



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE HIDALGO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA  
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES  
INGENIERIA EN GEOLOGIA AMBIENTAL**

**DETERMINACIÓN DE ANOMALÍAS DE  
TIERRAS RARAS EN UN YACIMIENTO SEDEX  
EN XOCHICOATLÁN, HIDALGO, MÉXICO**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL**

**P R E S E N T A**

**Diana Maleni Morales Rendón**

**Directores de tesis:**

**Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz**

**Dr. Ventura Rodríguez Lugo**

**Mineral de la Reforma, Hgo., Julio de 2016**

## *Declaración del autor*

El presente trabajo de tesis de investigación: “*Determinación de anomalías de tierras raras en un yacimiento sedex en Xochicotlán, Hidalgo, México*” se presenta en cumplimiento con los requerimientos para obtener el título de Ingeniero en Geología Ambiental en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, y fue realizado con el financiamiento del proyecto: Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica Conacyt – Gobierno del Estado de Hidalgo, núm. 000000000193180 a través del proyecto denominado “Creación de un Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Estado de Hidalgo”.

Citas breves de este trabajo son admisibles sin permiso especial, siempre y cuando estén provistas del exacto reconocimiento de la fuente citada del trabajo aquí presentado. No obstante, se requiere solicitar permiso para citas extendidas o reproducción de este manuscrito en forma parcial o en su totalidad que puede ser concedido por el titular de los derechos de autor.

Firma

***Diana Maleni Morales Rendón***

Los directores de tesis abajo firmantes declaramos que este trabajo ha sido revisado y aprobado; que se trata de un trabajo original y no tiene parte alguna de algún otro trabajo anterior.

***Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz***

***Dr. Ventura Rodríguez Lugo***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi casa de estudios, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, y al Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, por el apoyo que recibido durante la elaboración de este trabajo de tesis y durante mi formación profesional.

Agradezco al financiamiento del Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT Gobierno del Estado de Hidalgo, núm. 00000000193180, por su apoyo a través del proyecto denominado “Creación de un Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Estado de Hidalgo”.

Agradezco a mis asesores, el Dr. Eduardo Cerecedo y al Dr. Ventura por su apoyo y enseñanzas, aprendidas durante la elaboración de este proyecto, por haberme dado la oportunidad de trabajar con ustedes.

Agradezco al Dr. Eleazar Rodríguez, porque creyó en mi para la elaboración de este trabajo, por apoyarnos en las salidas de campo, muchas gracias.

Agradezco al Dr. Juan Ávila por haberme apoyado con los análisis de Microscopia Electrónica de Barrido y por ayudarme a su interpretación.

Al mismo tiempo agradezco al Dr. Alberto Arenas por su apoyo con los análisis de Difracción de Rayos X, enseñarme el procedimiento y también por ayudarme con la interpretación.

Al Ing. Ramón Lugo, por su apoyo en la elaboración de la carta geológica del área de Xochicoatlán, Hidalgo. Sus observaciones fueron de gran ayuda.

Dr. Enrique Cruz Chávez por su apoyo durante todo este tiempo, por darme ánimos y no dejarme tirar la toalla, gracias por todo.

## **DEDICATORIA**

*Quiero agradecer y dedicar a Dios primero que nada porque sin el nada de esto hubiera sido posible.*

*A mis abuelitos Rufina † y Pedro † que se fueron muy pronto al cielo y que no pudieron estar conmigo no tuve tiempo de decirles cuanto los quiero, espero estas palabras lleguen a hasta lo más alto del cielo.*

*A mis abuelitos Dionicio y Ma. Luisa por estar conmigo en todo momento y ser unos abuelitos muy consentidores, los quiero mucho.*

*A mi mamá por haberme dado la vida, por darme su apoyo incondicionalmente y sobre todo por todo el amor que me has dado, por acompañarme siempre a donde he querido estar, eres la mejor mami del mundo, sin tu apoyo no hubiera logrado este sueño.*

*A ti papá porque has sacrificado muchas cosas para que logre mis sueños, te amo mucho, eres el mejor papa del mundo, no existe hombre más maravilloso que tú.*

