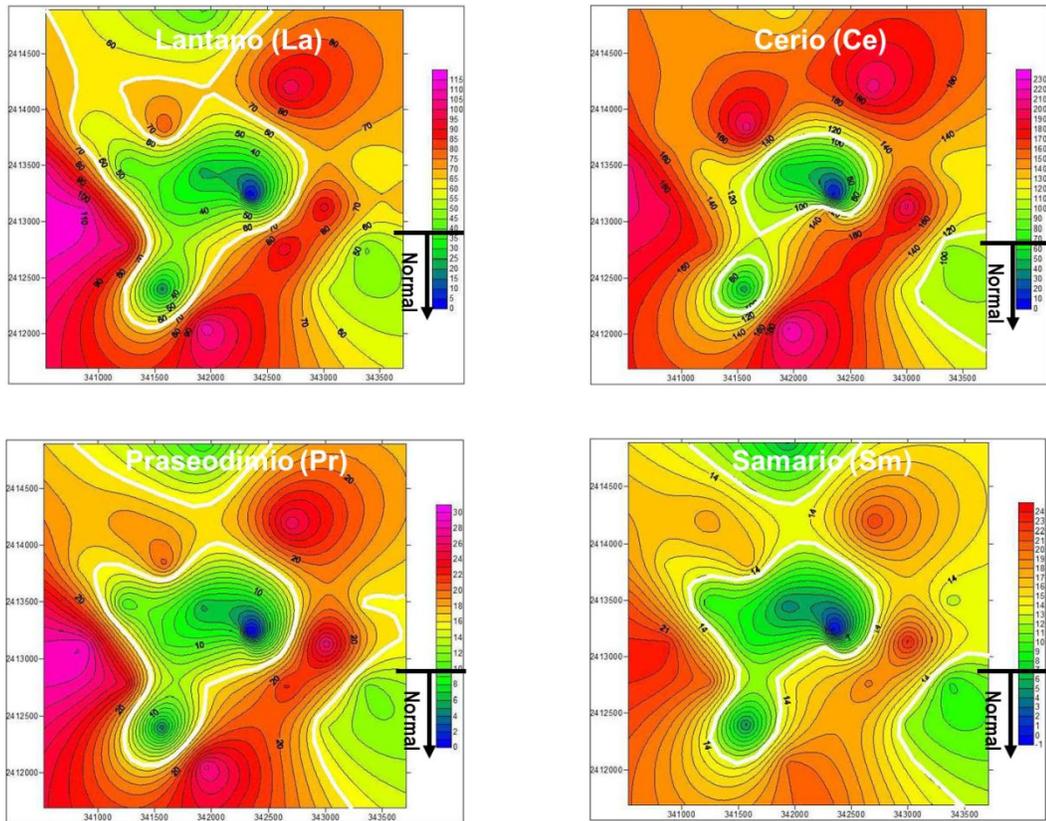


Figura 15. Concentraciones por encima de valor normal de corteza de Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr) y Samario (Sm) en el área de Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de la concentración anómala.

En lo que atañe a los valores de elementos radioactivos, como el Uranio y el Torio, los valores reportados en las muestras, apenas sobrepasan las concentraciones normales en corteza, siendo la concentración promedio del lote de muestreo para el Uranio de 4.7 ppm y para el Torio de 18 ppm (valores promedio en corteza U = 2.5 ppm y Th = 10 ppm). Las configuraciones de los valores se distribuyen, para ambos casos, al sureste y suroeste del área, como se ve en las Figuras 16.

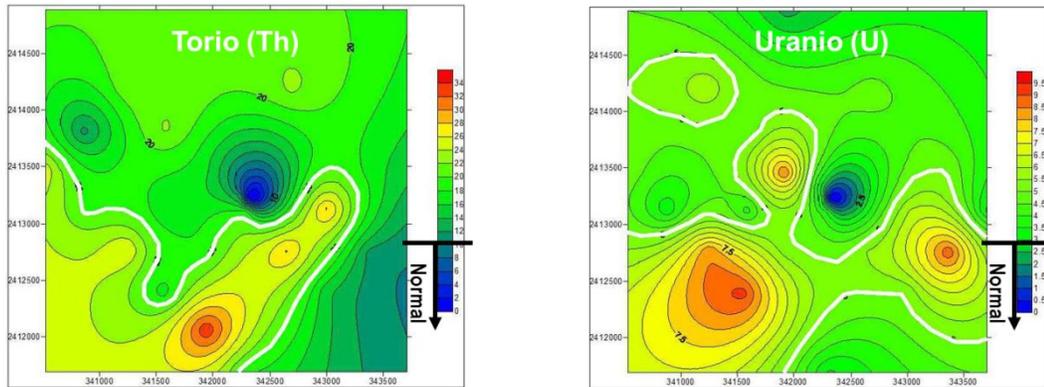


Figura 16. Concentraciones por encima de valor normal de corteza de Torio (Th) y Uranio (U) en el área de Palo Verde. Las líneas en color blanco muestran el contorno de la concentración anómala.

El U y el Th generalmente se encuentran con una asociación estrecha con los lantánidos, para este caso, el Th es el que tiene un poco más de presencia con respecto al U, y por ende relación con las tierras raras del área, esto puede deberse a la característica de inmovilidad del Th (lo que hace que generalmente se encuentre cerca de la fuente), por el contrario el U es un poco más móvil (Rose *et al.*, 1979).

Grupo de las tierras raras

Además de examinar las correlaciones de los resultados del análisis de los 48 elementos traza y las configuraciones de algunos de ellos, se analizaron por separado el grupo de los elementos de las tierras raras. Como ya se mencionó con anterioridad, con la finalidad de darle una mejor interpretación a éste grupo de datos (grupo de los lantánidos).

Los valores de las tierras raras se normalizan a una concentración estándar, con el fin de eliminar el patrón de zig-zag, para este caso se normalizó con los valores de condrita de Sun y McDonough (1989), así mismo las muestras fueron separadas por litología como se muestra en la Figura 17, a) Intrusivo Palo Verde al cual corresponden 15 muestras, manifiestan un patrón normal de distribución de tierras raras solo la muestra SJ1706 sale del patrón de distribución; b) Domo Riolítico, se

compone de 5 muestras, del mismo modo que las del intrusivo, presentan un patrón normal de distribución de tierras raras, salvo la muestra SJ1708 que exhibe valores más bajos, probablemente por su cercanía a los carbonatos y la consiguiente disminución de los mismos; c) Ignimbrita Santa María, para esta unidad solo se colectaron un par de muestras, siendo la muestra SJ03-1 la que muestra el patrón de distribución normal de tierras raras y en lo que respecta a la SJ1705-1 muestra una disminución en contenido de lantánidos; d) Carbonatos, la muestra SJ04 es la que, de este grupo, tiene el contenido más alto, sin llegar a ser significativo ni siquiera para una distribución normal de lantánidos (tendencia casi plana), en lo que respecta a las dos muestras restantes, sus contenidos son muy bajos, por lo que se considera que esta unidad está empobrecida en elementos del grupo de las tierras raras (contenido casi nulo).

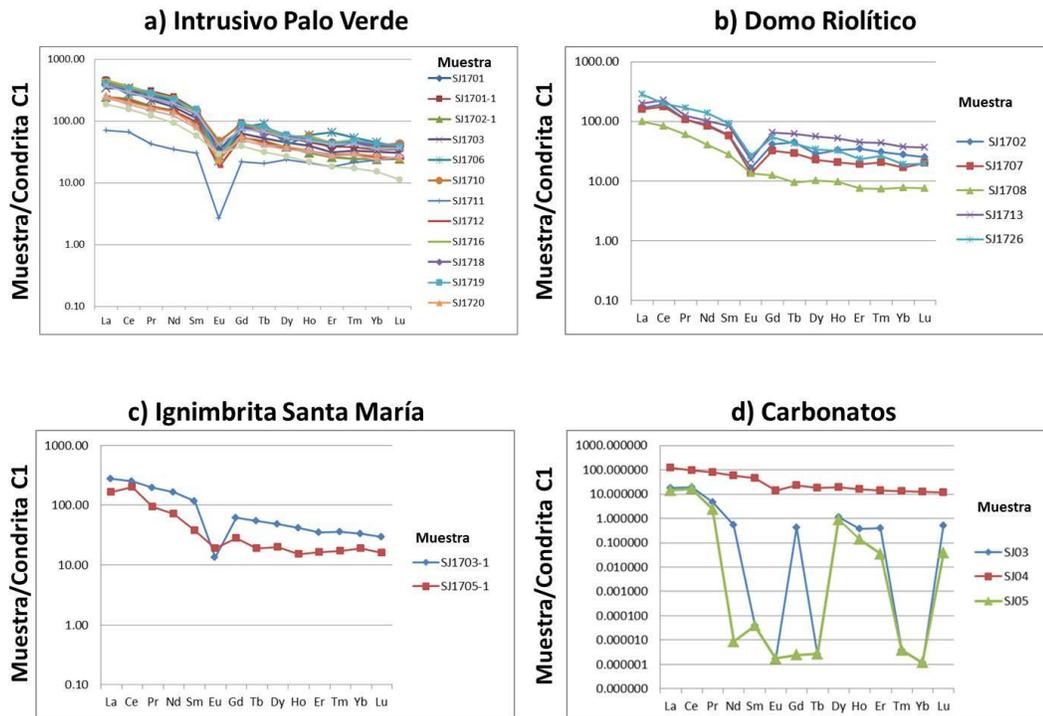


Figura 17. Gráfica de valores de tierras raras normalizadas y separadas de acuerdo a litología del área de Palo Verde.

Las concentraciones que son un poco más elevadas en la relación a la concentración de tierras raras, corresponden a las tomadas en el Intrusivo, en cuanto a los valores de las muestras de los domos, en general, muestran una tendencia normal, pues los domos generalmente se encuentran enriquecidos con elementos litófilos (grupo en el cual se encuentran las tierras raras), en los carbonatos por otro lado, muestran las concentraciones más bajas en relación a las tierras raras lo que indica que no hubo mucha movilización que permitiera la concentración de los elementos en esta unidad además por ende no correspondería a una carbonatita como se había mencionado por García-Gutiérrez (1978), en cuanto a la ignimbrita, presenta valores más elevados que los carbonatos, muy probablemente debido a que esta unidad se presenta intrusionada por la unidad Palo Verde.

4. METODO MAGNETICO

La Geofísica se fundamenta en la localización de anomalías geofísicas a través de mediciones aéreas o terrestres continuas o discontinuas. Estas anomalías se definen como contrastes en la propiedad física que se esté estudiando y que son generadas por variaciones en las estructuras o litologías. Estos contrastes pueden ser en la resistividad eléctrica (métodos eléctricos), en la densidad (método gravimétrico) en las velocidades (método sísmico), en la susceptibilidad magnética (método magnético) y en la radiación (método radiométrico).

El método magnético, como todos los métodos geofísicos, es un método indirecto, el cual cabe mencionar que es de las metodologías geofísicas más antiguas. Probablemente inicia hace aproximadamente 2500 años cuando los griegos observaron que algunas rocas oscuras tenían una extraña propiedad, los objetos hechos de hierro se adherían a ella. Una aplicación realmente práctica de las rocas magnéticas se descubrió hace 1500 años por los chinos quienes observaron que un pedazo de roca suspendido podía girar horizontalmente de manera libre y siempre llegar al reposo en la misma posición, de este modo se inventó el compás magnético o brújula (Telford *et al.*, 1990).

El principio de éste método es medir la variación del campo magnético terrestre y en base a estas mediciones deducir la geología del subsuelo. Es importante recordar que la Tierra se comporta como un imán gigante y como todo imán, presenta líneas de fuerza magnética, las cuales salen desde el polo norte magnético y entran al polo sur magnético, como consecuencia, cualquier punto en la corteza está afectado por un campo magnético.

Un porcentaje considerable del campo geomagnético es proveniente del núcleo de la Tierra (~ 90%), la distribución de los materiales en la corteza y manto superior también producen campos importantes, los cuales

pueden ser medibles en la superficie, para poder delinear éstas anomalías, es necesario considerar varios puntos, pues pueden existir fuentes de campo magnético artificiales (líneas de alto voltaje, mallas metálicas, etc.), también es necesario depurar las respuestas generadas por el núcleo así como también de aportaciones externas (como las tormentas solares, fuentes antropogénicas, etc.).

4.1. Fundamentos

Campo Geomagnético

La Tierra hace el símil a un gran imán alineado con su propio eje, el cual produce un campo magnético. Debido a ello, el campo magnético de la Tierra en cualquier punto exhibe líneas de campo o líneas de flujo (Figura 18), las cuales entran por el polo norte magnético y convergen en el polo sur magnético (poseen una magnitud y dirección). Las líneas de fuerza del campo magnético es vertical a los polos y horizontal en el ecuador magnético y su intensidad está en función de las líneas de flujo.

A la fecha, aun no se establece con claridad el origen del campo magnético, pero la teoría más aceptada es la asociación que tiene con el movimiento de corrientes eléctricas producidas por el acoplamiento del efecto convectivo y la rotación del núcleo exterior líquido.

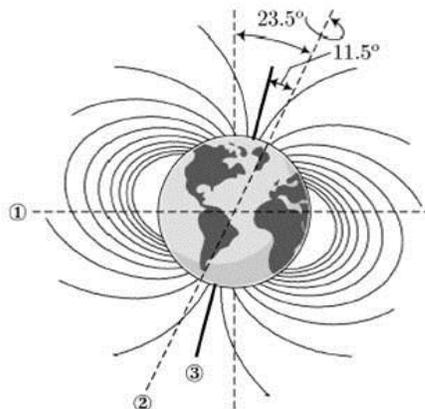


Figura 18. Campo Geomagnético, 1: Plano de la órbita de la Tierra, 2: Eje de rotación, 3: Eje magnético. Modificado de Calcina, 2009.

Elementos del Campo Geomagnético

La intensidad del campo magnético (F) es representada generalmente de dos maneras (Figura 16):

- 1) Componentes XYZ: Tres componentes ortogonales entre sí, siendo X y Y componentes horizontales que apuntan hacia el Norte y Este respectivamente. Z es la componente que apunta hacia el centro de la Tierra.
- 2) Componentes HDI: H es la magnitud de la componente horizontal que es considerada positiva cualquiera que sea su dirección; D es la declinación magnética: ángulo que se mide desde la componente X hacia H ; e I es el ángulo formado entre la intensidad total y la componente horizontal (Calcina, 2009).

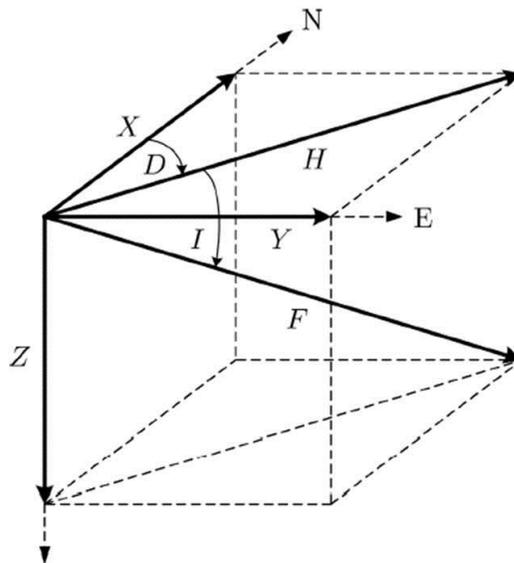


Figura 19. Elementos del Campo Geomagnético.

El campo magnético terrestre se divide en dos campos principales:

1.- Campo Interno: Es preponderante, ya que equivale aproximadamente al 97% del campo magnético total, dicho campo proviene del interior de la Tierra. Teóricamente este campo puede representarse como el campo

magnético producido por una serie de dipolos magnéticos con diferentes orientaciones situados en el centro de la Tierra.

Este campo a su vez se divide en:

- a) Campo geomagnético: que representa un momento magnético tan grande que no se puede justificar por los elementos ferromagnesianos de la corteza, pues los elementos ferromagnéticos del núcleo están a una temperatura superior a la de Curie y han perdido su carácter de ferromagnéticos.
- b) Campo cortical: Este se da debido a los elementos de la corteza y es el que se analiza en la Geofísica, pues las anomalías que aquí se presentan, al pasar de un punto a otro, son las que nos permiten conocer la desigual distribución de los materiales sobre la corteza terrestre.

2.- Campo magnético externo: Es producido por corrientes inducidas en la ionosfera, al desplazarse esta con respecto al campo terrestre. El desplazamiento de la atmósfera, se debe principalmente al movimiento ascensional de convección, por calentamiento diurno solar y a las mareas atmosféricas que por tanto dependen de la posición de la luna y del sol. Debido a que la emisión solar no es homogénea y en ciertas ocasiones se produce con mayor intensidad, se dan las tormentas magnéticas, que son las perturbaciones irregulares en el campo magnético terrestre (Cantos, 1974).

Variaciones del Campo Geomagnético

El campo magnético terrestre es dinámico y por ello, sufre algunas fluctuaciones debido a distintos elementos internos y externos.

En lo que respecta a las variaciones de origen externo, éstas son el producto de la interacción del campo magnético global y el campo magnético asociado con el viento solar.

Existen variaciones que cobran mayor relevancia a la hora de hacer los levantamientos magnéticos, como son:

- a) Variaciones diurnas: Es de las más importantes, debe su origen a la acción del viento solar sobre las corrientes ionosféricas y la latitud geográfica, provoca el achatamiento del campo magnético terrestre hacia la parte de la Tierra que está expuesta al sol, esta variación es de un aproximado de 60 nT en un lapso de 24 horas (Telford *et al.*, 1990).
- b) La interacción del viento solar con el campo magnético terrestre causa la formación de un anillo de cargas en el ecuador lo cual produce variaciones de 10 nT aproximadamente en las latitudes cercanas a él.
- c) Las transiciones del campo magnético terrestre en los polos, lo cual puede durar algunas horas, por la interacción de partículas cargadas y las líneas de flujo del campo que concurren durante las tormentas magnéticas, aproximadamente 20 nT (Telford *et al.*, 1990).

Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética es el primer parámetro a considerar, ya que la susceptibilidad magnética (k) es la capacidad de una roca a adquirir magnetización en respuesta a un campo magnético. La susceptibilidad suele ser muy pequeña para la mayoría de las rocas e inclusive negativa.

En la tabla 7 se pueden apreciar susceptibilidades magnéticas para algunos tipos de rocas.

Tabla 7. Susceptibilidad magnética de las rocas más comunes. Modificado de Telford, et al., 1990).

Tipo de roca	Susceptibilidad X 10 ⁻³	
	Rango	Promedio
<i>Sedimentaria</i>		
Dolomita	0.0 – 0.9	0.1
Caliza	0.0 – 3.0	0.3
Arenisca	0.0 – 20.0	0.4
Lutita	0.01 – 15.0	0.9
<i>Metamórfica</i>		
Esquisto	0.3 – 3	1.4
Filita	-	1.5
Gneis	0.1 – 25	
Cuarcita	-	4
Serpentina	3.0 – 17	
<i>Ígnea</i>		
Granito	0.0 – 50	2.5
Riolita	0.2 – 35	
Gabro	0.0 – 90	70
Basalto	0.2 - 175	70
Diorita	0.6 - 120	85
Andesita	-	120

Las rocas tienen minerales magnéticos con 2 clases de magnetización:

- Inducida: es el magnetismo que adquieren los cuerpos cuando son colocados en un campo magnético.
- Remanente: es la magnetización permanente de una roca y esta no depende de algún campo externo.

Los materiales se pueden agrupar en 3 categorías (Figura 20), en relación a su comportamiento al ser sometidas a un campo magnético externo (Telford et al., 1990): diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.

La k es extremadamente importante en la interpretación magnética para prospección así como para estudios tectónico-estructurales.

Diamagnetismo: Un material pertenece a este grupo cuando su k es negativa. A esta categoría pertenecen los minerales más comunes (en particular calcita y dolomita, cuarzo y feldespato, así como algunos silicatos). El resultado de éste diamagnetismo es que el campo magnético es menor en el interior del cuerpo y presenta una susceptibilidad < 0 . La mayor parte de los compuestos inorgánicos y prácticamente todos los compuestos orgánicos son diamagnéticos. Resulta que de hecho, el diamagnetismo es una propiedad de todo átomo y molécula. Cuando se observa un comportamiento contrario, es debido a que el diamagnetismo es superado por un efecto distinto y más intenso el cual conduce a la atracción (Telford *et al.*, 1990).

Paramagnetismo: Teóricamente se define que los materiales que no son diamagnéticos, son paramagnéticos. En este grupo, cada átomo o molécula tiene un momento magnético neto en un campo externo nulo.

Ferromagnetismo: Los materiales magnéticos no son muy numerosos, son materiales en los que la interacción entre átomos y grupos de átomos es tan fuerte que existe un alineamiento de momentos dentro de una región muy grande del material, este grupo se subdivide en:

- Ferrimagnéticos.- En este tipo de materiales los dominios magnéticos están subdivididos en regiones que se encuentran en oposición uno con otro, sin embargo, su momento magnético es diferente de 0, cuando $H = 0$.
- Antiferromagnéticos.- En éste grupo la magnetización se encuentra balanceada, dicho de otra manera, los momentos magnéticos de la roca y/o material, se encuentran ordenados por pares en sentido inverso, por ello no existe una magnetización externa por lo tanto no hay magnetización espontánea (Telford *et al.*, 1990).

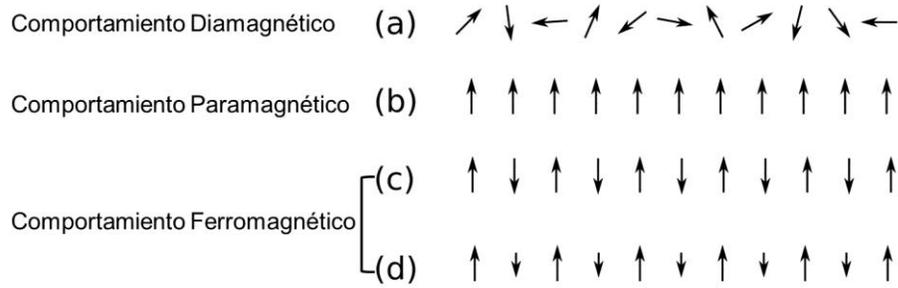


Figura 20. Comportamientos magnéticos. a) diamagnético, b) paramagnético, c) ferrimagnético y d) antiferromagnético.

La intensidad magnética puede ser medida en Gauss, pero por lo general son reportados en nT.

1 tesla = 10⁴ Gauss

1 nT = 10⁻⁹ teslas

= 1 Gamma

La intensidad del CMT varía entre 25,000 nT en el Ecuador y 60,000 nT en los Polos (0.25 – 0.60 Gauss respectivamente).

El Campo Geomagnético Internacional de Referencia

El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF por sus siglas en inglés) es un modelo global del campo magnético principal y su variación secular fundamentada en la ecuación de Laplace con el método de armónicos esféricos y dentro de sus términos contempla la variación que sufre el campo magnético a lo largo del tiempo (variación secular). Para su elaboración se requieren diversos juegos de información los cuales permiten observar características del campo en la superficie

(NOAA, 2014). El IGRF se resta de los valores de campo para destacar las anomalías magnéticas en un punto dado.

El modelo de IGRF fue publicado por IAGA (Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía), esta asociación colecta datos en un periodo de 5 años de diferentes observatorios geomagnéticos y con ellos desarrolla modelos matemáticos para este fin.

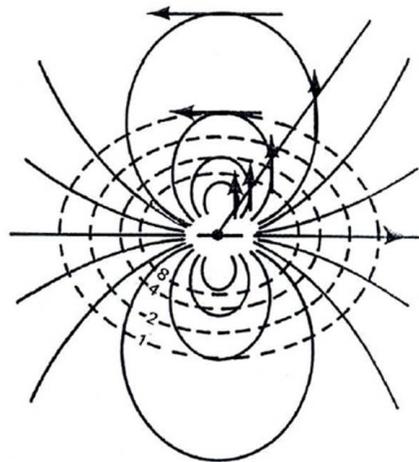
Anomalía magnética

Una anomalía magnética representa una perturbación local del campo magnético de la Tierra, surge de un cambio local en la magnetización, llamado también contraste de magnetización. La naturaleza asimétrica de las anomalías magnéticas, es una consecuencia de las direcciones de las líneas de campo del imán creado localmente y de las características del campo magnético de la Tierra, generalmente inclinado respecto de la superficie terrestre. Las anomalías magnéticas, ya sean por magnetización inducida o remanente, son consecuencia de arreglos de dipolos y monopolos, líneas de dipolos y monopolos y distribuciones planas de esos polos. Por lo tanto es importante comprender la naturaleza de los campos dipolares y monopolares, para demostrar que la suma de tales formas elementales explica la mayoría de las anomalías complejas y facilita la interpretación.

Dipolos y Monopolos elementales

Puesto que las anomalías son explicadas como arreglos de varios dipolos y monopolos, es importante analizar la geometría y características de su intensidad. Un dipolo magnético produce un campo de líneas de flujo imaginarias (Figura 21). La intensidad de campo, que es proporcional a la densidad de líneas de flujo es mostrada como líneas de igual intensidad para expresar esta relación. En la Figura 21 se observa que:

- La intensidad del dipolo es el doble sobre su eje que a 90° del mismo y a la misma distancia. Esto explica porque el campo magnético terrestre es de unos 25,000 nT en el Ecuador y unos 60,000 nT en los polos magnéticos.
- La dirección del campo a cada lado del dipolo es paralela al mismo pero de sentido opuesto.
- Las direcciones de las tangentes a las líneas de campo en una radial desde el centro del dipolo son paralelas.



**Figura 21. Líneas de flujo (---) y de igual intensidad de campo (- - -) de un dipolo.
Modificado de Breiner, 1973.**

Un monopolo tiene líneas de campo que apuntan radialmente en sentido positivo o negativo desde el polo. La intensidad es constante a una misma distancia y en cualquier dirección desde el polo. En realidad no existe monopolos magnéticos, si no que se trata de dipolos cuyos extremos están muy distantes. Pero para fines prácticos, los monopolos existen en función de la distancia de la fuente (Breiner, 1973).

Algoritmo

Un algoritmo es una lista bien definida de procesos matemáticos ordenados y finitos de operaciones que permite encontrar una solución a un problema.

Dominio Magnético

Se definen como zonas dentro de la configuración de los mapas de anomalías las cuales se identifican por presentar un comportamiento similar en cuanto a sus características de longitud de onda y amplitud (López-Loera *et al.*, 2011).

Spin

El electrón posee un momento cinético que no tiene nada que ver con su movimiento orbital. Se comporta en cierta manera como si girase continuamente en torno a su propio eje, esta propiedad se llama “*spin*”. El spin del electrón es un fenómeno cuántico. Su importancia reside en que tiene asociado a este momento cinético intrínseco o formando parte de su estructura, un momento magnético, así mismo de modulo invariable. Este momento magnético está dirigido en el sentido previsto, al imaginar al electrón como una bola de carga negativa girando en torno a su eje. Es decir el vector momento magnético es antiparalelo al vector momento cinético de spin, sin embargo la relación del momento magnético al momento cinético vale el doble que en el caso del movimiento orbital.

En un átomo sólo los electrones más internos generalmente están apareados y si un electrón externo no lo está, su spin a menudo se aparea con la de un vecino cuando el átomo forma parte de un compuesto o un cristal. Sin embargo ciertos átomos contienen electrones con spins no apareados que permanecen relativamente libres para orientarse en un campo. A este grupo de elementos pertenecen el grupo de las tierras raras (Purcell, 1988).

4.2. Procesamiento de la información

Los algoritmos, que ya se mencionó antes, permiten realizar una selección de frecuencias que se correlacionan con la señal-ruido, de tal manera que su correcta aplicación permite resaltar u oscurecer rasgos de interés.

Partiendo de este punto, los algoritmos se emplean para la obtención de los resultados que permitan interpretar y definir las áreas del estudio aeromagnético (sea aéreo o terrestre), la aplicación de los diversos algoritmos se hace con la ayuda de *software* especializados, en este caso Oasis Montaje, el cual mediante la ayuda de la extensión *Magmap* (filtro bidimensional que funciona bajo los preceptos de la transformada rápida de Fourier) ayuda a hacer las transformaciones necesarias de los datos crudos tomados en campo, para posteriormente ser interpretados.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) tiene gran importancia como una herramienta geofísica cuando se trabaja con campos de potencia (magnetometría y gravimetría). Los filtros del dominio de Fourier, se describen a continuación:

Reducción al Polo (RP)

El proceso de Reducción al Polo, permite ubicar las anomalías sobre la o las fuentes causativas. Cuando el campo magnético de la Tierra está inclinado, las anomalías magnéticas debido a inducción, tienen formas asimétricas en relación con las fuentes, pero cuando el campo inducido es vertical, las anomalías están directamente sobre sus fuentes (Baranov y Naudy, 1964). Lo anterior, matemáticamente se expresa como:

$$L(\theta) = 1 / [\text{sen}(I_a) + i \cos(I) * \cos(D - \theta)]^2 \text{ si } (|I_a| < |I|) = I$$

Dónde:

I = Inclinación geomagnética.

I_a = Inclinación de la amplitud de corrección.

D = Declinación geomagnética

Nota: la inclinación de la amplitud de corrección por default $\pm 20^\circ$ (Geosoft, 2007).

Señal Analítica (SA)

Otro método importante, además de la Reducción al Polo, es la Señal Analítica (SA) la cual está definida como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas del campo magnético en X, Y y Z, dicho de otra manera:

$$\text{Señal Analítica} = \sqrt{(dx^* dx) + (dy^* dy) + (dz^* dz)}$$

La Señal Analítica se emplea para localizar bordes o cuerpos generadores de fuentes magnéticas, en particular cuando la remanencia y/o baja latitud magnética complica la interpretación (Nabighian, 1972).

Continuaciones de campo (CA)

Es considerado como una especie de filtro limpio, pues prácticamente no produce efectos secundarios de distorsión como otros filtros, el empleo de este filtro transforma el campo potencial medido en una superficie, al campo que se medirá en otra superficie más alejada de la fuente (Henderson, 1970), en otras palabras, calcula los valores de campo magnético en un plano situado a diferentes alturas que el plano de observación original. Se aplica para eliminar ruidos superficiales, dejando a la vista los rasgos más regionales (como fallas, fracturas y contactos). Matemáticamente se expresa como:

$$L(r) = e^{-hr}$$

Dónde:

e = Número de Euler

h = distancia en unidades terrestres (metros, pies, etc.).

r = número de ondas

Derivadas en dirección de Z (Dz)

La derivada de una función, en términos generales, mide el coeficiente de variación en una función. Para fines geofísicos, la primera derivada vertical, calcula la tasa de cambio del campo magnético en la vertical sobre el mismo punto. Tiene el efecto de nitidez de las anomalías o que permite una mejor ubicación espacial del origen de ejes y límites de las anomalías.

Existen diferentes litoestructuras que al estar en contacto sus anomalías magnéticas se sobre ponen causando una anomalía compuesta que es muy difícil de separar a simple vista en sus diferentes componentes, para ello se aplican los filtros de separación de las derivadas verticales (Henderson y Ziets, 1949). Este filtro, matemáticamente se describe como:

$$L(r) = r^n$$

Dónde:

n = orden de diferenciación

r = número de onda

4.3. Análisis e Interpretación de resultados

4.3.1. Magnetometría aérea

La Aeromagnetometría tiene sus inicios en la segunda guerra mundial, con el desarrollo de los primeros magnetómetros de “*Flux Gate*” con el fin de detectar submarinos en medio del mar. El empleo de la magnetometría aérea nos permite cubrir grandes áreas de terreno, lo cual favorece a la hora de hacer interpretaciones de grandes extensiones.

De manera general la magnetometría aérea, se utiliza como un método primario a la hora de realizar trabajos de exploración en cualquier estudio geológico, el empleo de esta metodología permite identificar fácilmente las fuentes de anomalías magnéticas, que en ocasiones dan paso a mineralización económica, así mismo permite localizar extensiones de falla y/o fracturas (López-Loera, 2002).

Los levantamientos aeromagnéticos consisten en instalar un magnetómetro a bordo de un helicóptero o una avioneta y realizar perfiles cubriendo el área de interés, a lo largo de dichos perfiles se mide y registra el campo magnético. Una vez capturadas las líneas de vuelo, se corrigen mediante secciones de líneas transversales denominadas como “*tie line*”. Con la información corregida se genera una matriz de datos que permite procesarlos por medio de algoritmos matemáticos (reducción al polo, primera y segunda derivada, señal analítica, etc.).

Para obtener de una manera rápida y eficaz información regional de la zona de estudio, se tomó en consideración los datos aeromagnéticos del Servicio Geológico Mexicano. El área seleccionada para el análisis regional comprende parte de los estados de San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro, como se puede ver en la Figura 22.

4.3.1.1. Campo Aeromagnético Residual

El Campo Magnético Residual (CMR) se obtiene a partir de los valores del Campo Magnético Total (CMT) menos los valores del IGRF, lo cual suprime la influencia de los efectos regionales que corresponden a las frecuencias altas, quedando de esta manera, las anomalías magnéticas más locales (anomalías asociadas a influencia de la corteza).

En el mapa de la Figura 22, se observa el Campo Aeromagnético Residual, en él se puede ver, un par de direcciones preferentes de anomalías, NW-SE y NE-SW. La intensidad del CMR tiene rangos que van de -294 a 207 nT.

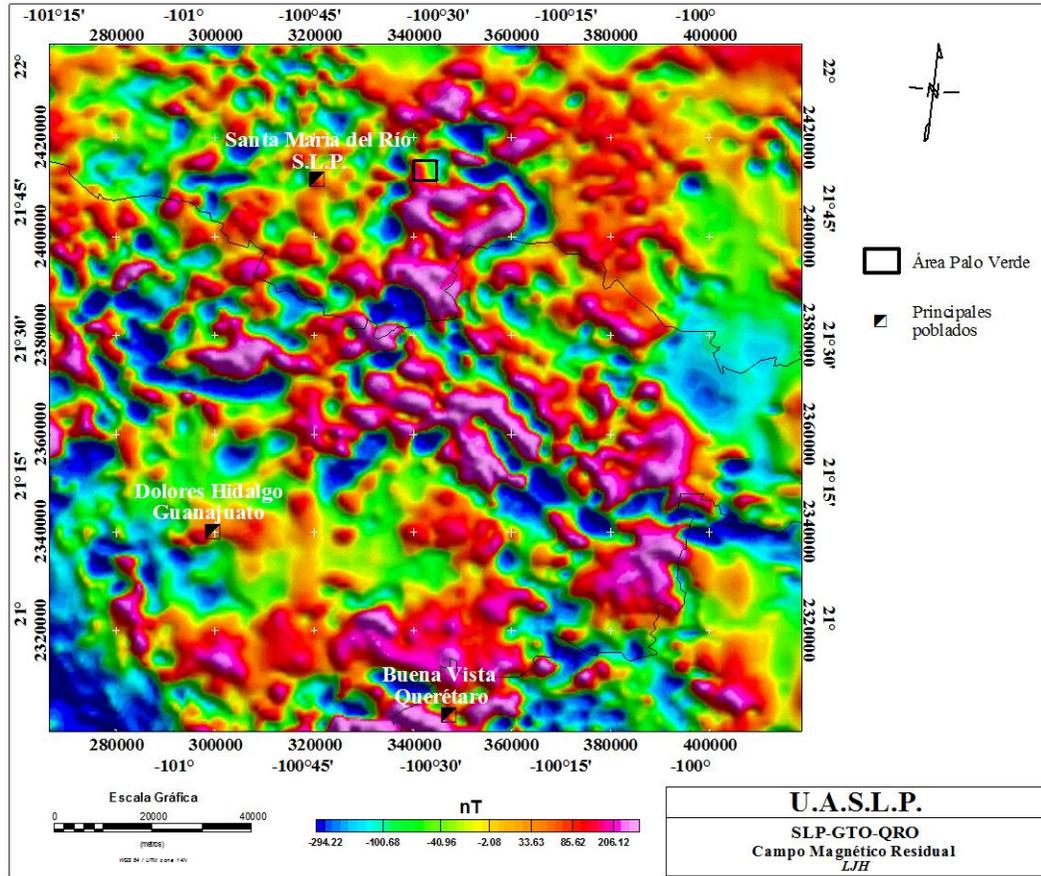


Figura 22. Campo Aeromagnético Residual (San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro).

Para apreciar aún mejor las anomalías de la región, se emplean técnicas de filtrado matemático en el dominio de la frecuencia a los valores numéricos del campo magnético residual, las cuales se describen a continuación.

4.3.1.2. Reducción al Polo

Como se ha mencionado en el apartado de fundamentos, el campo magnético de la Tierra es considerado como un vector, representado por la inclinación, declinación e intensidad de magnetización, la inclinación puede variar de 0° (en el ecuador magnético) y 90° (en los polos magnéticos), por su parte la intensidad de magnetización varía de 25000 nT en el ecuador magnético a 75000 nT en los polos magnéticos (NOOA, 2014).

Una vez aplicado el filtro de la Reducción al Polo a los datos del CMR, se puede ver (Figura 23), que las anomalías sufrieron ligeras modificaciones con respecto a su posición y magnitud en relación al mapa de la Figura 22. A partir de este punto, se analiza la información en términos de dominio (identificando zonas dentro de la configuración magnética que muestran características de amplitud y longitud de onda semejantes). Las intensidades de magnetización de este mapa, muestran rangos de intensidad de magnetización que van de -153 a 30 nT, siendo las más altas las de color magenta y las más bajas en color azul. Teniendo como base este mapa, se puede comenzar a detallar los dominios existentes en el área.

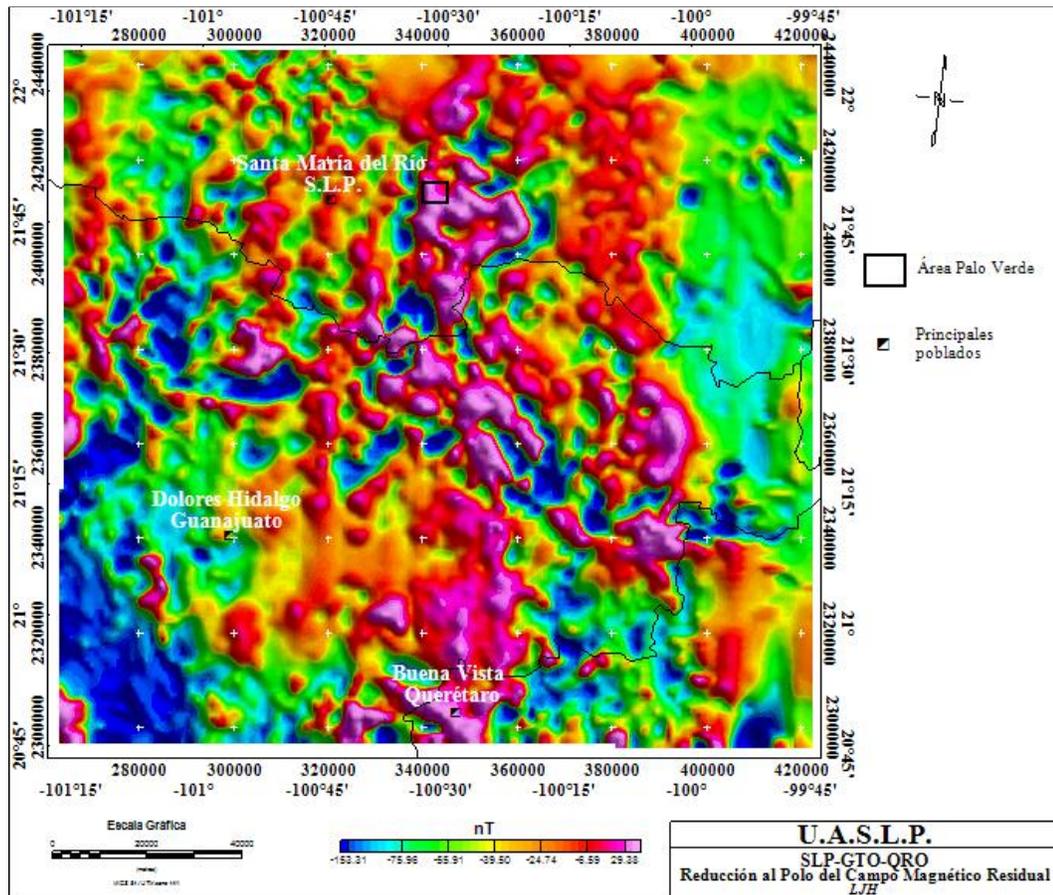


Figura 23. Campo Aeromagnético Reducido al Polo (San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro).

4.3.1.3. Dominios Aeromagnéticos

El análisis de la información reducida al polo, se analiza en términos de dominio (en un dominio, los spins que componen el material están alineados en una misma dirección, dicha dirección es diferente de los dominios vecinos), para de esta manera, identificar las diferentes configuraciones magnéticas de la zona. Un dominio magnético contiene miles de millones de momentos magnéticos elementales (Purcell, 1988). Cada uno de los sectores del área que conforman cada dominio, pueden estar constituidos por más de una unidad geológica o tan solo por una.

En la Figura 24 se aprecian los dominios aeromagnéticos (DAM) definidos en el mapa de la reducción al polo del campo magnético residual, en donde se puede observar no todos están definidos en su totalidad (se encuentran abiertos en algunos de sus flancos), siendo un total de siete los marcados, los cuales se describen a continuación.

Dominio Aeromagnético I (DAM I)

El DAM I, se localiza en la parte central del mapa (comprende parte del estado de San Luis Potosí y Guanajuato), es el mejor definido muestra una alargamiento en dirección NW-SE y NE-SW formando una especie de "T" recostada hacia la izquierda, sus dimensiones son de 107 km de longitud por 37 km en promedio de ancho, se caracteriza por longitudes de onda larga (400 a 1200 m), baja frecuencia y amplitudes que van de -350 a 126 nT. En cuanto a la correlación geológica de este DAM, en base a la carta geológica de la carta F14-7, hacia la parte norte del dominio, se encuentra un intrusivo granítico (denominado como Palo Verde), andesita-dacita, ignimbrita, riolitas, traquita y riodacita, continuando hacia la porción más al sur del dominio la riodacita, algunas porciones cubierta por aluvi3n, basalto, ignimbrita y tobas riol3ticas. Las respuestas magn3ticas m3s altas se localizan en el intrusivo granítico (norte) así como basalto e ignimbritas (la sur), dentro de este dominio se localiza la

zona de Palo Verde. Topográficamente sus elevaciones varían de 1900 (suroeste) hasta 2500 msnm (hacia el norte del DAM) correspondiendo las áreas con mayor elevación a las intensidades de magnetización más altas.

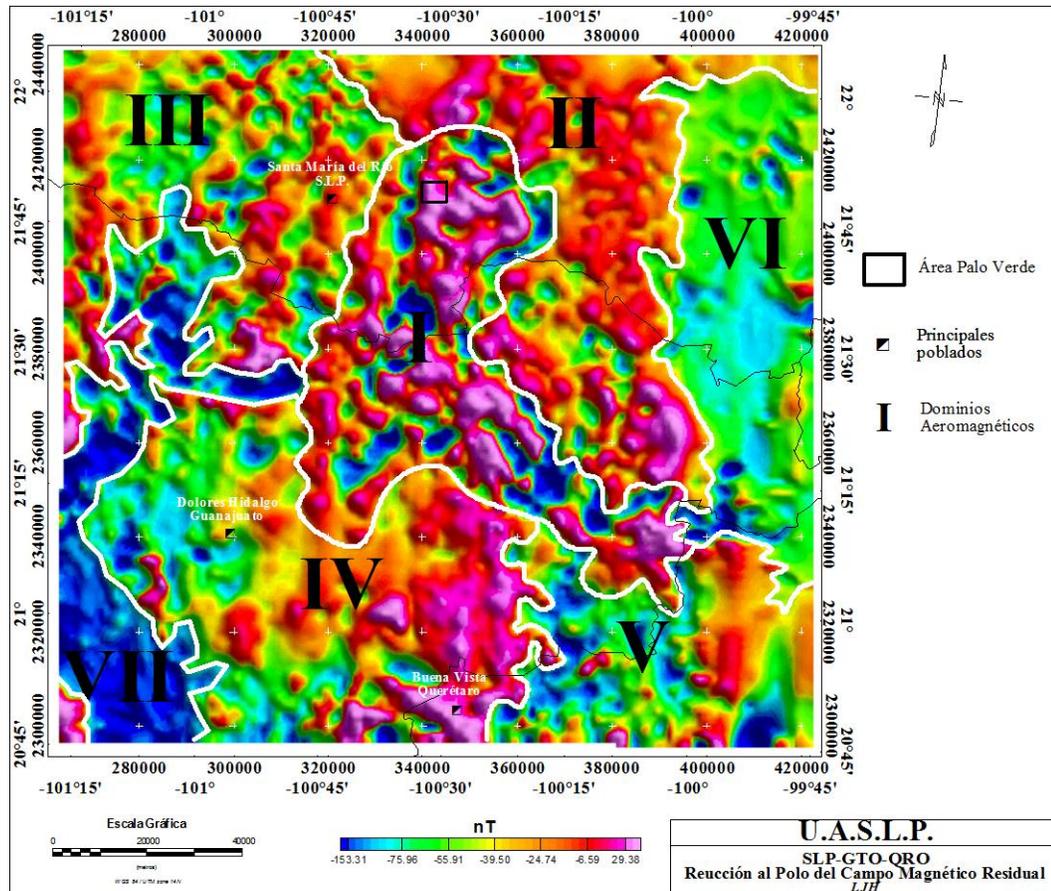


Figura 24. Dominios Aeromagnéticos (DAM)

Dominio Aeromagnético II (DAM II)

El DAM II se encuentra al este del DAM I, de igual forma que el anterior, comprende parte del estado de San Luis Potosí y Guanajuato, hacia la parte norte del dominio se encuentra indefinido, presenta una forma pseudo-alargada en dirección N-S ensanchándose hacia la parte norte, sus dimensiones promedio son 106 km de longitud por 42.5 km de ancho, se identifica por longitudes de onda largas (500 a 1600 m), baja frecuencia y amplitudes que van de -90 a 84 nT, las rocas presentes (de acuerdo a la carta geológica F14-7) son andesita-dacita, riolitas, ignimbrita, granito,

riodacita, calizas y lutitas. Las respuestas magnéticas más altas se localizan hacia la parte austral del dominio, en donde se encuentran calizas y lutitas así como granito. La topografía de este DAM va desde 1000 hasta los 2000 msnm.