*A mis hermanos Edgar y Jorge por esos pequeños momentos en los que hemos podido estar juntos y la pasamos muy bien, lo quiero mucho y donde quiera que estén siempre están en mi corazón, y a Marco Antonio † que aunque no te conocí siempre en mi corazón te quiero mucho.*

*A mi geólogo favorito, Alejandro, gracias por darme tu apoyo incondicional, en esos días que la tesis no iba muy bien, por días que no pude estar contigo por las salidas a campo, todo ese esfuerzo esta hoy aquí, gracias a tu apoyo.*

# ÍNDICE

Capítulos	Página
ÍNDICE .....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO 1 ANTECEDENTES .....	15
1.1. YACIMIENTOS MINERALES .....	15
1.1.1. Las menas metálicas.....	18
1.1.2. Origen de las menas metálicas.....	19
1.1.3. Clasificación De Yacimientos Minerales .....	20
1.1.4. Yacimientos Secundarios .....	22
1.1.5. Yacimientos Sedimentarios Exhalativos (SEDEX) .....	25
1.2. TIERRAS RARAS.....	28
1.2.1. Propiedades Físicas Y Químicas.....	30
1.2.2. Análisis Geoquímico De Las Tierras Raras .....	31
1.2.3. Usos Y Aplicaciones De Las Tierras Raras .....	34
1.2.4. Las Tierras Raras En El Mundo.....	35
CAPITULO 2 MARCO GEOLÓGICO .....	42
2.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	42
2.1.1 Gneis Huiznopala.....	42
2.1.2 formación otlamalacatla.....	43
2.1.3 formación tuzancoa .....	43
2.1.4 Formación Huayacocotla.....	43
2.1.5. Formación Cahuwasas .....	45
2.1.6 Formación Tepexic.....	46
2.1.7 Formación Santiago .....	47
2.2.8 Formación Chipoco .....	48
2.1.9 Formación Pimienta .....	49

2.1.10 Formación Tlanchinol .....	50
2.1.11 Formación Atotonilco El Grande.....	51
2.2. GEOLOGÍA LOCAL .....	52
2.3. ESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA CON RELACIÓN AL ORIGEN DEL GOLFO DE MÉXICO .....	55
2.3.1. Principales Eventos Tectónicos .....	55
2.3.2. Eventos De Compresión.....	56
2.3.3. Eventos De Extensión .....	56
2.3.4. Mega Estructura De Molango .....	57
CAPITULO 3 METODOS GEOQUIMICOS DE EXPLORACION Y TECNICAS DE CARACTERIZACION.....	59
3.1. LOS MÉTODOS GEOQUÍMICOS DE EXPLORACIÓN .....	59
3.2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	59
3.3 MUESTREO .....	60
3.4. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) .....	62
3.4.1. Preparación De La Muestra.....	63
3.5. ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍAS (MEB-EDS).....	63
3.5.1. Preparación De La Muestra.....	64
3.6. ANALISIS POR PLASMA DE INDUCCION ACOPLADA (ICP).....	64
3.6.1. Preparación De La Muestra .....	65
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67
4.1. RESULTADOS.....	67
4.1.1. Caracterizacion Por Difraccion De Rayos X (DRX).....	67
4.1.2. Caracterización Microestructural Por Microscopia Electronica de Barrido y Espectrometria de Energia Dispersiva (MEB-EDS) .....	77
4.1.3. Caracterizacion Por Plasma De Acoplamiento Inductivo (ICP) .....	98
4.3. DISCUSION.....	105
CONCLUSIONES .....	107
REFERENCIAS .....	114