Dominio Aeromagnético III (DAM III)

En cuanto al DAM III, se ubica hacia el noroeste del DAM I, la mayor parte del dominio se encuentra dentro del estado de San Luis Potosí y una pequeña parte del dominio en su porción sur corresponde al estado de Guanajuato, este DAM se encuentra abierto en dos flancos, al norte y al oeste, no muestra una forma precisa, las dimensiones son 70 km por 54 km aproximadamente, las características son longitudes de onda larga (400 a 1100 m), baja frecuencia y amplitudes de -125 a 65 nT. En referencia a las rocas de este dominio (carta F14-7) encontramos traquitas, ignimbritas, riolitas, ignimbritas-tobas riolíticas, así como aluvi3n. Las respuestas magnéticas altas corresponden a basaltos y traquitas, en este dominio se localiza el graben de Villa de Reyes. La topografía en general corresponde a elevaciones que varían de 1800 a 2500 msnm.

Dominio Aeromagnético IV (DAM IV)

El dominio aeromagnético IV se sitúa al sur del dominio I, la mayor parte de éste dominio corresponde al estado de Guanajuato y una mínima fracci3n de la parte sur al estado de Quer3taro. El DAM se encuentra indefinido hacia el sur, por tanto no muestra una forma bien definida, la extensi3n del dominio es de 92 por 44 km aproximadamente, se identifica por longitudes de onda larga (500 a 1500 m) baja frecuencia y amplitudes que van de -125 a 65 nT. Las 3reas que presentan respuesta magn3tica m3s baja corresponden a arenisca-toba y aluvi3n en su mayoría, y menor proporci3n volcanosedimentarios, andesitas y riolitas (según cartas F14-7 y F14-10), en contraparte la respuesta alta corresponde a riolitas, tobas riolíticas, basaltos y un poco de aluvi3n. En general la topografía del

dominio es plana, sin cambios tan marcados en las elevaciones, entre 2000 y 2400 msnm.

Dominio Aeromagnético V (DAM V)

Al este del dominio IV se ubica el DAM V, la mayor parte de este dominio se ubica en el estado de Querétaro tan solo una pequeña parte al noroeste al estado de Guanajuato, éste al igual que los dominios anteriores (a excepción del DAM I) se encuentra indefinido en dos flancos, este y sur, las dimensiones de este dominio son 52 por 28 km aproximadamente, se identifica por longitudes de onda larga (600 a 1800 m) baja frecuencia y amplitudes de -125 a 56 nT, las rocas que se encuentran en este dominio son en su mayoría riolitas y en menor proporción basalto (cartas F14-7, F14-8, F14-10 y F14-11). Las elevaciones topográficas van de 2000 a 2700 msnm.

Dominio Aeromagnético VI (DAM VI)

El DAM VI, como se puede observar las intensidades de magnetización son bajas en comparación con los DAM anteriores, se localiza al este del DAM II, comprende parte de los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, hacia la parte este se encuentra indefinido, muestra una forma más o menos alargada de N-S, la extensión del dominio es de 112 km por 30 km, se identifica por longitudes de onda largas (500 a 1400 m), baja frecuencia y amplitudes de -150 a -32 nT, la correlación geológica del dominio (según cartas F14-8 y F14-11) es en su mayoría con aluvión y caliza-lutita, lo cual explica el bajo valor de magnetización, en menor proporción riolita.

Dominio Aeromagnético VII (DAM VII)

El DAM VII por su parte, es el que presenta la forma más irregular, y muestra los valores más bajos de todos los dominios, se localiza al oeste del dominio IV, se encuentra en el estado de Guanajuato, se encuentra indefinido al sur y parcialmente al oeste, las dimensiones aproximadas son

104 km de longitud por 13 km de ancho, se identifica por longitudes de onda que van de 600 a 1100 m, baja frecuencia y amplitudes de -270 a -7 nT, en cuanto a su correlación (cartas F14-7 y F14-10) en su mayoría es aluvión y en menor proporción riolita e ignimbrita. Las elevaciones topográficas del dominio varían de 1800 a 2400 msnm.

4.3.1.4. Dominios Aeromagnéticos en Continuación Ascendente 10 km del Campo Magnético Reducido al Polo

Como parte del interés por delimitar mejor los bordes de las unidades que posiblemente son las generadoras de las respuestas magnéticas, a los datos reducidos al polo se le aplicó el filtro de la continuación ascendente a diferentes alturas, la continuación que proporcionó una visión más clara fue la continuación a 10 kilómetros, el mapa resultante se puede ver en la Figura 25 en la cual se delimitaron nuevamente los DAM, obteniendo ahora, a diferencia del mapa de dominios magnéticos anteriores, solo 3 dominios, los cuales se describen a continuación.

Dominio Aeromagnético I (DAM I)

Más allá de constituir un DAM, se puede apreciar esbozada una estructura regional con una dirección prácticamente N-S. El DAM se localiza hacia la parte central de la zona y comprende los 3 estados (San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro.) aunque no se encuentra bien definido, pues se halla abierto hacia el norte, la morfología es en general alargada en una dirección N-S, es el más interesante por el hecho de que aquí se encuentran los valores más altos de la configuración, los cuales van de -40 a -15 nT, las dimensiones aproximadas son 145.5 kilómetros (en dirección N-S) y 89 kilómetros en dirección E-W. Las anomalías de este dominio presentan un *trend* N-S.

En ocasiones es necesario subdividir los dominios para tener un visión más clara de las características magnéticas del área, en éste caso el DAM

I se han dividido en 4 subdominios (Figura 25), las cuales se describe brevemente a continuación.

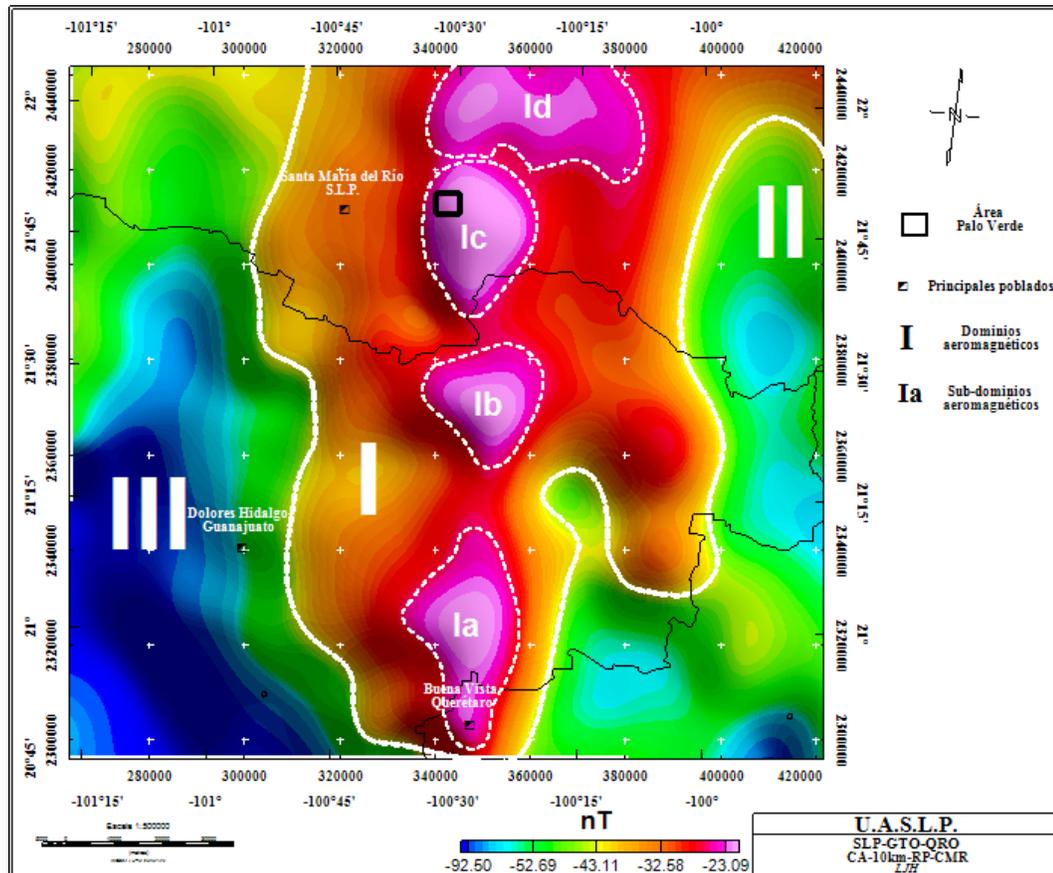


Figura 25. Dominios Aeromagnéticos (DAM) en mapa de continuación ascendente 10 km del campo magnético reducido al polo.

Subdominio Ia

Se localiza hacia la parte sur del área en los límites del estado de Guanajuato y Querétaro, la morfología de este subdominio es de una elipse siendo las dimensiones del eje mayor de 46 kilómetros aproximadamente (en dirección N-S) y el eje menor de 23 kilómetros aproximadamente (en dirección E-W). Geológicamente se encuentra ligado a afloramientos de material volcánico y sedimentario el cual se rodea de afloramientos de caliza-limolita y estas a su vez por riolitas, el resto corresponde a conglomerado.

Subdominio Ib

Al norte del subdominio Ia (a unos 12 kilómetros aproximadamente) se localiza el subdominio Ib (dentro del estado de Guanajuato, cercano a los límites con San Luis Potosí), la morfología de este dominio es semicircular, las medidas aproximadas son 25 por 25 kilómetros en dirección N-S y E-W respectivamente. La correlación geológica de este subdominio corresponde casi en su totalidad a afloramiento de ignimbrita y en pequeñas proporciones algunos afloramientos de basalto y riolita.

Subdominio Ic

Se localiza aproximadamente a 7 kilómetros al norte del subdominio Id, prácticamente todo el dominio se localiza en el estado de S.L.P. solo unas proporciones pequeñas corresponden al estado de Guanajuato, la morfología aproximada es de una elipse alargada en dirección N-S, las dimensiones del eje mayor son 32 kilómetros aproximadamente (norte-sur) y 23 kilómetros del eje menor (este-oeste). Geológicamente este subdominio es el que se correlaciona con el Intrusivo granítico del área, localmente conocido como Intrusivo Palo Verde, en menor proporción ignimbrita.

Subdominio Id

Ubicado en la porción más al norte del área y pegado al subdominio Ic, se ubica el subdominio Id (en el estado de S.L.P.), morfológicamente no presenta una forma definida, pues se halla abierto al norte, sin embargo muestra un alargamiento en dirección E-W, las longitudes son 43 kilómetros en dirección del alargamiento (E-W) y 20 kilómetros en dirección N-S. Geológicamente la correlación es muy diversa en este subdominio, pues se encuentran afloramientos de dacita-andesita, ignimbrita, caliza, riolita (domos) y aluvió.

La correlación geológica del resto del dominio es diversa, pero en su gran mayoría corresponde a material cuaternario (aluvión), pequeños afloramientos de basalto, y traquitas, hacia la parte este, cercano al subdominio Ib afloran calizas.

Dominio Aeromagnético II (DAM II)

Se ubica hacia la parte SE del mapa, la morfología del DAM es indefinida, se encuentra abierto hacia el este y sur, tomando en cuenta la longitud en una dirección N-S (cerca al límite del mapa) la medida es de 133 kilómetros y un promedio de ancho de 35 kilómetros, geológicamente este dominio está relacionado prácticamente en su totalidad a calizas, lo que concuerda con la respuesta magnética relativamente baja.

Dominio Aeromagnético III (DAM III)

Localizado al poniente del DAM I, este DAM al igual que el anterior, no presenta una morfología definida pues encuentra abierto en casi todos sus flancos excepto donde colinda con el DAM I, su dimensión en dirección N-S es de 147 kilómetros por 48 kilómetros en promedio, en general los valores de magnetización son bajos, la correlación geológica corresponde a aluvión en su gran mayoría (que corresponde a los bajos magnéticos) y afloramientos de riolita (correspondiendo a valores un poco más elevados de magnetización).

En términos generales en el mapa de la continuación ascendente 10 km, sin duda el DAM principal es el DAM I y de especial interés, el subdominio Ic, pues este dominio corresponde casi en su totalidad a el afloramiento en superficie del Intrusivo Palo Verde, no así los demás subdominios.

4.3.1.5. Lineamientos aeromagnéticos

Los contrastes en la susceptibilidad magnética (k) reflejan configuraciones particulares (alineaciones marcadas en los mapas por los contraste en la susceptibilidad) en muchas de las ocasiones estas discrepancias se deben

a fracturas y/o fallas, así como también a contactos litológicos. Como se mencionó en los fundamentos de este capítulo, el filtro de la derivada, calcula la tasa de cambio del campo magnético en la vertical y sobre el mismo punto, esto hace que se afinen las anomalías y mediante esto se pueda observar una mejor ubicación espacial del origen y límites de los mismos. Para la interpretación de los lineamientos aeromagnéticos, se empleó el mapa de la segunda derivada en Z ($2aDz$) con continuación ascendente a 2 kilómetros (Figura 26), inferidos en base a la variación de la k , los cuales, como ya se mencionó, pueden ser característicos de fallas, fracturas y contactos litológicos, algunos de estos lineamientos pueden ser visibles en superficie y otros no.

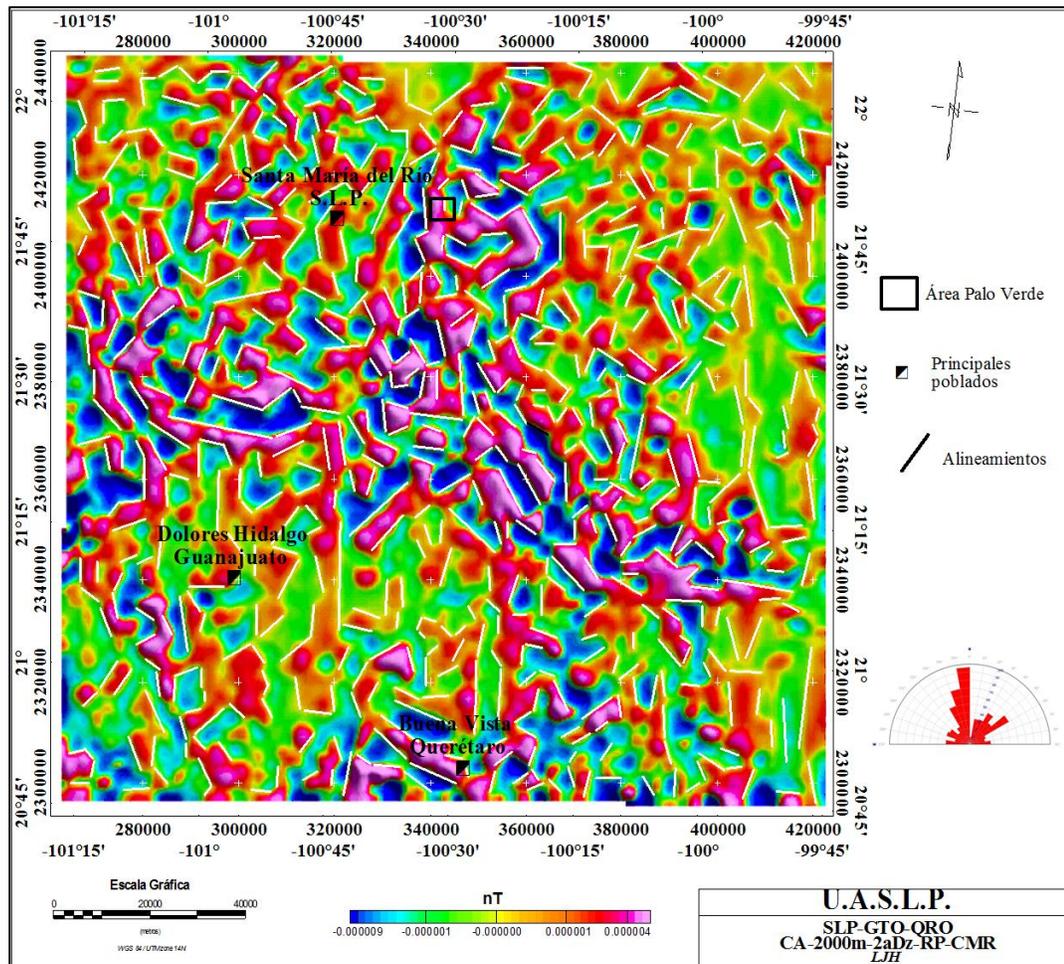


Figura 26. Lineamientos aeromagnéticos en mapa de CA-2KM-2aDz-CMRP

Se analizaron un total de 646 lineamientos, los cuales, en su mayoría, probablemente sean producto del ambiente volcánico del área. Las direcciones preferenciales de los lineamientos es en términos generales N-S, seguido por la tendencia NW-SE, y en menor proporción NE-SW. Sin duda el reflejo de muchas de estas variaciones, pertenecen a fallas originadas por diversos esfuerzos estructurales anteriores y posteriores a la orogenia Laramide.

4.3.2. Magnetometría terrestre

Una vez identificada el área de interés en la etapa del análisis aeromagnético, es necesario realizar la confirmación física mediante la magnetometría terrestre que consiste en hacer un cubrimiento total del área seleccionada.

Los levantamientos magnéticos fueron realizados con dos tipos de magnetómetros: GEM modelo GSM-19 con una resolución de 0.01 nT y precisión absoluta de 0.2 nT sobre su rango de temperatura y un Geometrics modelo G-856 el cual realiza mediciones con precisión de 0.1 nT. De igual manera se tomaron mediciones de susceptibilidad magnéticas, las cuales fueron medidas utilizando un susceptibilímetro marca KT-9 modelo Kappameter el cual tiene un límite de sensibilidad de hasta 1×10^{-5} unidades SI con un rango de medición de 9.99×10^{-3} hasta 999×10^{-3} SI.

4.3.2.1. Características del levantamiento magnético terrestre

Para el cubrimiento del área, se planteó una malla de 6 secciones magnéticas paralelas con un sentido NE-SW (con el fin de cruzar perpendicularmente los afloramientos presentes en la zona) con una separación entre ellas de 500 metros, estaciones de lectura cada 50 metros y una longitud aproximada de 3 kilómetros cada una, para más detalle ver tabla 8.

Tabla 8. Relación de distancias lineales de las secciones levantadas.

Línea	No.Estación	Distancia (m)	Mínimo	Máximo	Promedio
L1	80	3000	41543	42119	41868
L2	65	3260	41798	42593	42254
L3	157	3270	40218	43587	41681
L4	60	3050	41202	42190	41744
L5	44	2300	41572	42015	41748
LF	45	1200	41628	42400	41868
TOTALES	<u>451</u>	<u>16080</u>	<u>41326.83</u>	<u>42484</u>	<u>41860</u>

La información magnética terrestre se corrigió por variaciones horarias y diurnas. Las correcciones diurnas se realizaron tomando lecturas al inicio y al final de cada uno de los días en que se tomaron las lecturas. Las variaciones horarias se corrigieron de acuerdo a los datos que se midieron en la estación base.

4.3.2.2. Campo Magnético Total (CMT)

En el mapa de la Figura 27 del CMT, se observa la configuración de las secciones magnéticas así mismo, también se pueden observar las líneas de sección. De manera general se puede ver que los altos magnéticos presentan una dirección preferencial NE-SW, asimismo aparece una anomalía dipolar abierta hacia al SE, hablando de la parte media donde se puede advertir un bajo magnético también se puede observar una tendencia NE-SW. Las intensidades de magnetización en el área van de 41628 nT hasta 42400 nT y una media de 41868.33 nT.

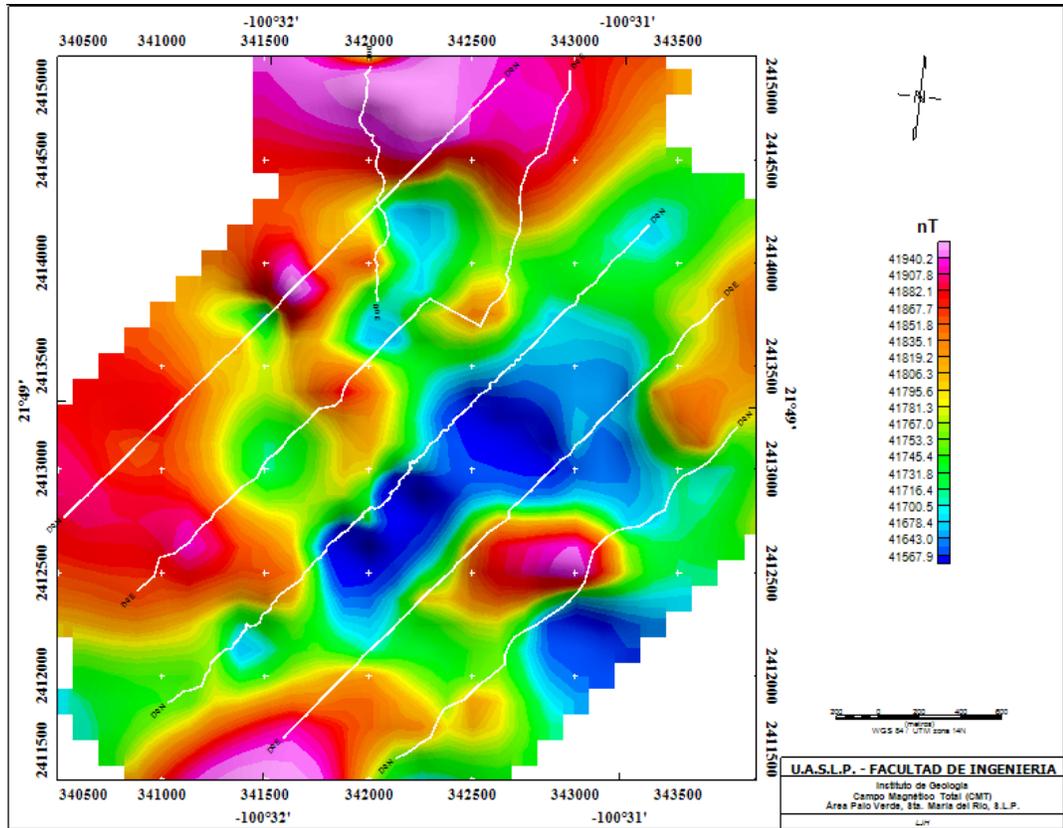


Figura 27. Mapa del Campo Magnético Total (CMT) del área de Palo Verde.

4.3.2.3. Campo Magnético Residual (CMR)

El CMR se obtiene a partir del CMT, mediante una sencilla fórmula:

$$\text{CMR} = \text{CMT} - \text{IGRF}$$

Dónde:

CMT = Campo Magnético Total

CMR = Campo Magnético Residual

IGRF = Campo Geomagnético de referencia

Con esta resta, se obtienen solo los valores locales, en donde, se siguen observando las direcciones preferenciales de los altos magnéticos (NE-SW), así como de la parte media, que es donde se ubican los bajos magnéticos (con la misma dirección preferencial NE-SW) y la anomalía dipolar abierta en su porción SE, Figura 28. Las intensidades de magnetización van de -163.15 nT hasta 605.5 nT y una media de 75.59 nT.

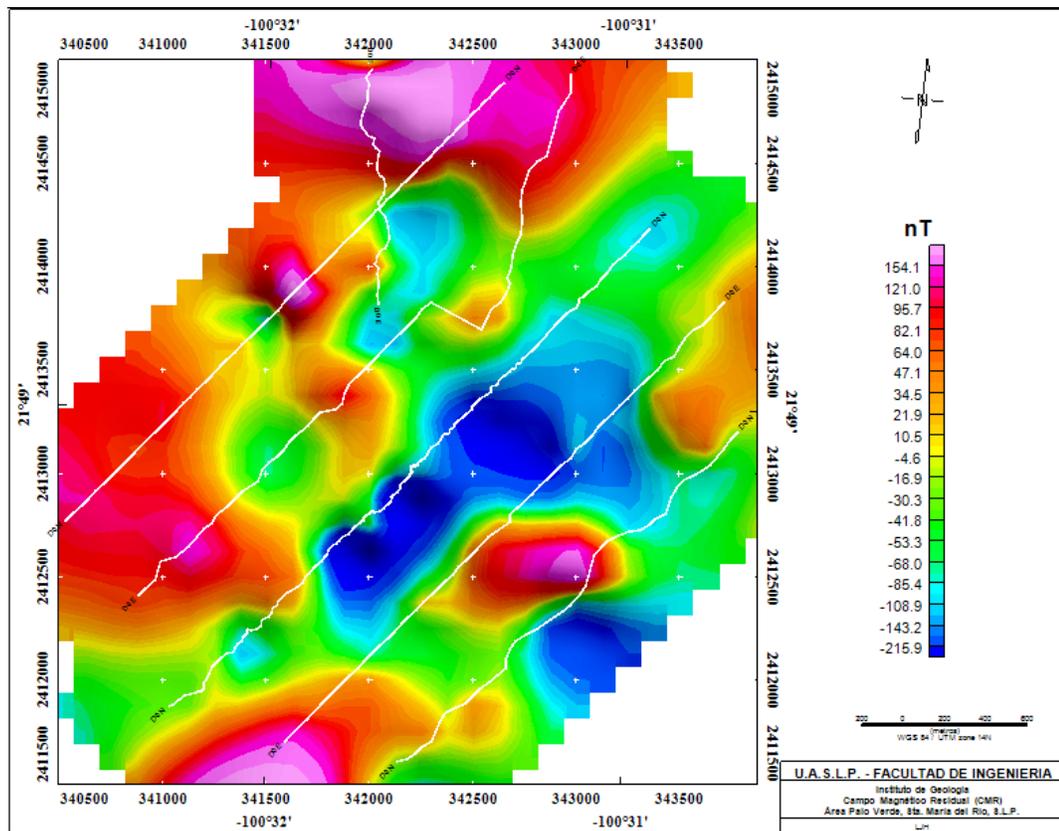


Figura 28. Mapa del Campo Magnético Residual (CMR) del área de Palo Verde.

4.3.2.4. Campo Magnético Reducido al Polo (CMRP)

Como se ha mencionado con anterioridad, es necesario, para hacer una buena interpretación de los datos, realizar los ajustes pertinentes para ubicar las anomalías sobre las fuentes causantes de la magnetización, para ello es aplicado el algoritmo de la Reducción al Polo. En la Figura 29,

además de la configuración reducida al polo también se observan las líneas de sección con las cuales se puede observar el ligero desplazamiento que sufrieron los datos, en comparación con los mapas anteriores. Las intensidades de magnetización van de -386 nT hasta 250 nT.

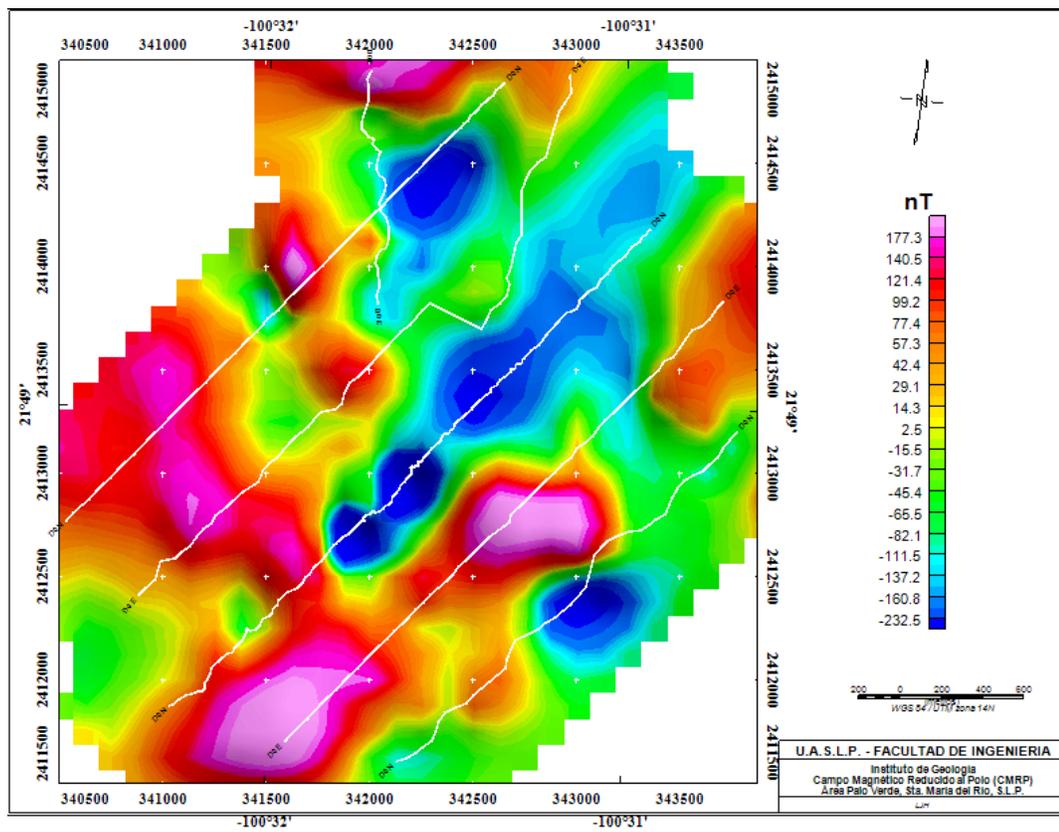


Figura 29. Mapa del Campo Magnético Reducido al Polo (CMRP) del área de Palo Verde.

4.3.2.5. Dominios Magnéticos

Un dominio magnético corresponde a regiones con el mismo tipo de respuesta magnética, un dominio, puede estar constituido por una o más unidades geológicas. De acuerdo a los rasgos observados en el mapa del CMRP, se delimitaron 2 dominios magnéticos (Figura 30), éstos a su vez se pueden catalogar como subdominios del DAM I analizado en la magnetometría aérea, se hará referencia como dominios magnéticos

(DM), para las siguientes descripciones sin perder de vista que en términos más estrictos serían subdominios del DAM I.

Dominio Magnético I

El DM I se localiza hacia la parte suroeste del área de estudio, se caracteriza por un conjunto de anomalías magnéticas con longitud de onda de 100 a 150 metros, bajas frecuencias y amplitudes de -21 a 253 nT. La morfología de este dominio, es más o menos alargada en dirección N-S, se encuentra indefinido en su flanco N y también al W, se ensancha hacia el SW y disminuye paulatinamente hacia el N, las dimensiones promedio son 3485 m en dirección N-S, 1215 m (en su parte más ancha, dirección E-W) y 286 m en su parte más angosta (E-W). Las intensidades de magnetización más altas se relaciona en su mayoría con el intrusivo Palo Verde, en menor proporción con el domo riolítico y hacia el norte con ignimbrita. Topográficamente los altos magnéticos, corresponden, casi en su totalidad, a los altos topográficos del área (1880 msnm).

Dominio Magnético II

El DM II se ubica aproximadamente del centro del área hacia el norte, define por longitudes de onda de 30 a 100 metros, frecuencia baja y amplitudes que van de -448 a 8 nT. La forma de este dominio es pseudoalargada con una dirección NE-SW, sus dimensiones son de 2723 m (en dirección NE-SW) y 2573 en dirección NW-SE, se correlaciona casi en su totalidad con el intrusivo Palo Verde, en menor proporción con el domo riolítico, carbonatos e ignimbrita. Es interesante notar que el bajo magnético más profundo se correlaciona, por su ubicación, con el domo riolítico. El *trend* de los valores bajos de magnetización, con dirección NE-SW, que se observa en éste dominio, es muy probable que se deba a una falla, la cual parece ser reciente, pues se puede ver como este *trend* fracciona la configuración del DM I aproximadamente en la parte central del área (donde ubican los afloramientos del domo y carbonatos). En lo

que respecta a la topografía que involucra a este dominio, se puede percibir un poco plana, en la cota de 1800 msnm aproximadamente.

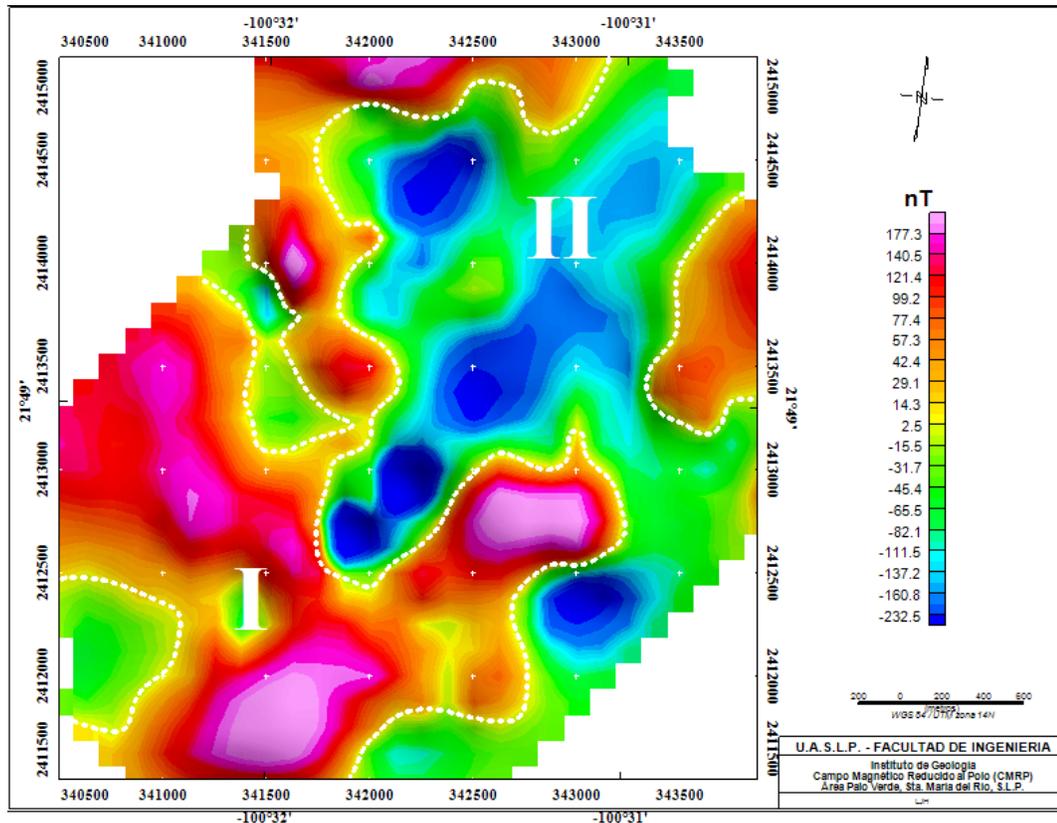


Figura 30. Dominios magnéticos en CMRP del área de Palo Verde.

4.3.2.6. Lineamientos magnéticos

Los contrastes en la susceptibilidad magnética, se ven reflejados en la configuración por alineaciones marcadas en los mapas de anomalías geofísicas, la discrepancia en la susceptibilidad magnética en ocasiones se debe a la presencia a profundidad de fallas, fracturas y/o contactos.

Debido a que el filtro de la derivada vertical nos ayuda a observar las tasas de cambio de los campos potenciales en la vertical, es ideal para hacer la interpretación de los lineamientos del área de estudio, pues ayuda a resaltar los contrastes en las configuraciones en el mapa.

Por lo anterior, la interpretación de los lineamientos geofísicos del área, fue realizada en el mapa de CA-100m-1aDz-RP-CMR (Figura 31), identificándose un total de 159 lineamientos, mediante el análisis de los mismos, se determinaron dos direcciones preferenciales, la principal es NE-SW y NW-SE. Cabe mencionar que el emplazamiento del domo riolítico de la parte central del área se encuentra relacionado a una falla normal de rumbo NW-SE.

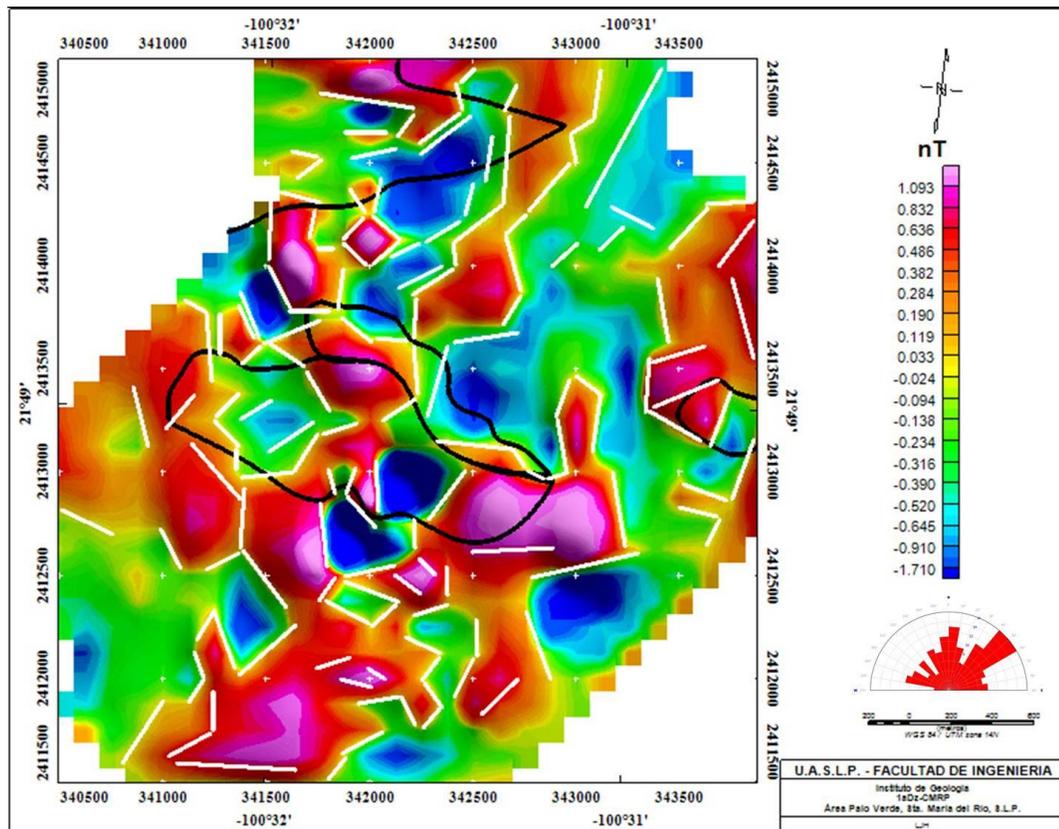


Figura 31. Lineamientos magnéticos en CMRP en el área de Palo Verde.

4.3.2.7. Señal Analítica (SA)

La señal analítica (como ya se explicó previamente) se emplea para resaltar los bordes de las estructuras geológicas responsables de las respuestas de anomalías magnéticas, mediante la determinación de la distribución de máximos y mínimos por medio del cálculo del valor absoluto del gradiente del CMRP.

En el mapa de la Figura 32 se muestra el filtro de la señal analítica aplicado al campo magnético residual reducido al polo, en el cual se delimitó un cuerpo y/o estructura hacia la parte central de del área, en el cual se pueden ver resaltados los borde a misma y que se presume son las causantes de las anomalías magnéticas.

Las forma del cuerpo definido en el mapa de la señal analítica es más o menos alargada en dirección N-S, los bordes no se encuentran definidos hacia la parte este y sureste, los rangos de intensidad magnética sobre longitud es de 0.65 nT hasta 5.5 nT. Hacia la parte central del cuerpo se correlaciona con el domo riolítico y carbonatos, el resto corresponde casi en su totalidad al intrusivo Palo Verde, al norte una pequeña porción se correlaciona con la ignimbrita.

Los altos magnéticos muestran en general dos direcciones preferenciales:

- a) hacia el norte estos altos muestran una dirección aproximada NE-SW y una longitud de 1274 m e intensidad de magnetización de 1 nT a 2.5 nT y
- b) con una dirección preferencial NW-SE y longitud de 1400 m aproximadamente y sus intensidades van de 1 nT a 5.5 nT.

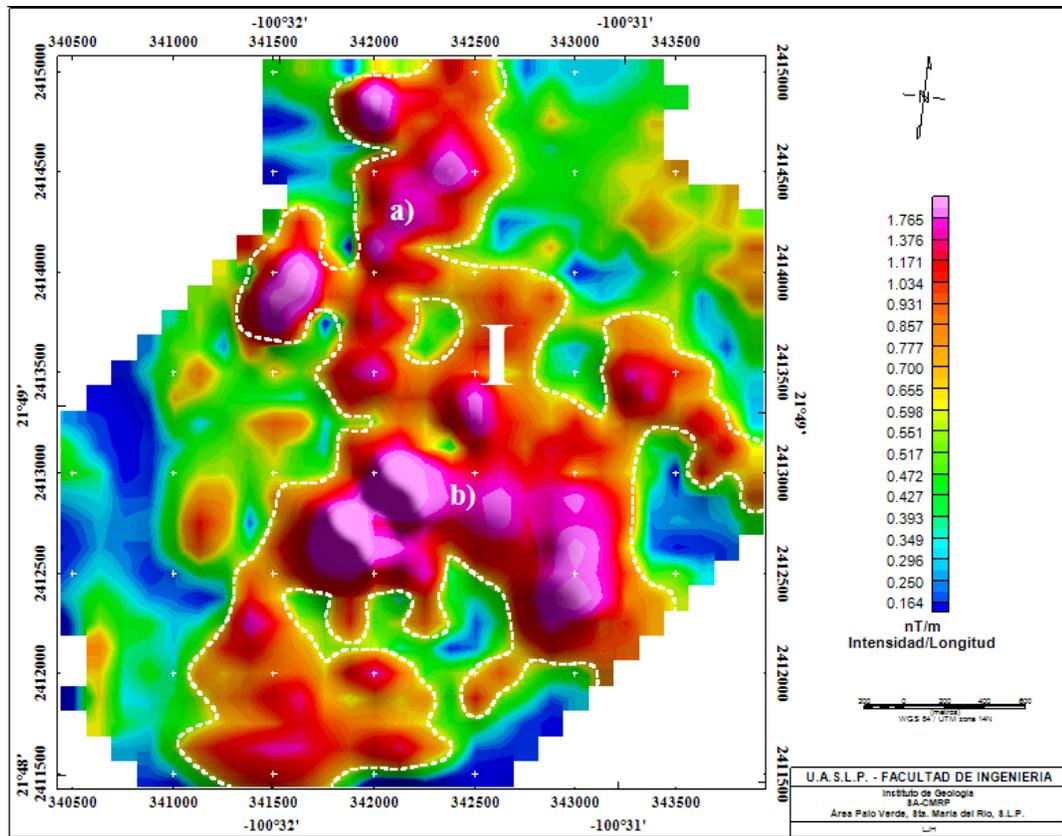


Figura 32. SA-CMRP del área de Palo Verde.

4.3.2.8. Continuación Ascendente 400 m del Campo Magnético Reducido al Polo

La aplicación de este filtro calcula los valores del campo magnético en un plano que se sitúa a una altura diferente del plano de observación original, para este caso (mapa de la Figura 33) se empleó una continuación ascendente a 400 metros a la señal analítica, en el, se puede ver un cuerpo con los bordes mejor definidos que en el mapa anterior, la forma del cuerpo es alargada en dirección N-S, sus dimensiones son 3385 m en dirección N-S y 2080 m en dirección E-W, las intensidades de magnetización van de 0.7 nT a 1.16 nT, la intensidad más alta se ubica hacia la parte central y se correlaciona con el domo riolítico de la zona.