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>1.1</b>	Esquema de un magma con las etapas fundamentales del proceso de segregación	15
<b>Figura</b>	<b>1.2</b>	Esquema de la formación de zonas de oxidación y cementación sobre un deposito filoniano de sulfuros.	18
<b>Figura</b>	<b>1.3</b>	Tierras raras en la tabla periódica	29
<b>Figura</b>	<b>1.4</b>	China el mayor productor de Tierras Raras	36
<b>Figura</b>	<b>1.5</b>	Prospección de Tierras Raras en algunos estados de México	33
<b>Figura</b>	<b>1.6</b>	En el complejo oaxaqueño existe la posible presencia de Tierras Raras	38
<b>Figura</b>	<b>1.7</b>	Diagrama de las muestras donde se obtuvo Tierras Raras	39
<b>Figura</b>	<b>2.1</b>	Afloramiento de la Formación Huayacocotla, en el puente del Rio Chinameca	45
<b>Figura</b>	<b>2.2</b>	Afloramiento de la Formación Tepexic	47
<b>Figura</b>	<b>2.3</b>	Afloramiento de la Formación Chipoco	49
<b>Figura</b>	<b>2.4</b>	Afloramiento de la Formación Pimienta	50
<b>Figura</b>	<b>2.5</b>	Derrames de basalto de la Formación Atotonilco El Grande	51
<b>Figura</b>	<b>2.6</b>	Se observa la estratificación de la Formación Huayacocotla intemperizada.	52
<b>Figura</b>	<b>2.7</b>	Se observa la mineralización tipo Stockwork.	53
<b>Figura</b>	<b>2.8</b>	Se observa la diseminación de pirita.	53
<b>Figura</b>	<b>2.9</b>	Correlación estratigráfica del área de Xochicoatlán, Hidalgo.	54
<b>Figura</b>	<b>3.1</b>	Localización y vías de acceso del área de estudio.	60
<b>Figura</b>	<b>3.2</b>	Máquina de barrenación en el área de estudio.	61
<b>Figura</b>	<b>3.3</b>	Difractómetro Marca Inel, modelo Equinox 2000	62
<b>Figura</b>	<b>3.4</b>	Microscopio JEOL JSM-6300 y equipado con un detector EDS.	64
<b>Figura</b>	<b>4.1</b>	Difractograma de la muestra XOCH-100	67
<b>Figura</b>	<b>4.2</b>	Difractograma de la muestra XOCH-200	68
<b>Figura</b>	<b>4.3</b>	Difractograma de la muestra XOCH-300	69
<b>Figura</b>	<b>4.4</b>	Difractograma de la muestra XOCH-400	70
<b>Figura</b>	<b>4.5</b>	Difractograma de la muestra XOCH-500	71
<b>Figura</b>	<b>4.6</b>	Difractograma de la muestra XOCH-600	72
<b>Figura</b>	<b>4.7</b>	Difractograma de la muestra XOCH-700	73

<b>Figura</b>	<b>4.8</b>	Difractograma de la muestra XOCH-800	74
<b>Figura</b>	<b>4.9</b>	Difractograma de la muestra XOCH-900	75
<b>Figura</b>	<b>4.10</b>	Distribucion de minerales por medio de DRX, en el nucleo de barrenacion	76
<b>Figura</b>	<b>4.11</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-100.	78
<b>Figura</b>	<b>4.12</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-200.	80
<b>Figura</b>	<b>4.13</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-300.	82
<b>Figura</b>	<b>4.14</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-400.	84
<b>Figura</b>	<b>4.15</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-500.	87
<b>Figura</b>	<b>4.16</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-600.	89
<b>Figura</b>	<b>4.17</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-700.	91
<b>Figura</b>	<b>4.18</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-800.	93
<b>Figura</b>	<b>4.19</b>	Se muestra la microfotografia de la muestra XOCH-900.	95
<b>Figura</b>	<b>4.20</b>	Perfiles de concentracion a profundidad por medio de EDS	97
<b>Figura</b>	<b>4.21</b>	Diagrama de multielementos, utilizado para comparar el valor de UCC, con una muestra de la zona mineralizada, y una muestra estéril de la lutita de la Formación Huayacocotla.	100
<b>Figura</b>	<b>4.22</b>	Comparacion de elementos del pérmico, Fm. Huayacocotla y del área de estudio.	101
<b>Figura</b>	<b>4.23</b>	Diagrama Cr/V vs Y/Ni	102



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Distribución de los elementos en la corteza terrestre	14
<b>Tabla 1.2</b>	Tierras Raras Ligeras y Tierras Raras Pesadas	28
<b>Tabla 3.1</b>	Datos de las muestras	61
<b>Tabla 4.1</b>	Muestra XOCH-100	79
<b>Tabla 4.2</b>	Muestra XOCH-200	81
<b>Tabla 4.3</b>	Muestra XOCH-300	83
<b>Tabla 4.4</b>	Muestra XOCH-400	85
<b>Tabla 4.5</b>	Muestra XOCH-500	87
<b>Tabla 4.6</b>	Muestra XOCH-600	90
<b>Tabla 4.7</b>	Muestra XOCH-700	92
<b>Tabla 4.8</b>	Muestra XOCH-800	94
<b>Tabla 4.9</b>	Muestra XOCH-900	96
<b>Tabla 4.10</b>	Concentración de elementos traza en diferentes zonas.	99
<b>Tabla 4.11</b>	Resultados del analisis de ICP	103,104

---

## RESUMEN

En el presente trabajo se determinaron tierras raras en un yacimiento sedimentario exhalativo (SEDEX) en el area de Xochicoatlán, Hidalgo, México. Así mismo, a partir del trabajo de campo se localizó y se extrajo un núcleo de barrenacion de 9 metros, emplazado en la Formación Huayacocotla de edad Jurásico inferior, el cual se caracterizó mediante Microscopia Electrónica de Barrido en conjunción con Espectrometría de Energías Dispersivas (MEB-EDS), Difracción de Rayos X (DRX), y Plasma de Inducción Acoplado (ICP).

Por medio de DRX, se logró identificar: Cuarzo, Albita, Mogonita, Monacita, Wurzita, Pirita, Calcopirita, Argentopirita, Ilmenita y Moscovita. Se infiere que la calcopirita es vestigio de una posible removilizacion hidrotermal con metamorfismo de bajo grado, y la pirita fue formada en un ambiente reductor; además, las fase de exhalita la forman el cuarzo, mogonita y albita; entre tanto, la mena de las tierras raras es la monacita.

Así mismo, el análisis por MEB muestra diferentes morfologías con la típica macla de albita, y minerales de muscovita, que van de 0.1  $\mu\text{m}$  a 13.6  $\mu\text{m}$ . El análisis por EDS revelo contenidos de C, O, Mg, Al, Si, K, Ti, Fe, que permitió conocer su distribución a profundidad. Por otro lado, los análisis por medio de ICP se obtuvieron valores de PGE (elementos del grupo del platino) Au = 0.02 g/mt, Pd = 0.05 g/mt, Pt = 0.05 g/mt, de metales base de Zn = 30 ppm, Pb = 8.1 ppm, Cu = 7 ppm, y de tierras raras de Y = 8.8 ppm, La = 9 ppm, Ce = 19.5 ppm, Pr = 2.5 ppm, Nd = 9.5 ppm, Sm = 1.9 ppm, Eu = 0.4 ppm, Gd = 1.6 ppm, Tb = 0.3 ppm, Dy = 1.5 ppm, Ho = 0.3 ppm, Er = 0.9 ppm, Tm = 0.1 ppm y Yb = 0.7 ppm. Valores que muestran anomalías positivas de REE (tierras raras ligeras) en comparación con condrita normalizada (UCC) que reflejan una afinidad félsica del yacimiento.

Finalmente, la litología sedimentaria; las raices exhalativas observadas en campo, la presencia de minerales exhalativos de cuarzo, micas de biotita, y minerales de removilizacion hidrotermal de calcopirita, con la presencia mayoritaria de cuarzo y metales base de Zn, Cu Pb, y S, muestran que se trata de un yacimiento SEDEX de Zn del subtipo Selwyn.

---

---

## INTRODUCCIÓN

El trabajo aquí presentado, tiene como finalidad determinar anomalías de tierras raras en un yacimiento SEDEX en Xochicoatlán, Hidalgo, México, para establecer su mineralogía y zonación. A partir de la prospección geológica minera estratégica preliminar con base en métodos indirectos de exploración.

En efecto, la minería es de importancia económica y estratégica en nuestro país por su calidad de productor primario de materias primas, por lo que la obtención de minerales es considerada la cuarta actividad económica que aporta al PIB nacional, y que da impulso a la economía; es por ello que el presente trabajo es de suma importancia debido a que es necesario incrementar las reservas minerales a través de la implementación de un método idóneo y económico de exploración como son los métodos indirectos, y en particular, para minerales estratégicos del grupo del platino por su siglas en inglés (PGE) de los que se desconoce su existencia hasta ahora en México; así como de yacimientos de tierras raras cuya prospección es muy limitada en nuestro país; además, en nuestro estado no se ha realizado prospección sobre metales base, y es la primera ocasión que se realiza prospección de ese tipo en el oriente del estado de Hidalgo.