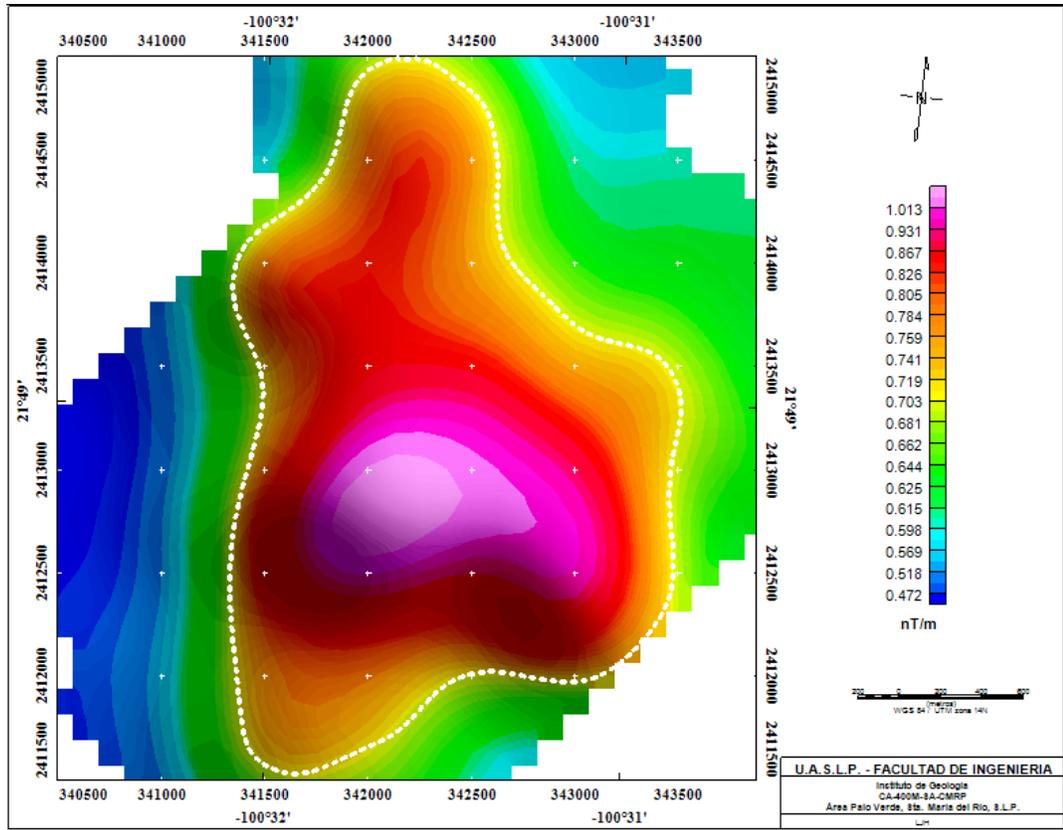


Figura 33. Delimitación de cuerpos en CA-400m-SA-CMRP del área de Palo Verde.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La integración de los resultados de varias metodologías, en una etapa de exploración y/o prospección, es quizá la parte más importante de ésta fase, ello implica el poder conjuntar cada uno de los datos para poder discernir con mayor claridad si nos dan la respuesta a la o las interrogantes que se habían planteado desde el inicio del trabajo.

La información que se presenta a continuación, describe los rasgos más relevantes de las metodologías empleadas en el presente estudio, geología, geofísica y geoquímica.

5.1. Geología-Geofísica-Geoquímica

Los mapas que se mostraran a continuación, corresponden a la compilación de los resultados del método magnético, el muestreo geoquímico y la geología. En línea de color negro se muestra el contorno de la geología del área de Palo Verde, hacia el centro y con una dirección de la estructura NW-SE se encuentra un domo riolítico, a un costado de éste domo (hacia el NE del área) se localizan los carbonatos (alguna vez aludidos como posibles carbonatita) un poco más al norte se encuentra un afloramiento de ignimbrita, el resto corresponde al Intrusivo Palo Verde. En lo que respecta a la magnetometría, los mapas utilizados son el mapa de dominios magnéticos y la continuación ascendente a 400 metros del campo magnético reducido al polo. En lo concerniente a los datos geoquímicos, estos se dividieron en 3 anomalías denominadas como anomalía oeste, anomalía central y anomalía de lantánidos (ésta se subdivide a su vez en tierras raras ligeras, tierras raras pesadas y elementos asociados a las tierras raras).

5.2. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía poniente

En los mapas de las siguientes Figuras 34 y 35 se pueden ver los dominios correspondientes a la magnetometría terrestre (descritos con

mayor detalle en el apartado de magnetometría). El mapa consta de dos dominios, con líneas de color negro los contornos de la geología del área y finalmente en línea de color azul, las concentraciones por encima del contenido medio en corteza de algunos elementos traza.

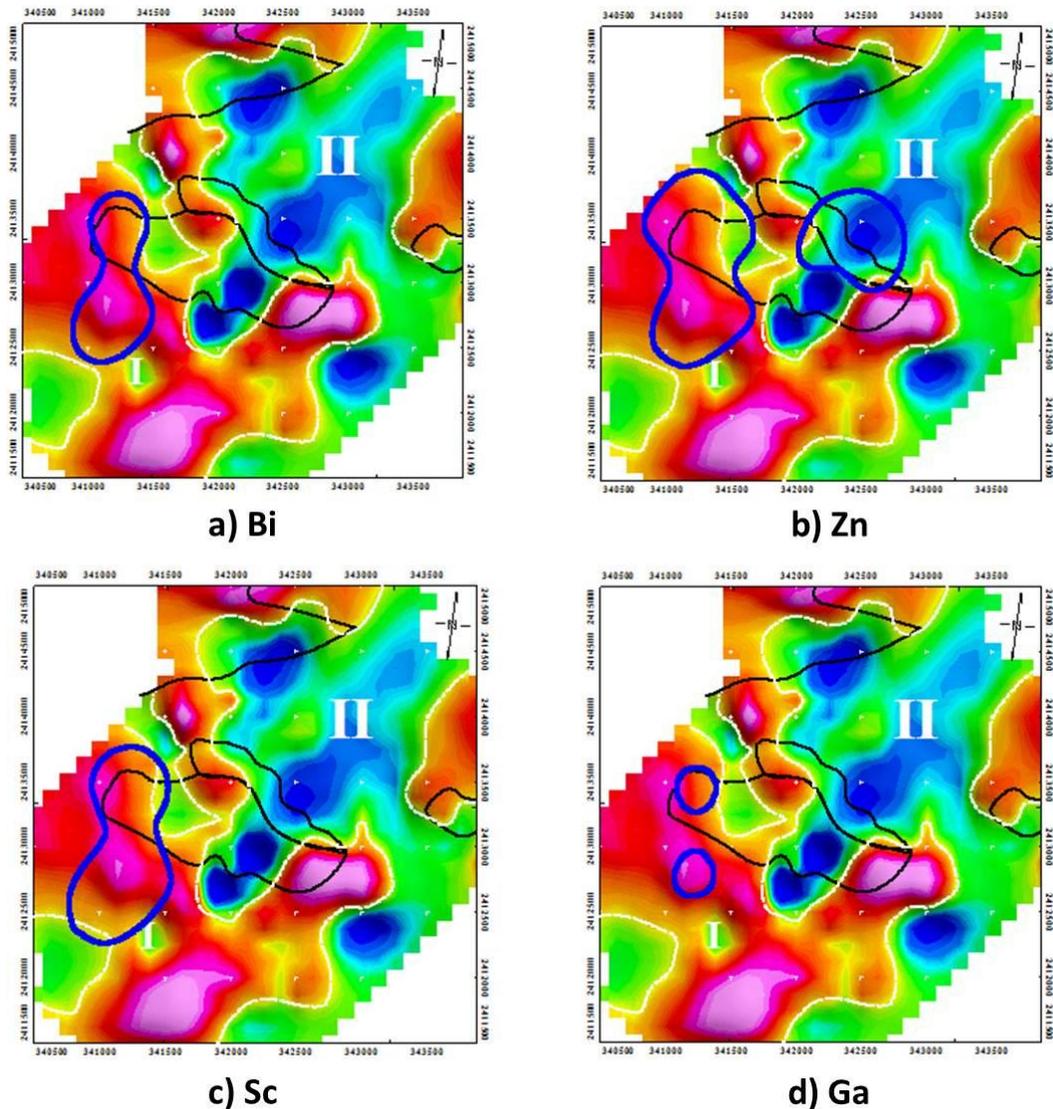


Figura 34. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Bismuto (Bi), b) Zinc (Zn), c) Escandio (Sc) y d) Galio (Ga) del área de Palo Verde.

Se puede advertir, en la Figura 34, que las anomalías de a) Bi, b) Zn, c) Sc y d) Ga se localizan en el borde noroeste del domo riolítico y la distribución de dichas anomalías, a excepción del Ga, muestran la forma muy similar

(una especie de elipse con una dirección N-S para su eje más largo) y la porción sur de dicha elipse se localiza en un alto magnético con valores > 150 nT y que pertenece al dominio magnético I. En el caso del Zn (inciso b) también ostenta otra anomalía hacia la periferia del domo y su contacto con los carbonatos, así mismo esta anomalía corresponde al dominio magnético II y con valores de magnetización bajos.

En lo que respecta a la Figura 35 se puede apreciar ahora, los dominios magnéticos y la distribución de los valores del e) Ti, f) Hf, g) Cs y h) Zr. El Hf y el Zr (Figura 35, f y h) comparten un comportamiento muy similar de la anomalía, con una forma semi-circular en la periferia del domo riolítico (al poniente del área) y con valores de magnetización > 100 nT correspondiendo también esta ubicación al dominio magnético I. El Cs por su lado presenta una distribución mucho más amplia que los elementos anteriores, siendo la forma de su distribución similar a la de una media luna (con sus dos extremos apuntando hacia el NW), esta distribución abarca casi en su totalidad a ambos dominios magnéticos, las intensidades de magnetización van desde los -360 nT hasta 250 nT. El Ti es un caso particular, pues muestra una anomalía inversa respecto a las anomalías de Bi, Zn, y Sc (en donde para estos elementos los valores están por encima del contenido normal, el Ti presenta valores por debajo de los 4400 ppm) siendo la distribución de valores para el Ti en casi toda el área menos en la zona de las anomalías antes mencionada y que es en donde se aprecia un alto magnético, el promedio de concentración del elemento es de 5600 ppm.

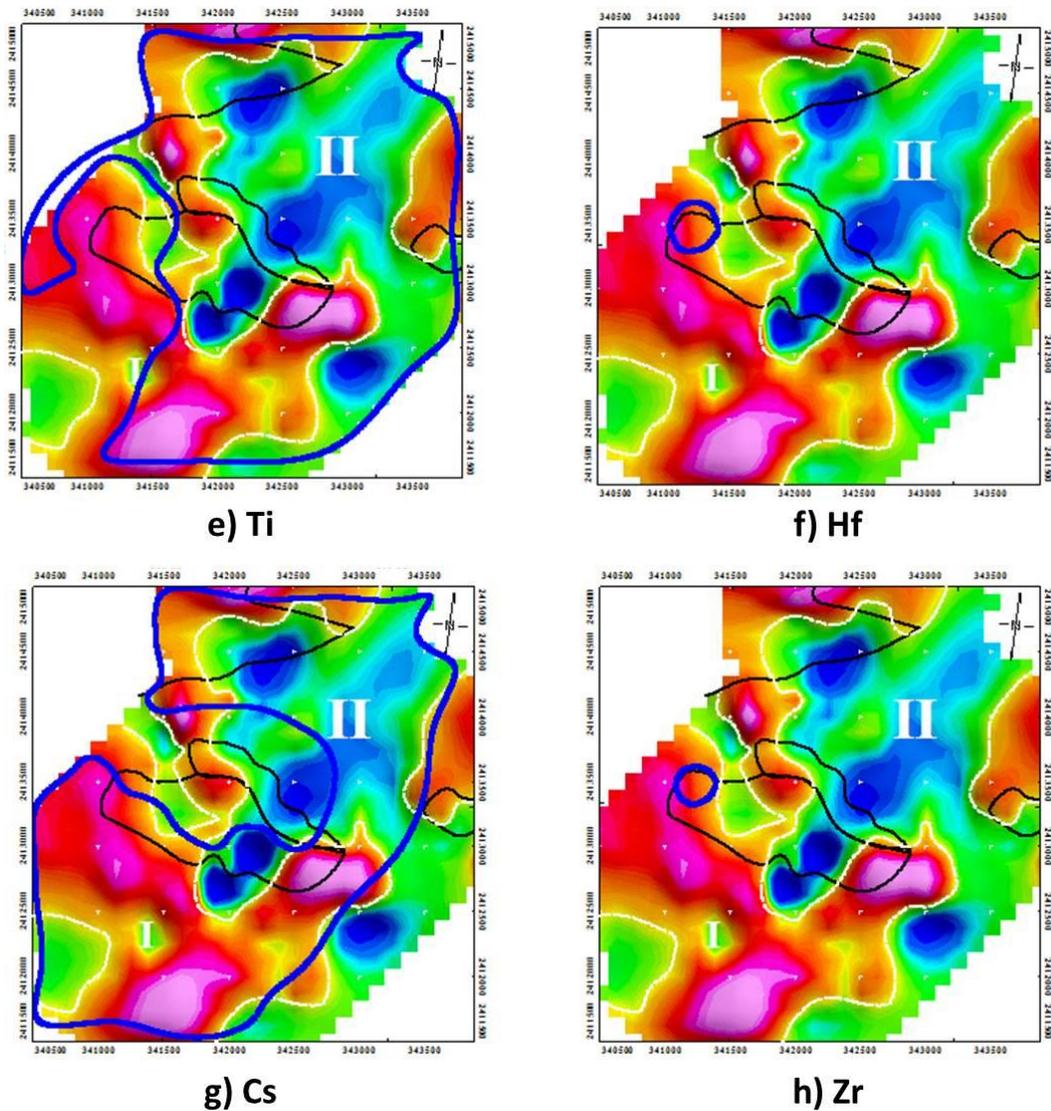


Figura 35. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Titanio (Ti), f) Hafnio (Hf), g) Cesio (Cs) y h) Zircón (Zr) del área de Palo Verde.

5.2.1. Geología-CA-400m-SA--CMRP-Anomalía Poniente

Para reafirmar mejor los bordes de los cuerpos, alejando los ruidos superficiales se aplica los filtros de continuaciones ascendentes. En la Figura 36 se muestra este proceso, así como la distribución de los valores de los elementos que corresponden a las anomalías poniente. Se puede apreciar una mejor definición de las anomalías magnéticas, dando lugar a la delimitación de un cuerpo alargado en dirección norte-sur, siendo la

parte central del cuerpo la que corresponde al afloramiento del domo riolítico del área.

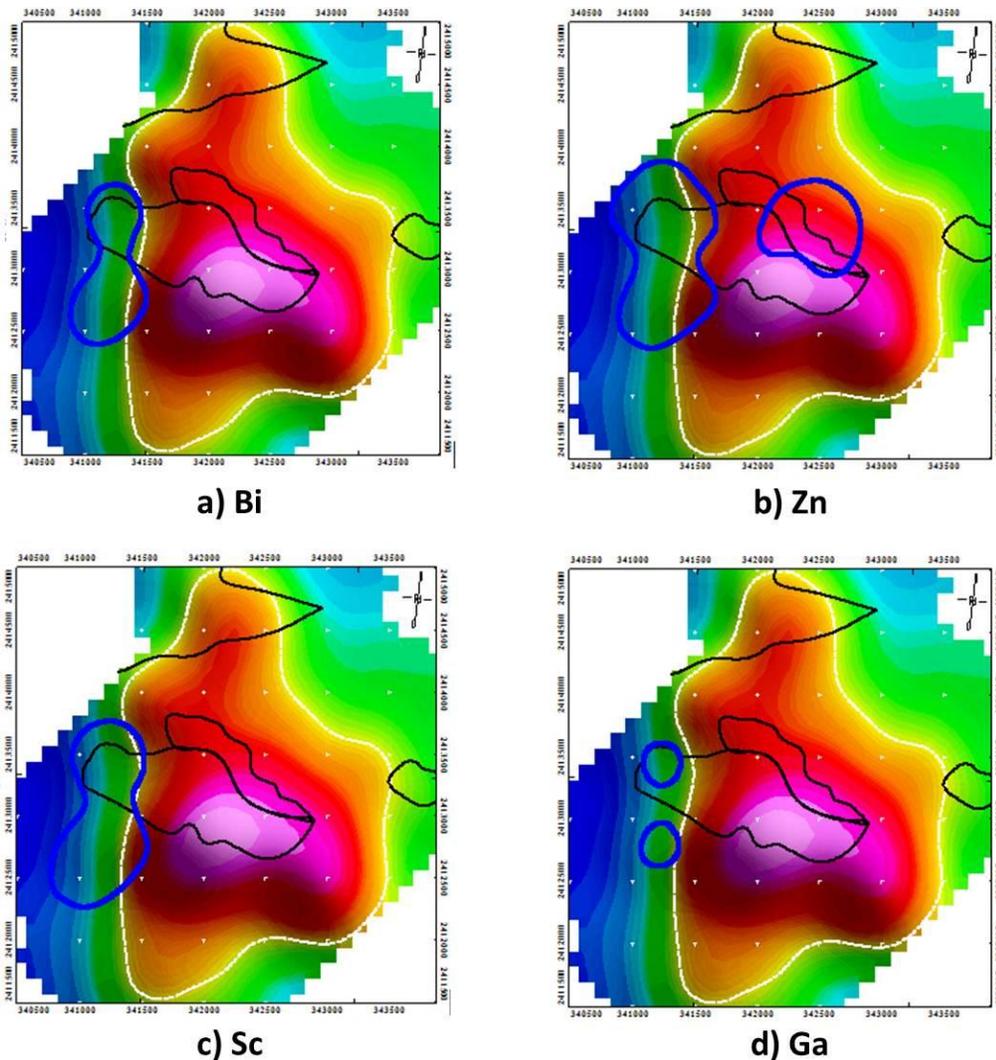


Figura 36. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de a) Bismuto (Bi), b) Zinc (Zn), c) Escandio (Sc) y d) Galio (Ga) del área de Palo Verde.

Se puede advertir que el contorno de la anomalía de Bi se encuentra en el borde del cuerpo definido en la porción poniente del área (Figura 36, a); para el caso del Zn de manera similar al Bi, uno de los contornos de la anomalía correspondiente se localiza en el borde poniente del cuerpo y el segundo contorno de la anomalía se localiza hacia la parte central del cuerpo, que es también, el contacto entre el domo y los carbonatos del área (Figura 36, b); la distribución del Sc es muy parecida finalmente el Ga

presenta solo dos pequeñas anomalías, justamente, de igual manera que los elementos anteriores, en el borde poniente del cuerpo Figura 36, c). Para el Hf y el Zr (Figura 37, h y f) exhiben contornos de anomalías similares, pseudocirculares localizadas en el borde el domo riolítico al oeste del área y ligeramente a un lado del borde del cuerpo establecido con la señal analítica. El Ti y el Cs (Figura 37, e y g) por su lado, se distribuyen prácticamente en toda el área y cubriendo de igual manera casi todo el cuerpo delimitado, para el caso del Cs la distribución excluye el área del contacto entre el domo riolítico y los carbonatos.

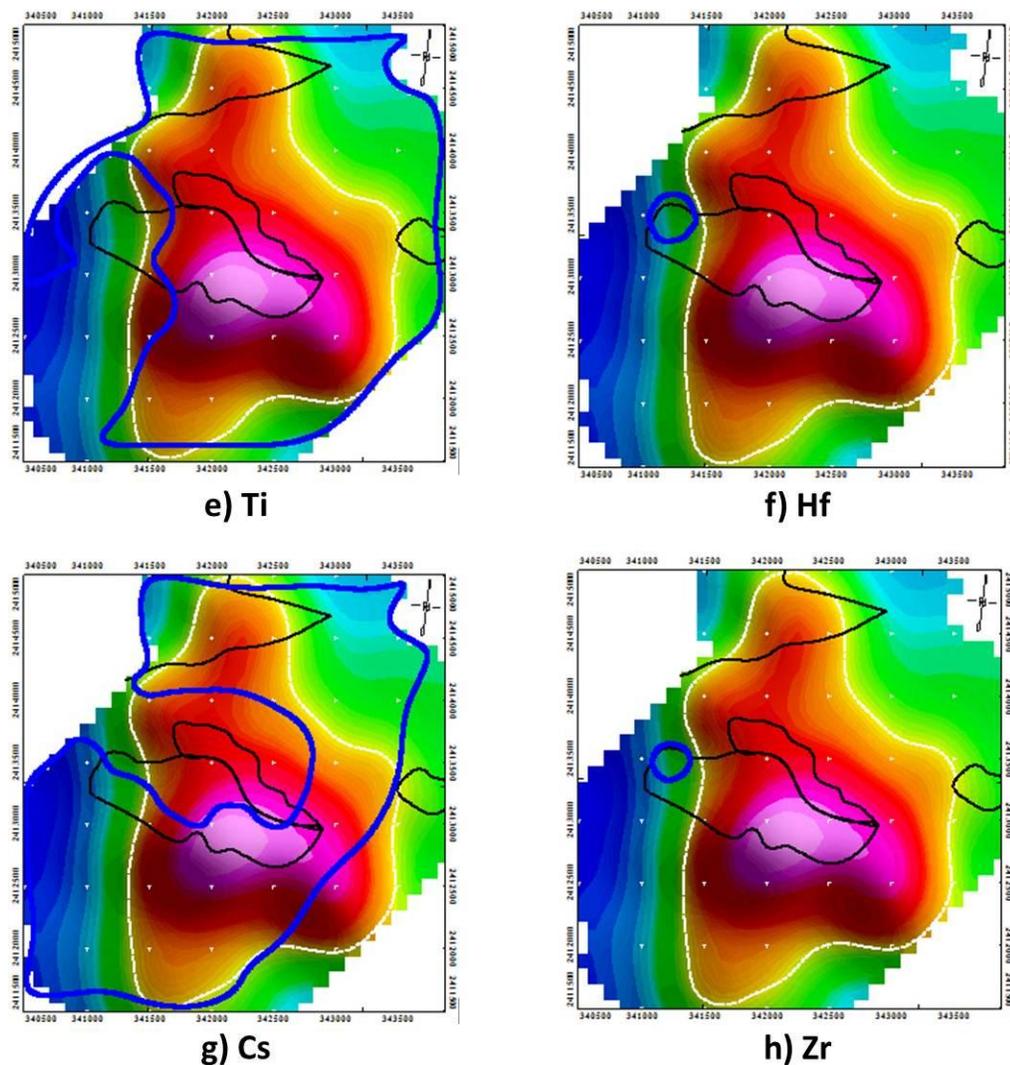


Figura 37. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de e) Titanio (Ti), f) Hafnio (Hf), g) Cesio (Cs) y h) Zircón (Zr) del área de Palo Verde.

5.3. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía central

En la Figura 38 se muestran los dominios magnéticos, la geología y la distribución de los elementos que conforman la anomalía central (Cr, Ni, As y Cd).

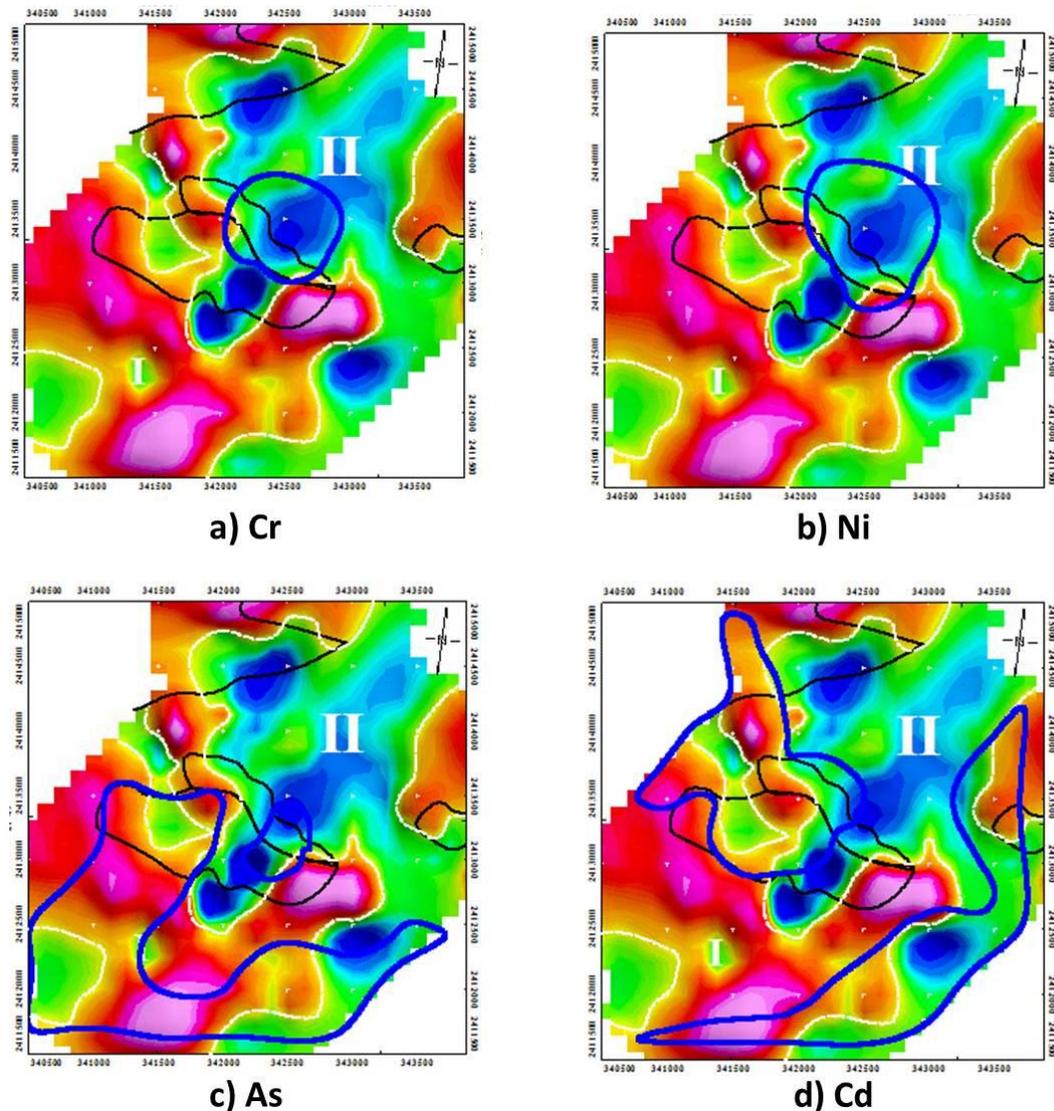


Figura 38. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Cromo (Cr), b) Níquel (Ni), c) Arsénico (As) y d) Cadmio (Cd) del área de Palo Verde.

El Cr y Ni (Figura 37, h y f) son los elementos que ostentan similitudes con respecto a la forma de la anomalía (semi-circular) y correspondiendo esta al dominio magnético II y al respectivo bajo magnético, que a su vez comprende el área de los carbonatos, en lo que respecta al As (Figura 37,

c) su distribución se extiende al sureste del área y va correspondiendo casi en su totalidad con el alto magnético del dominio I, el Cd (Figura 37, d) por su lado presenta una distribución irregular con direcciones sureste y otra noroeste ésta última abarca geológicamente al domo riolítico casi en su totalidad y los carbonatos.

5.3.1. Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía central

Al igual que con la anomalía poniente, las anomalías de este grupo también se localizan en la periferia del domo.

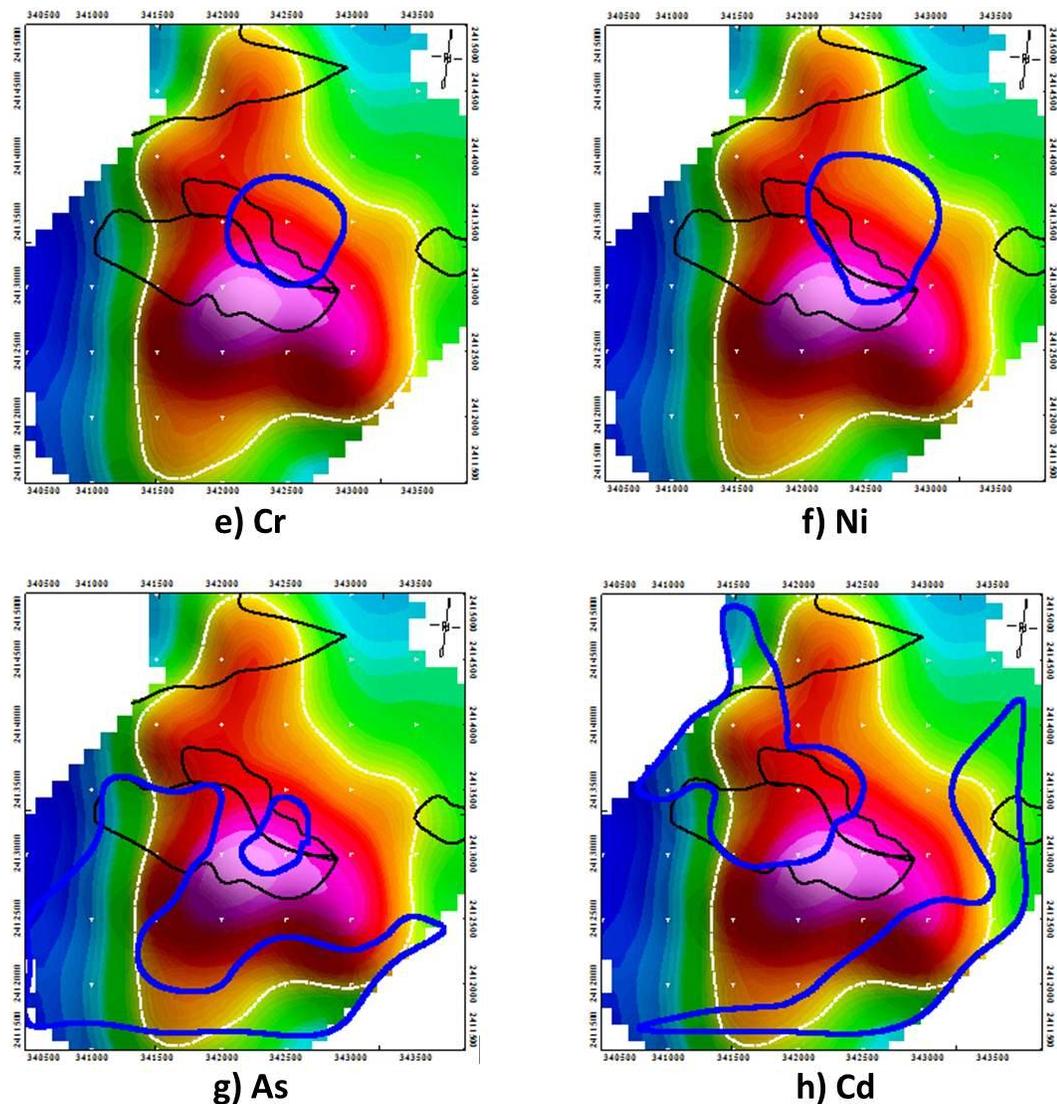


Figura 39. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de a) Cromo (Cr), b) Níquel (Ni), c) Arsénico (As) y d) Cadmio (Cd) del área de Palo Verde.

Para el caso del Cr, Ni (Figura 39, e y f) la anomalía para ambos elementos, se ubican más o menos hacia la parte central del área, en donde se localiza el afloramiento de carbonatos y ligeramente en el borde del alto magnético, para el As (Figura 39, g) se distribuye al suroeste del área y magnéticamente corresponde a valores de magnetización bajos solo una parte del extremo oeste corresponde a afloramiento del domo riolítico y el resto al Intrusivo, el Cd por su parte (Figura 39, h) exhibe dos anomalías una al sureste y otra al noroeste, ambas casi en la periferia del cuerpo delimitado.

5.4. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía lantánidos (tierras raras ligeras)

De años recientes a la fecha se ha hablado mucho sobre los elementos de las tierras raras, por lo cual resulta relevante tomar en cuenta este grupo de elementos traza.

En las Figuras 40 a 46 que a continuación se presentan, se muestran, la geología y la configuración de las anomalías geoquímicas que corresponden a los elementos de las tierras raras aunado a los datos magnéticos, comenzando con el grupo de las tierras raras ligeras.

En la Figura 40, se puede observar que la distribución para el Ce, La, Pr, Sm y Nd es muy similar y que abarca en su mayoría toda el área de estudio a excepción de la porción donde se localiza el domo y los carbonatos y existe además un bajo magnético, lo anterior expresa una forma de la anomalía de éstos lantánidos en forma parecida a la de una dona.

En el caso del Eu (Figura 41, f), su distribución difiere mucho de los anteriores, a pesar de formar parte del grupo de las tierras raras ligeras, probablemente se deba a su doble estado de valencia, las anomalías para este elemento son tres y se encuentran distribuidas una al NE del área (pertenece al dominio magnético II), una segunda en dirección más o

menos al sur (entre el dominio magnético I y II) y la última al oeste (perteneciente al dominio magnético I).

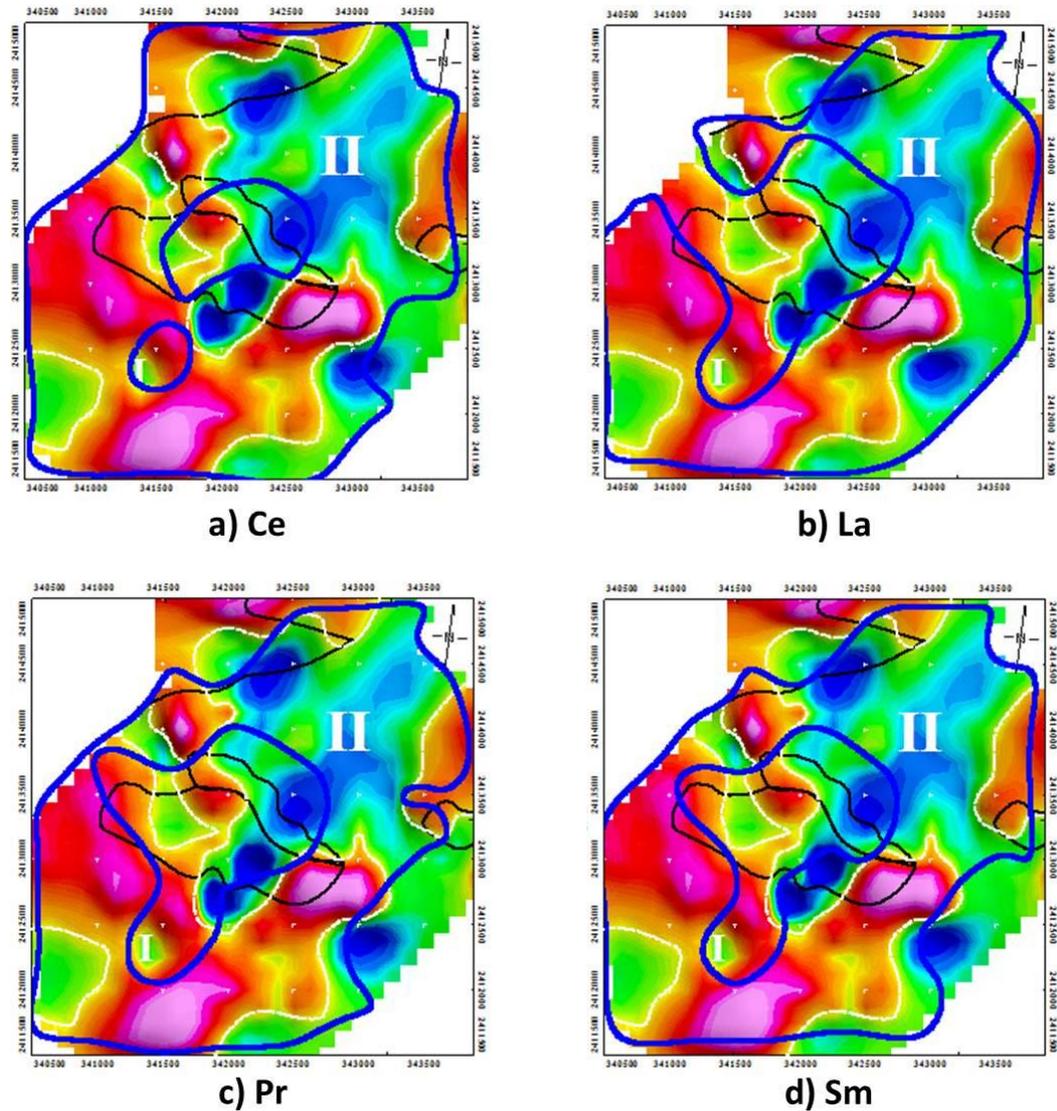


Figura 40. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Cerio (Ce), b) Lantano (La), c) Praseodimio (Pr) y d) Samario (Sm) del área de Palo Verde.

En el caso del Nd (Figura 41, e) si comparte una distribución similar a las primeras tierras raras, la distribución es en casi toda el área de estudio a excepción de la parte central (donde aflora el domo y parte de los carbonatos) dando una apariencia de a anomalía similar a una dona.

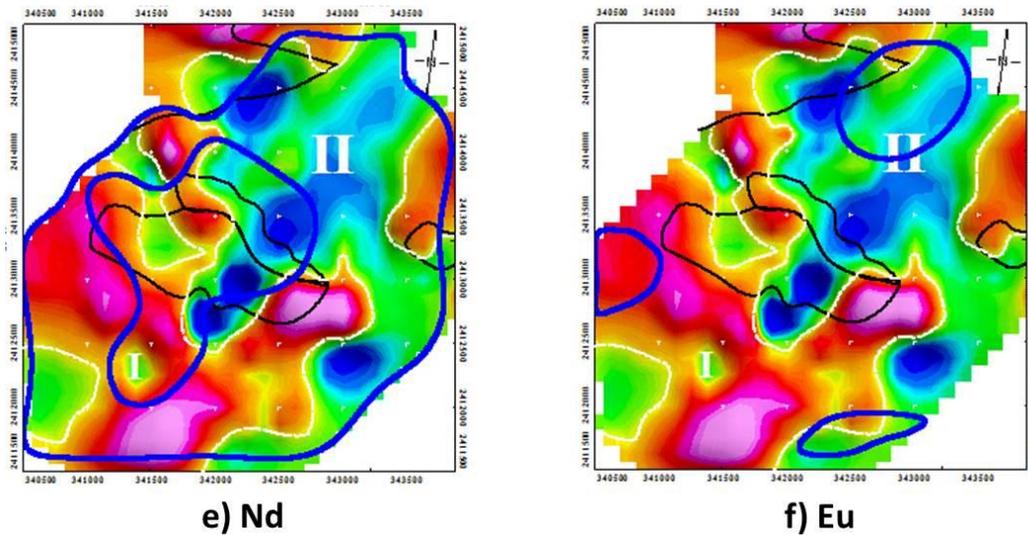


Figura 41. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Neodimio (Nd) y f) Europio (Eu) del área de Palo Verde.

5.4.1. Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía lantánidos (tierras raras ligeras)

En la Figura 42 se puede ver con mayor claridad la delimitación del cuerpo magnético con dirección de alargamiento norte-sur, el cual se localiza hacia la parte central del área.

Respecto a las anomalías geoquímicas de los valores de las tierras raras ligeras, se puede percibir como las concentraciones de dichos elementos no están completamente sobre el cuerpo sino más bien alrededor del mismo, y que dichas anomalías embonan muy bien entre sí.

Se ha mencionado anteriormente también que dentro de este grupo de las tierras raras ligeras, el Eu rompe con el patrón similar de distribución de los demás elementos (Figura 43, f), pues este presenta una distribución mucho menor que la de los elementos anteriores, la cual se reduce a 3 pequeñas anomalías pseudo-circulares distribuidas a lo largo del área, una

al noreste, otra al sur y la tercera al noroeste, estando las 3 al margen del cuerpo magnético delimitado.

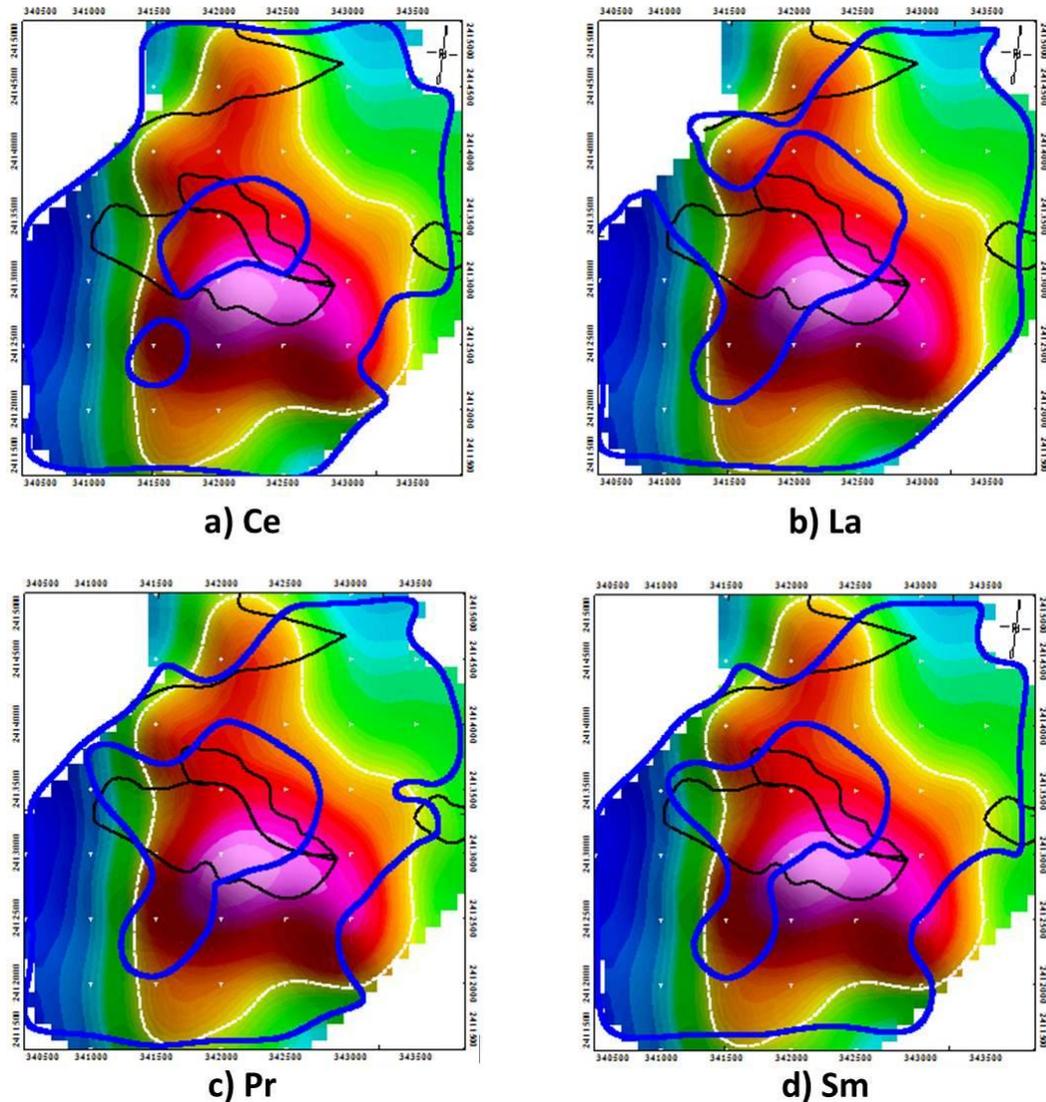


Figura 42. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de a) Cerio (Ce), b) Lantano (La), c) Praseodimio (Pr) y c) Samario (Sm) del área de Palo Verde.

En lo que respecta al Nd (Figura 5.27 inciso e), la distribución es similar a la del La, Ce, Pr y Sm (forma de la anomalía semicircular, con apariencia

de una dona y abarcando prácticamente en su totalidad el área de estudio).

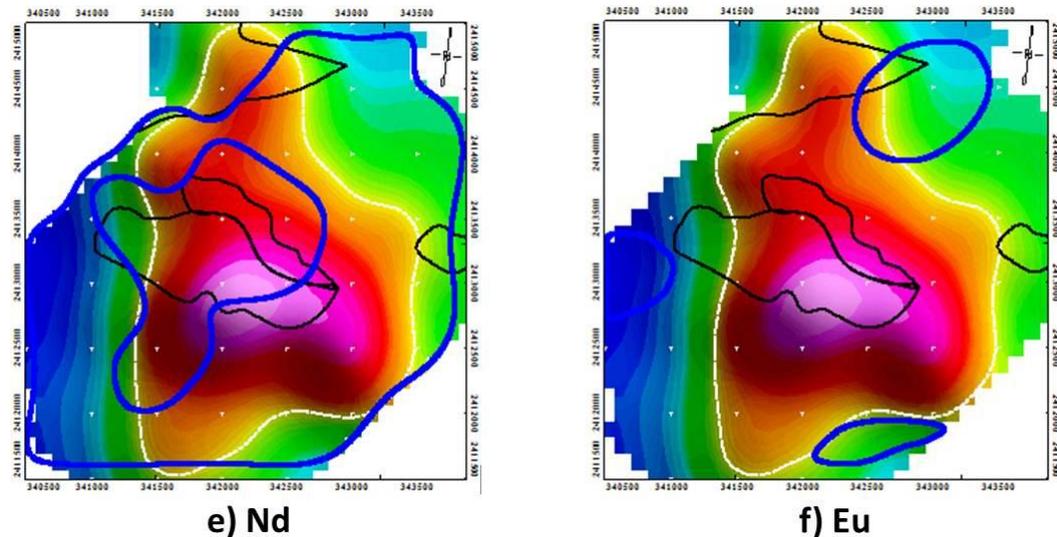


Figura 43. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de e) Neodimio (Nd) y f) Europio (Eu) del área de Palo Verde.

5.5 Geología-Dominios magnéticos-Anomalía lantánidos (tierras raras pesadas)

Para el caso de las tierras raras pesadas, como es naturalmente de esperarse, hay una disminución en cuanto a las concentraciones de las mismas, mientras que el patrón de las anomalías para las tierras raras ligeras era aproximadamente de forma de una dona y cubría casi toda al área de estudio, abarcando los dos dominios magnéticos, el patrón de distribución de las tierras raras pesadas Y, Tm, Ho y Gd (Figura 44, a, b, c y d) y Dy, Tb, Yb y Er (Figura 45, e, f, g y h) así como Lu (Figura 46) exhiben una anomalía en forma aproximada de una “u” en una dirección suroeste y abarca en términos generales el dominio I y en caso del Gd, Ho y Dy también abarcan el dominio II.

El Y y el Tm (Figura 44, a y b), Tb y Yb (Figura 45, f y g) y Lu (Figura 46) además de la anomalía del suroeste, muestran otra pequeña al noreste del área, dicha anomalía corresponde al dominio magnético II (valores de magnetización bajos).

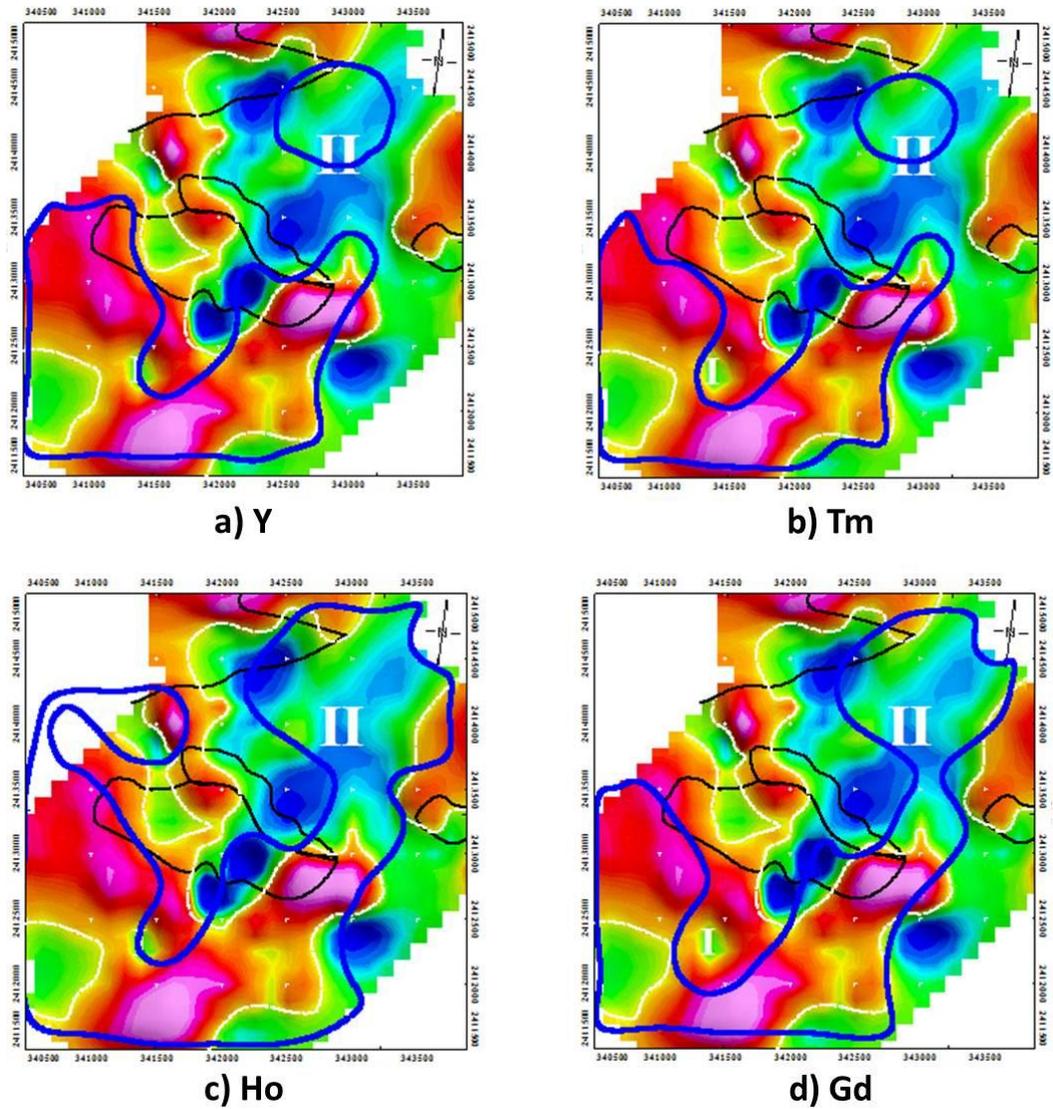


Figura 44. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Itrio (Y), b) Tulio (Tm), c) Holmio (Ho) y d) Gadolinio (Gd) del área de Palo Verde.

Mientras que Ho y Gd (Figura 44, c y d) muestran un patrón de distribución de anomalías similar (abarcando dominio I y II).

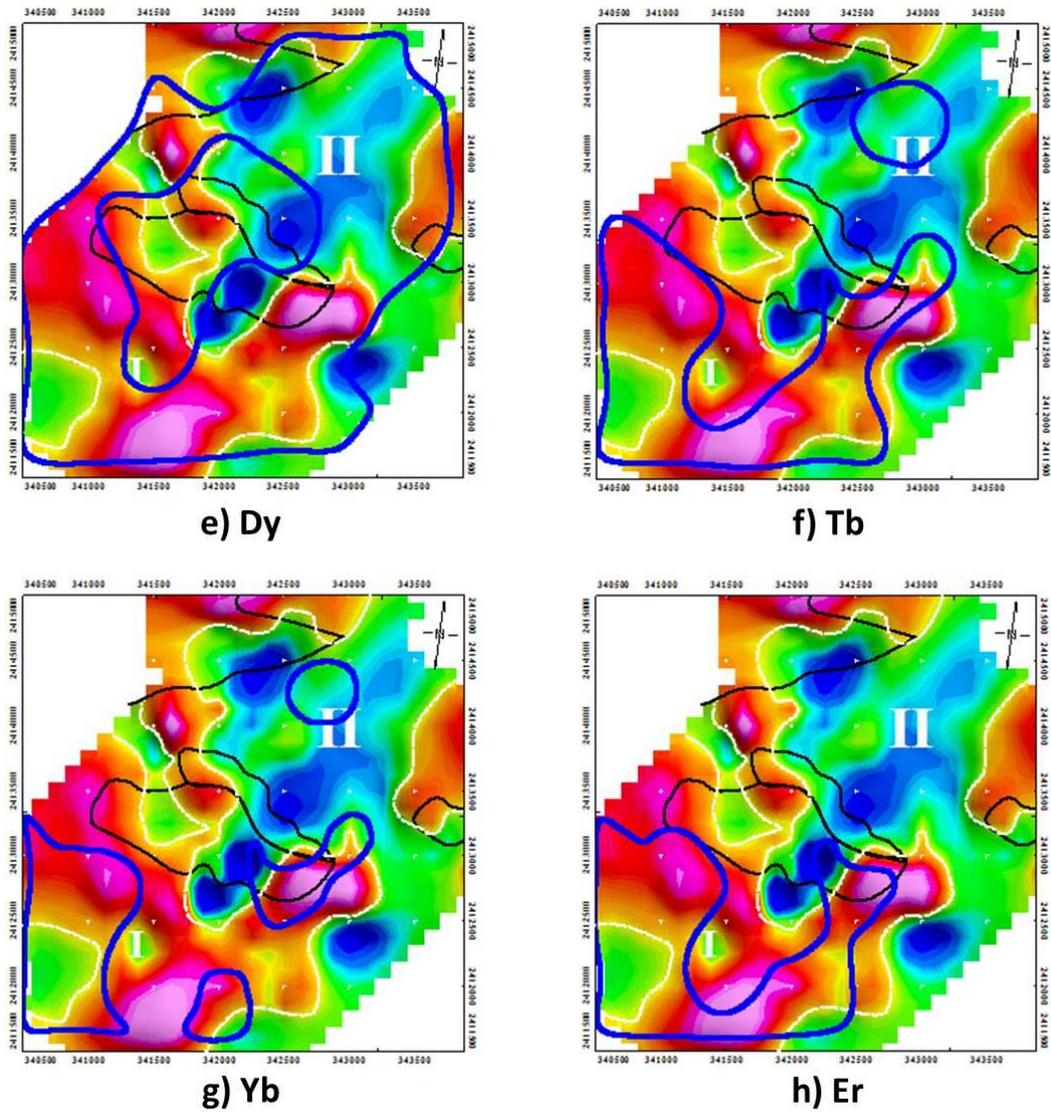
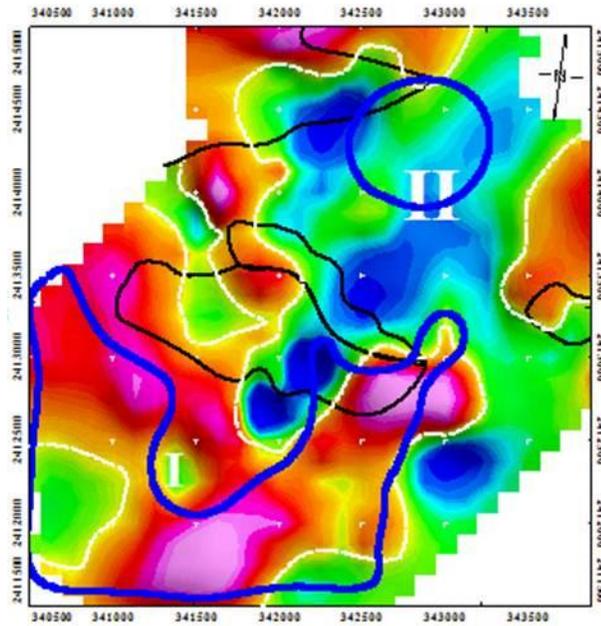


Figura 45. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Disproso (Dy), f) Terbio (Tb), g) Iterbio (Yb) y h) Erbio (Er) del área de Palo Verde.



i) Lu

Figura 46. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de i) Lutecio (Lu) del área de Palo Verde.

5.5.1. Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía lantánidos (tierras raras pesadas)

En los mapas de la Figura 47 a 49 se puede apreciar con más claridad la delimitación del cuerpo causante de las anomalías magnéticas y la relación que guarda las anomalías geoquímicas de las tierras raras pesadas, que como ya se mencionó arriba, Y, Tm (Figura 47, a y b), Tb, Yb (Figura 48, f y g) y Lu (Figura 49) presentan patrones muy similares mostrando una distribución de los mismos al SW y otra pequeña anomalía al noreste del área, el Dy (Figura 48, e) con distribución similar al de las tierras raras ligeras y el Er (Figura 48, h) con una distribución más discreta, al suroeste del área, abarcando así mismo el dominio magnético I.

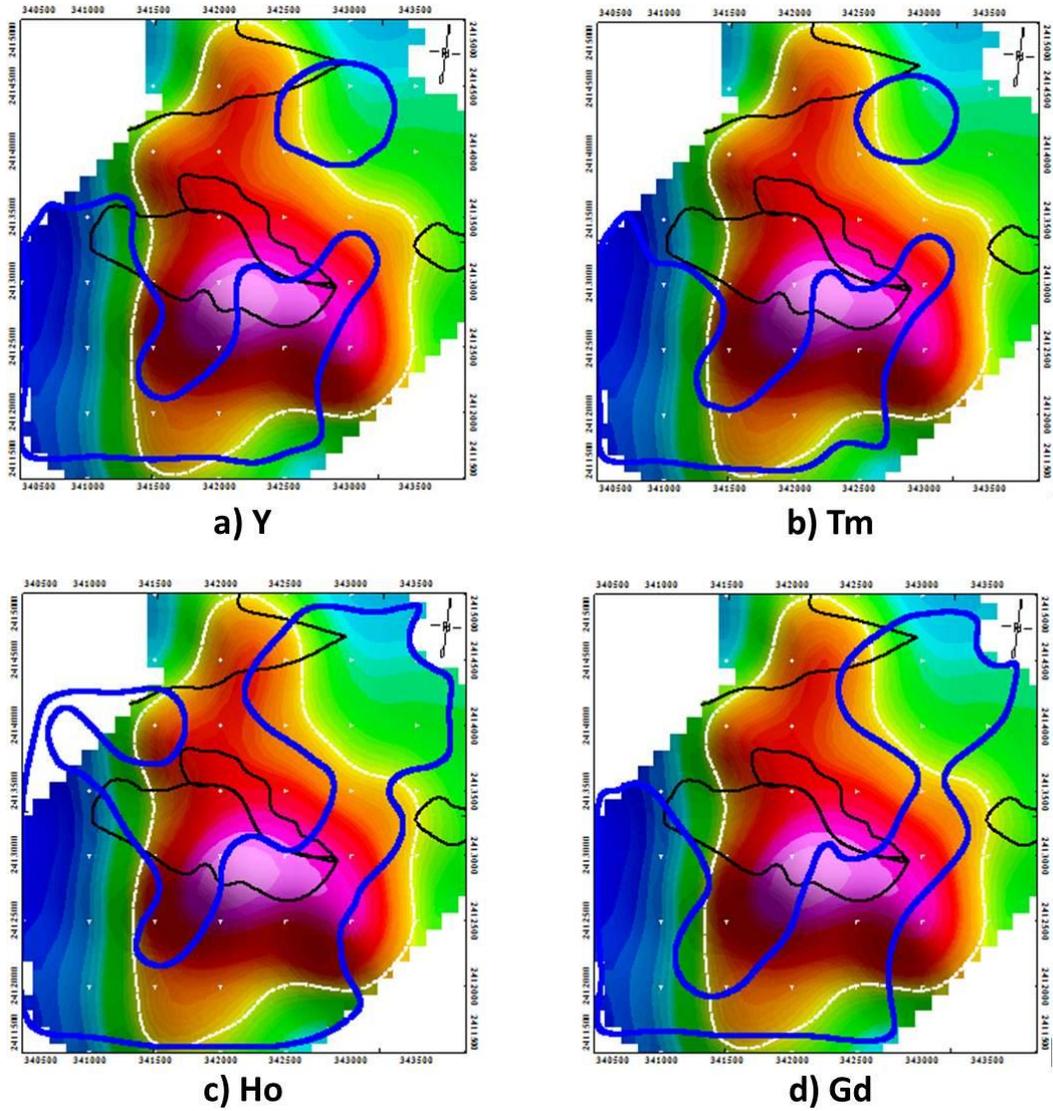


Figura 47. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de a) Itrio (Y), b) Tulio (Tm), c) Holmio (Ho) y d) Gadolinio (Gd) del área de Palo Verde.

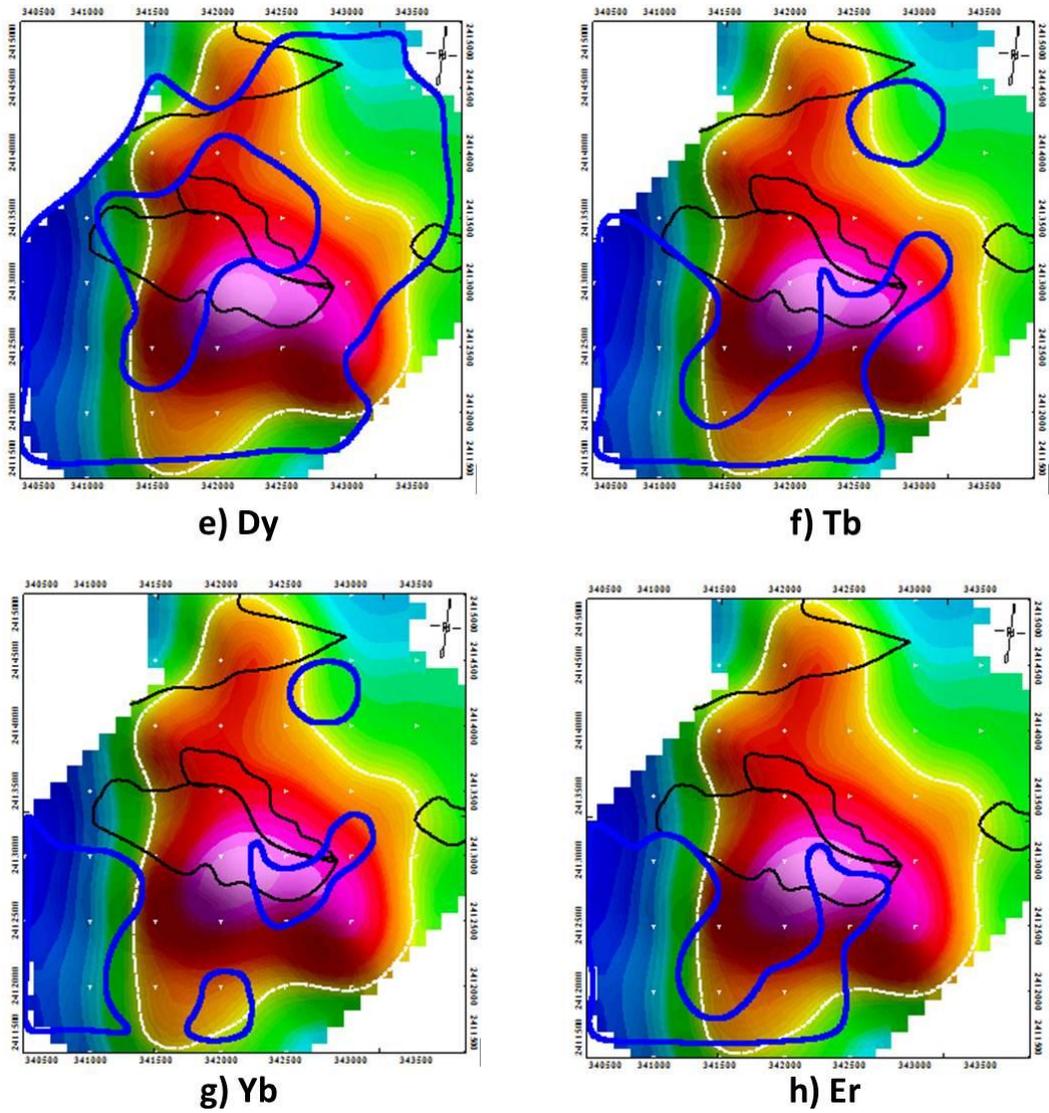
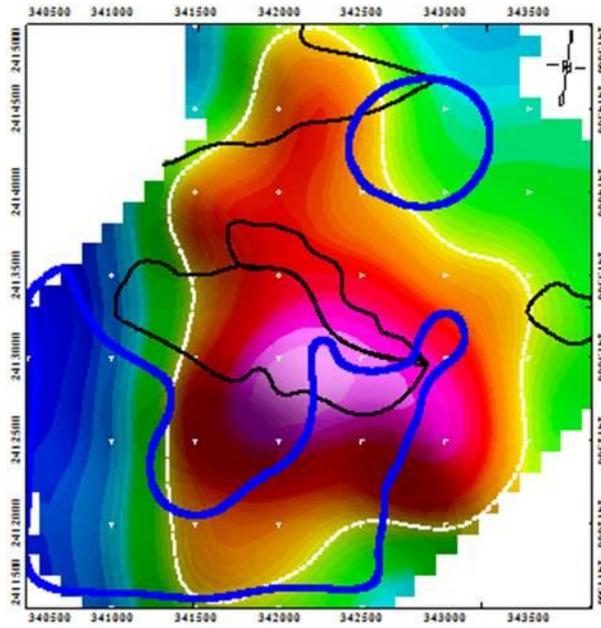


Figura 48. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de e) Disprosio (Dy), f) Terbio (Tb), g) Iterbio (Yb) y h) Erblio (Er) del área de Palo Verde.



i) Lu

Figura 49. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de i) Lutecio (Lu) del área de Palo Verde.

5.6. Geología-Dominios magnéticos-Anomalía elementos asociados a las tierras raras

Existen elementos traza, que aunque no son del grupo de los lantánidos presentan similitudes o afinidades con estos elementos, por lo cual los patrones de dispersión son muy similares, tal es el caso del Talio (Tl), Plomo (Pb), Niobio (Nb), Renio (Re), Torio (Th) y Uranio (U). En la Figura 50 y 51 se pueden ver las distribuciones de estos elementos. Para Tl y Pb (Figura 50, a y b) las distribuciones son muy similares la forma aproximada de la anomalía es similar a un semicírculo (abierto hacia el NE) y abarcan casi en su totalidad todos los dos dominios magnéticos, para el caso del Nb y el Re la forma de la anomalía es similar al semicírculo pero esta vez abierto en dirección NW y de igual manera casi abarcando en su totalidad los dos dominios magnéticos.

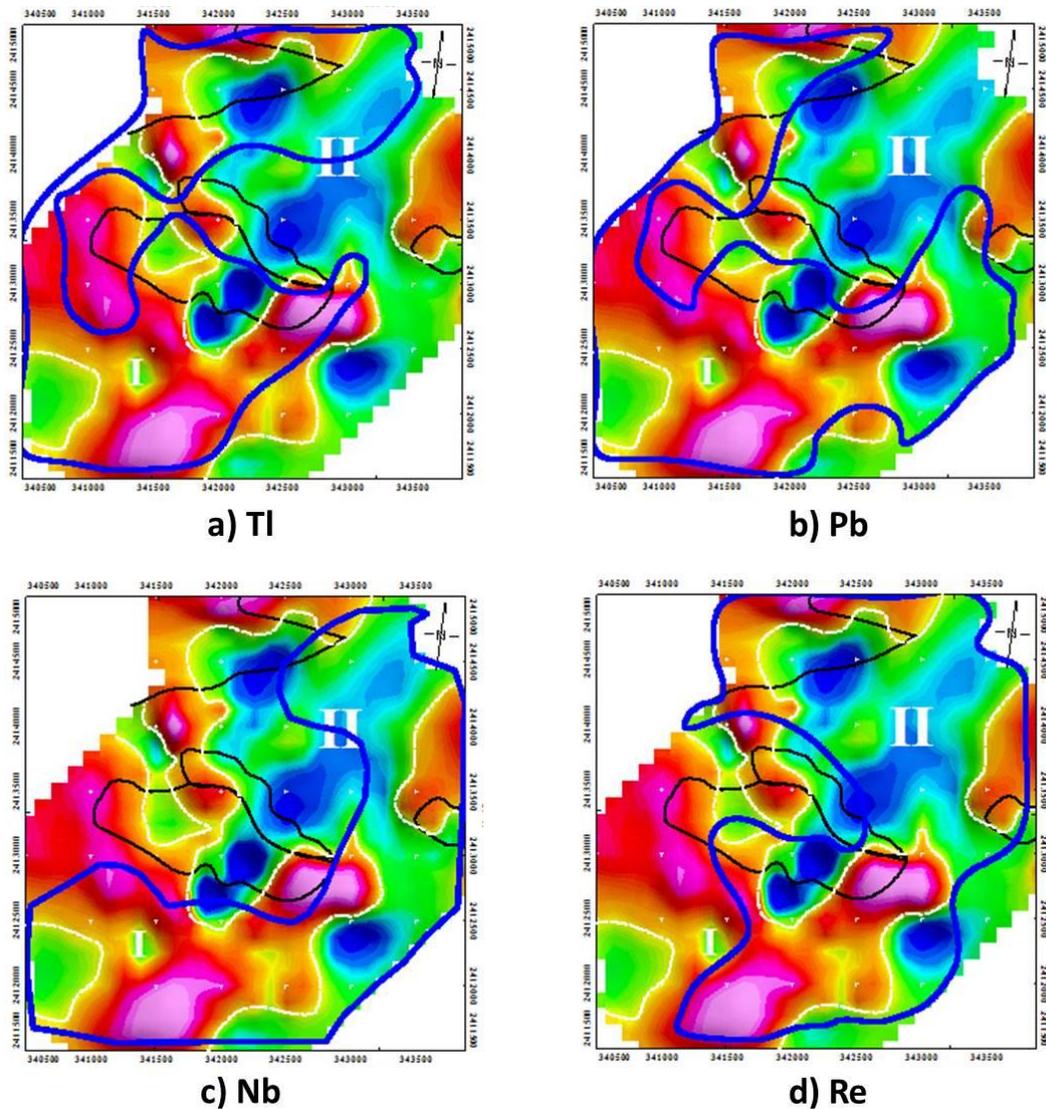


Figura 50. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de a) Tulio (Tl), b) Plomo (Pb), c) Niobio Nb y d) Renio (Re) del área de Palo Verde.

Existen un par de elementos más, que guardan relación con el grupo de los lantánidos, son el Th y U, considerados como elementos radioactivos. En el mapa de la Figura 51 se puede ver la distribución de ambos en relación a los dominios magnéticos, donde se puede percibir que la concentración de ambos es hacia el suroeste del área y que con ello se relacionan al dominios magnético I.

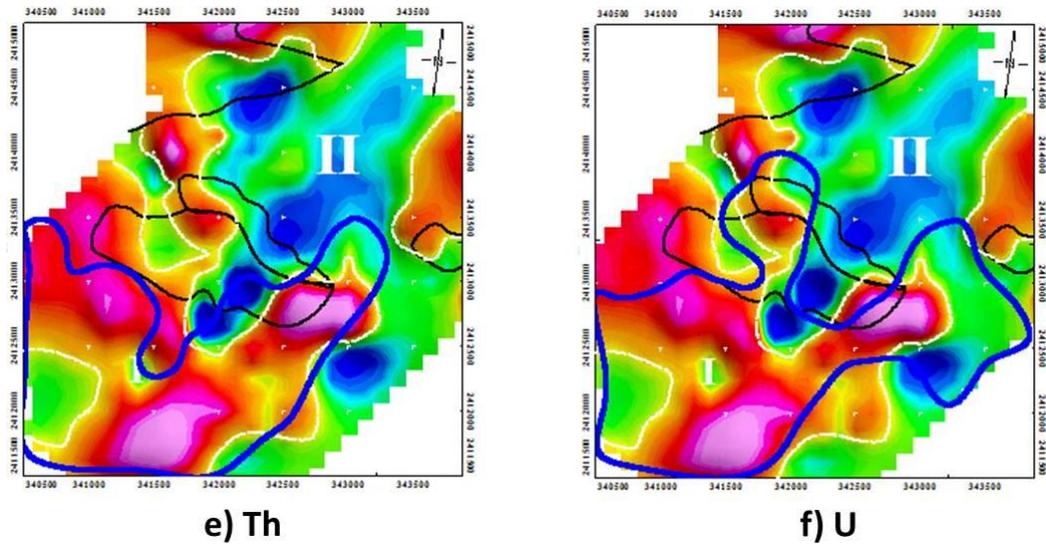


Figura 51. Dominios magnéticos, geología y concentraciones de e) Torio (Th), f) Uranio (U) del área de Palo Verde.

La distribución del U resulta ser un poco más amplia que la del Th, probablemente se deba a que el uranio tiende a ser más fácil de movilizar que el Th.

5.6.1. Geología-CA-400m-SA-CMRP-Anomalía elementos asociados

En los mapas de la continuación ascendente se puede advertir la distribución y la relación estrecha con el cuerpo magnético delimitado previamente para Tl, Pb y Re, hacia la parte central del cuerpo se presenta parte de la anomalía de estos elementos aparentando con ello ser la fuente de los mismos, no así para el Nb en el cual la anomalía pareciera rodear al cuerpo.

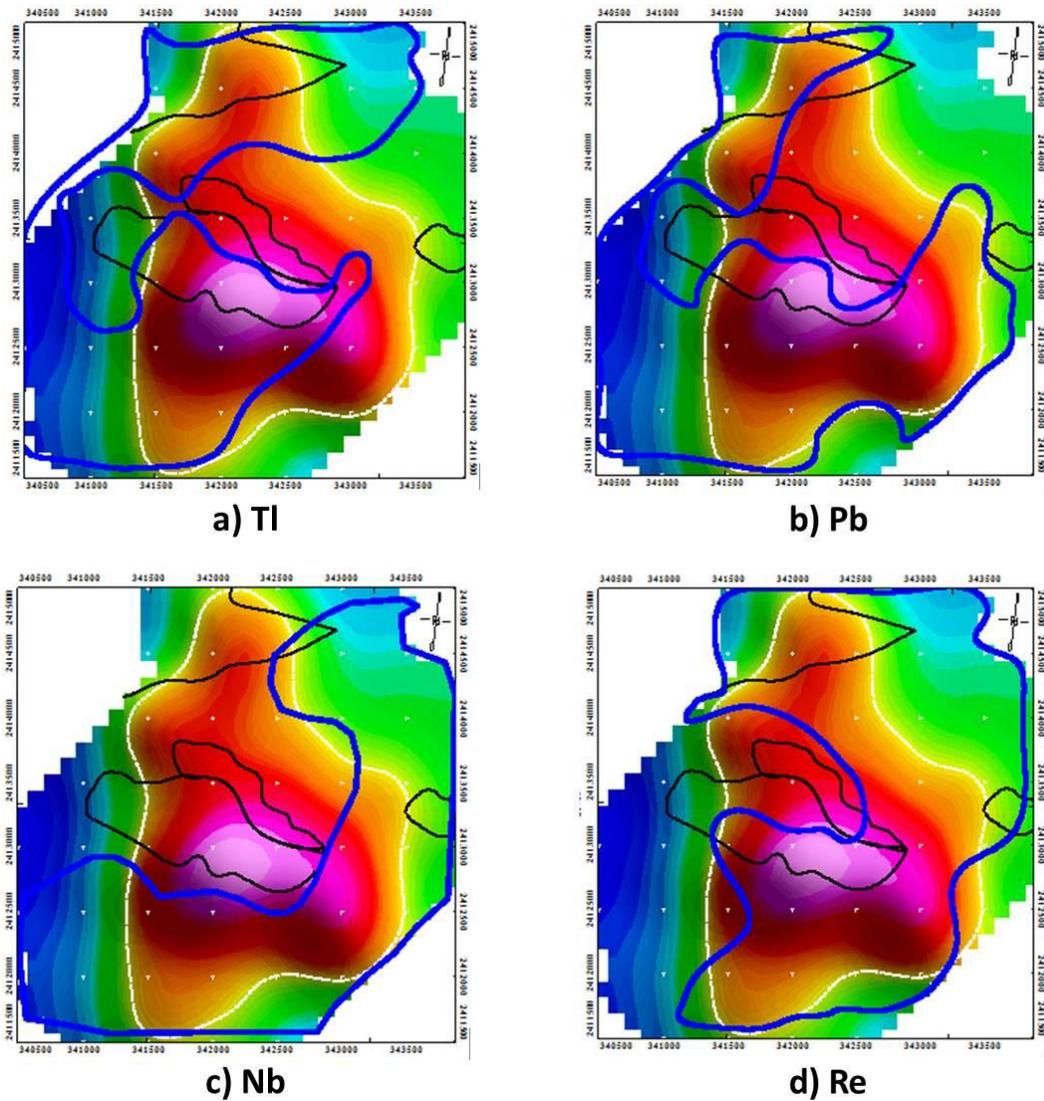


Figura 52. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de a) Tulio (TI), b) Plomo (Pb), c) Niobio (Nb) y d) Renio (Re) del área de Palo Verde.

Para el caso de los mapas de la Figura 53, se percibe como para el caso del U, este está más disperso en comparación con la distribución del Th la cual se concentra solamente al suroeste del área. Aunque sean un poco diferentes las distribuciones de estos elementos, se puede considera como la misma fuente para todas las anomalías del área de Palo Verde.

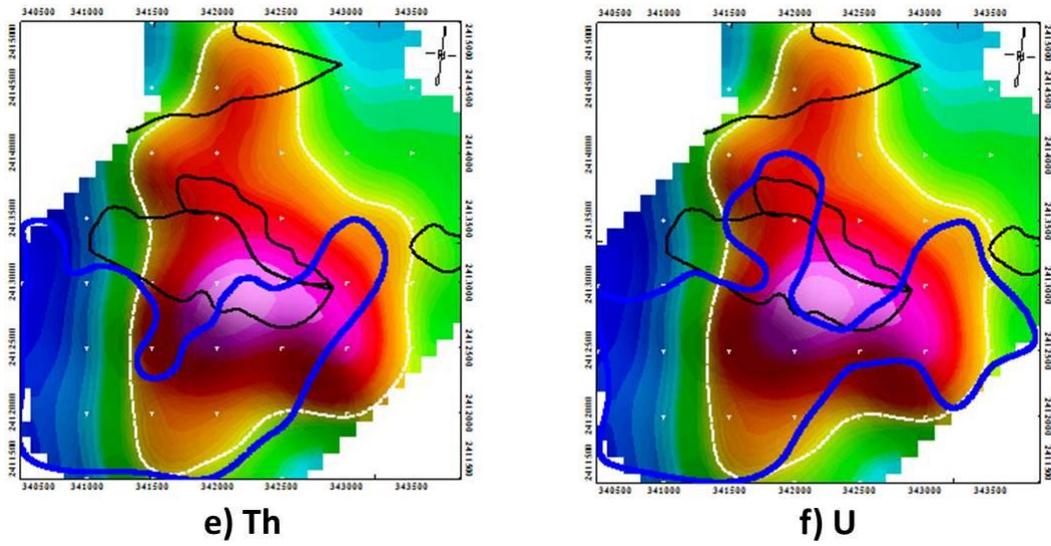


Figura 53. CA-400m-SA-CMRP, geología y concentraciones de e) Torio (Th), f) Uranio (U) del área de Palo Verde.

CONCLUSIONES

El método magnético empleado en el presente estudio, brinda una visión más amplia en cuanto a la geología no solo a nivel local, sino también en un escenario más regional.

Mediante el análisis aeromagnético, se definió una estructura regional con una dirección N-S y dimensiones aproximadas de 145.5 km (en dirección norte-sur) por 89 km (dirección este-oeste).

El análisis regional de los lineamientos permitió establecer tres sistemas principales de fallas, la principal N-S y dos secundarias NW-SE y NE-SW.

En cuanto a la magnetometría local, se delimitaron dos dominios magnéticos, siendo el DM I el de valores de magnetización más altas (> 200 nT), lo cual resulta lógico pues este dominio en realidad es un subdominio del DAM I (a nivel más regional) y de igual manera esta zona corresponde a intensidades de magnetización altas.

El análisis de los lineamientos magnéticos analizados en el área de Palo Verde, permitieron establecer un par de sistemas de fallamiento, siendo el principal NE-SW y en menor proporción NW-SE. La estructura marcada por el *trend* de valores bajos de magnetización con rumbo preferente NE-SW (Figura 31) sugiere que se trata de una falla a profundidad y que ensambla con los lineamientos más regionales que presentan la misma dirección preferente (Figura 26).

El empleo de la continuación ascendente en la señal analítica permitió definir un cuerpo a profundidad, el cual puede ser la extensión del domo riolítico de la zona, pues el valor de magnetización más alto en este cuerpo definido corresponde al afloramiento del domo riolítico (Figura 33).

Adicional al método magnético, se midió la radioactividad de las muestras de roca colectadas en el área, dando como resultado contenidos de radiación relativamente bajos, el promedio de estas lecturas fue de 277.6

cuentas por minuto (CPM) lo cual resulta un valor relativamente normal (para más detalle consultar anexo 2).

El Titanio (Ti), Níquel (Ni), Zinc (Zn), Bario (Ba), Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr) y Samario (Sm), fueron los elementos que resultaron con contenidos por encima del contenido promedio en corteza.

Los diagramas de tierras raras, normalizados a condrita, en términos generales, presentan un ligero enriquecimiento de tierras raras ligeras mientras que las pesadas manifiestan valores casi planos. Del mismo modo se ostenta la anomalía negativa de Europio (Eu), lo cual sugiere el fraccionamiento de la plagioclasa presente en el área.

En lo que respecta a los valores de tierras raras de las muestras de carbonatos, los valores son extremadamente bajos. Tomando en cuenta lo anterior, y bajo a la consigna de que las carbonatitas están enriquecidas en elementos del grupo de los lantánidos (contenidos > 2000 ppm) se descarta la posibilidad de que estos carbonatos se traten de carbonatitas, como se mencionó por García-Gutiérrez (1978).

REFERENCIAS

- Alencaster, G., Torres-Hernández, R., Tristán-González, M., Barbosa-Gudiño, R., López-Doncel, R., J. M., Omaña, L. 1999, El Abra Formation in the western part of the Valles-San Luis Potosí Platform (México) Fifth International Congress on Rudists.
- Breiner, S., 1973, Applications Manual for Portable Magnetometer: GeoMetrics, Sunnyvale, California, 58 pp.
- Cantera-Fernández, J., 2014, Exploración Geofísica en el complejo alcalino El Picacho. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis, 110 pp.
- Cantos, F., 1974, Tratado de Geofísica Aplicada, Litoprint, España, 520 pp.
- Calcina, M., 2009, Un modelo dinámico para el campo geomagnético. Revista Boliviana de Física, 15, 44-62.
- Carrasco, V. B., 1970, La Formación El Abra (formación El Doctor en la Plataforma Valles-San Luis Potosí), Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, 2.
- Carro B., Borrego J., López N. & Lozano O., 2006, Transferencia de Tierras Raras entre la fase disuelta y particulada de un drenaje afectado por drenaje ácido (SO de España), Revista Geogaceta, n 39, España, 111-114.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La plataforma de Valles-San Luis potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos y Petroleros, v.23.
- Campa, M. F. y Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resources distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20 p. 1040-1051.
- Clark-Eulani, L. A., 2015. Exploración de tierras raras en la Provincia Oriental Alcalina Mexicana, en la asignación minera el Picacho, municipio de Villa de Casas, Tamaulipas. Universidad Nacional Autónoma de México, Informe, 76 pp.
- Corona-Esquivel, R., 2014, Las tierras raras y su importancia para el desarrollo tecnológico, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., GEOMIMET, Núm. 309, 46-49.

- Díaz-Viera M. A., 2002, Geoestadística Aplicada, Instituto de Geofísica, UNAM, 131 pp.
- Douglas A. Skoog, F. James Holer, Tomothy A. Nieman. (2001). Principios de análisis instrumental. Madrid, España: McGraw Hill, 1024 pp.
- Flores-Aguillón, G., 1989, Estudio Geológico-Geoquímico a semidetalle del área Milpa Grande, prospecto Rioverde, mpio. De Santa María del Río y Villa de Zaragoza, S.L.P., Consejo de Recursos Minerales, 94 pp.
- García-Gutiérrez L., 1978, Las Carbonatitas. Geología y Metalurgia, VIII, 35-50.
- García-Pérez K., Modelo de emplazamiento de domos félsicos del área San José Alburquerque-Tierra Nueva, estado de San Luis Potosí, y su asociación con el Intrusivo Palo Verde, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.
- Geosoft Inc. "Oasis Montaje Versión 6.4.2. (2007)" Copyright, Geosoft Inc.
- Golden Software Inc., 2002, Manual de Surfer 8.
- González-Piña, M., 2014, Delimitación Aeromagnética del Bloque Jalisco. Implicaciones Geohidrológicas en Tequila, Jalisco., Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis, 186 pp.
- Greenland Minerals and Energy LTD, 2009, Greenland Minerals and Energy LTD 2009 Annual Report, Australia, Reporte, 112 pp.
- Guerrero-Ibarra, C. A., 2012, Geología a detalles del vaso de la presa El Realito, Municipio de Victoria, Guanajuato, Tesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P., 80 pp.
- Grijalva-Rodríguez, T. I., 2014, Tierras raras y metales estratégicos. GEOMIMET, 312, 15-18.
- Harris, D. C., 2012, Análisis químico cuantitativo. España: Editorial Reverte, 1020 pp.
- Haxel B. Gordon, Hendrick B. James y Orris J. Greta., 2002, Rare Earth Elements-Critical Resources of high technology. 2016, de USGS Sitio web: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/
- Henderson, R. y Zietz, I., 1949, The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity field. Geophysics, Vol. 14, 508-516.

- Henderson, R., 1970, On the validity of the use of the upward continuation integral for total magnetic intensity data, *Geophysics* 35, 916 – 919 pp.
- Hergt Thomas, 2009, Diseño optimizado de redes de monitoreo de la calidad del agua de los sistemas de flujo subterráneo en el acuífero 2411 “San Luis Potosí”: Hacia un manejo sustentable, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis (Doctorado), 227 pp.
- Infante-Gil S., 2001, Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario, Editorial Trillas, 130 pp.
- Keppie, J., D. y Ortega-Gutiérrez, F, 2010, 1.3-0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): Remnant of an arc/back arc on the northern margin of Amazonia: *Journal of South American Earth Sciences*, v.29 p. 21-27
- Keith R. Long, Bradley S. Van Gosen, Nora K. Foley, and Daniel Cordier. 2010, The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States, A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective, 2016, de USGS Sitio web: <http://www.usgs.gov/pubprod>
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González M., Martínez, V. J., 1983, Estudio geohidrológico de la Hoja Melchor, Edos. de San Luis Potosí y Guanajuato, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 92, 110 pp.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González M., Aguillón-Robles, A., 1984, Cartografía geológica 1:50 000, Hoja Salitrera, S.L.P., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 94, 101 pp.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González M., Aguillón-Robles, A., Jiménez-López, L.S., Romero, A., 1989, Cartografía geológica 1:50 000, de las hojas El Refugio y Mineral el Realito, Estados de San Luis Potosí y Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 112, 81 pp.
- López-Loera H., 2002, Estudio de las Anomalías Magnéticas y su relación con las Estructuras Geológicas y Actividad Eruptiva de los Complejos Volcánicos Activos de Colima y Popocatepetl, México., Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis (Doctorado), 238 pp.

- López-Loera, H., 2011, Estudio aeromagnético del complejo volcánico de Colima, occidente de México – implicaciones tectónicas y estructurales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 28, Núm. 3, 349 – 370.
- López-Loera, H. & Tristán-González, M., 2013, Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana*, Vol.65, Núm. 1, 137-156.
- López-Rodríguez, J. J., 2001, Informe de la carta geológico-minera La Salitrera clave F14-C15 escala 1:50,000, estado de San Luis Potosí, Consejo de Recursos Minerales, 65 pp.
- Lucio-Saldaña, A. I., 2011, Medición de elementos mayores y traza en muestras graníticas utilizando la técnica de ICP-OES. Universidad Tecnológica de Querétaro, Memorias, 71 pp.
- Matheron G., 1970, La Théorie del variables regionalisées et ses applications, Center de Geoestatistique et de Morphologie Mathematique, Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris, 212 pp.
- Montero-Montero, E., 2012, La crisis de las tierras raras. Un testimonio de la irracionalidad de nuestro modelo, Universidad de Cádiz, 53 pp.
- McIntire W.L., 1963, Trace elements partition coefficients-a review of theory and applications to geology, Elsevier, v 27, 1209-1264.
- Murray-Spiegel R., 1991, Estadística, España. McGraw Hill Interamericana de España, 138 pp.
- 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, pp. 507–517.
- NOAA, 2014, International Geomagnetic Reference Field. 2016, de NOAA Sitio web: <https://www.ngdc.noaa.gov/IGAG/vmod/igrf.html>
- Ortiz-Aguirre R., 1976, Principios de exploración geoquímica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 291 pp.
- Parasnis, D. S., 1979, Principles of Applied geophysics, 3ed ed., London Chapman and Hall, 275 pp.

Parasnis, D. S., 1973. Mining Geophysics. Elsevier Publishing Company, Amsterdam London New York., 26-47.

Periodic table of the elements, 2016, International Union of Pure and Applied Chemistry, 2016, Sitio web: https://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/news/IUPAC_Periodic_Table-8Jan16.pdf

Purcell, M. E., 1988, Electricidad y magnetismo. España: Reverté. P 472.
Ministerio de minería, 2016, Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. COCHILCO, 55 pp.

Ramírez-Fernández, J.A. y Keller J., 2000, Relaciones genéticas entre las carbonatitas y las rocas nefelínicas del complejo El Picacho, Sierra de Tamaulipas, NE de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 17, 45-65.

Raymond A., Serway John W. Jewett Jr., 2009, Física. Electricidad y magnetismo. México, D.F.: Cengage Learning, 851 pp.

Rose A. W., Herbert E. Hawkes, John S. W, 1979, Geochemistry in mineral exploration, London: Academic Press, 657 pp.

Ruiz, J., Kesler, S.E., Jones, L.M. y Sutter, J.F., 1980, Geology and geochemistry of the Las Cuevas fluorite deposit, San Luis Potosí, México:Econ. Geol., Vol. 75, 1200-1209.

Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica. (1992). Monografía Geológico-Minera del estado de San Luis Potosí. México: Talleres Gráficos de la nación.

Skoog D.A., West D.M. y Holler F.J., 2001, Química Analítica, sexta edición, Mc Graw Hill, 858 pp.

Sun, S. S., Mc Donough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, from saunders, A. D. y Norry, M. J.(eds), 1989, Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society Special Publication No. 42, 313-345.

Terraplus, 2015, KT-20 Magnetic susceptibility and conductivity meter. User's guide. Canada, Terraplus Inc., 10 pp.

Telford W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys D.S.1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, Second Edition, 770 pp.

- Torres-Gaitán, D. E., 2013, Estudio Geofísico aplicado a la exploración minera en El Milagro de Guadalupe, municipio de Guadalcázar, estado de San Luis Potosí, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis, 195 pp.
- Tristán-González, M., 1987, Cartografía Geológica de la Hoja Tierra Nueva, S.L.P., 1:50000, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 109.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., Labarthe-Hernández, G., 2009, Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de san Luis Potosí, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 61, 287-303.
- USGS, 2010, The Principal Rare Earth Deposits of the United State- A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. USGS., 104 pp.
- Vargas-Rodríguez, L. E., 2007, Dispersión geoquímica secundaria de los principales elementos lantánidos en la cuenca del río Chancay-Lambayeque. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú, Tesis, 169 pp.
- Villela-Olavarria D., Donoso Rojas F.y Cantallopts Araya Jorge, 2016, Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 55 pp.