Por eso se propone aquí un esquema de trabajo completo con base en el contexto geodinámico, estratigráfico y geoquímico. Para lo cual se consideran los trabajos previos realizados en el área de estudio y bibliografía selecta sobre yacimientos minerales, que se muestran en el capítulo I.

Entre tanto, en el capítulo II, se trata la geología regional, la geología local, y se muestran las evidencias geológicas de guías de prospección, además, de los minerales presentes en los yacimientos sedex.

En el capítulo III, se tratan las técnicas de caracterización empleadas en este trabajo y se hace mención del análisis instrumental por medio de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS) Difracción de Rayos X (DRX) y por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP).

---

---

Por último, en el capítulo IV, se interpretan los resultados obtenidos por los métodos de caracterización antes mencionados, y la relación con los contenidos de tierras raras y metales base en el yacimiento.

Cabe mencionar que una de las principales interrogantes en la prospección de yacimientos tipo SEDEX es el tipo de ambiente predominante en su formación; que puede ser oxidante o reductor, por lo que determinar la afinidad del yacimiento es importante porque de ello dependerá la estimación inicial de tonelaje y sus contenidos metálicos.

---

# CAPITULO I

---

*ANTECEDENTES*

---

## CAPITULO 1 ANTECEDENTES

### 1.1. YACIMIENTOS MINERALES

Los elementos químicos que componen nuestro planeta están distribuidos de una forma que a grandes rasgos es muy regular, ya que depende de dos grandes factores lo cuales son su abundancia en cada una de las capas que componen el planeta y la naturaleza y composición de las rocas presentes en cada sector concreto que analicemos.

Sobre la base de los datos conocidos sobre la naturaleza y composición geoquímica, mineralógica y petrológica de las diferentes capas en que está dividido nuestro planeta, la composición es simple y homogénea en la zona más profunda (núcleo), e intermedia en el manto, mientras que la capa más superficial (la corteza) presenta una composición más compleja y heterogénea. (Park & McDiarmid, 1981). Esto último se debe a su vez a dos factores:

- El hecho de que la diferenciación planetaria haya producido un enriquecimiento relativo de esta capa en los elementos más ligeros, que no tienen cabida en los minerales que componen el manto, que son de composición relativamente simple: fundamentalmente silicatos de Mg y Fe. Eso hace que con respecto al manto, la corteza sólo esté empobrecida en elementos como Fe y Mg (en lo que se refiere a elementos mayoritarios) y Ni, Cr, Pt, en lo que se refiere a minoritarios o trazas.
- La mayor complejidad de los procesos geológicos que operan en la corteza produce fenómenos muy variados de enriquecimiento o empobrecimiento de carácter local, que afectan a la concentración de los distintos elementos químicos de diferentes maneras.

De esta forma se entiende que la corteza consiste en aquel segmento del planeta en el que se rompe la homogeneidad de la distribución de los elementos que se encuentran en capas más profundas. Por ejemplo, a pesar de que existan algunas variaciones composicionales en el manto, éstas son insignificantes con respecto a

---

la altísima variabilidad que se observa en la corteza. Identificando rocas ígneas que independientemente de su lugar de origen (manto astenosférico, manto litosférico, corteza) van desde composiciones peridotíticas hasta las graníticas. Es en la corteza donde, además se encuentran las rocas sedimentarias y metamórficas. (Park & McDiarmid, 1981)

Los procesos que llevan a la diferenciación de un magma, o a la formación de una roca sedimentaria o metamórfica implican en ocasiones transformaciones profundas químico-mineralógicas. Es durante el curso de esos procesos que algunos elementos o minerales pueden concentrarse selectivamente, muy por encima de sus valores "normales" para un tipo determinado de roca, dando origen concentraciones "anómalas" que de aquí en adelante denominaremos yacimientos minerales. (Guilbert & Park, 1986)

El carácter "anómalo" de estas concentraciones hace que los yacimientos constituyan singularidades en la corteza terrestre.

Es muy importante considerar el aspecto geoquímico del concepto: todos los elementos químicos están distribuidos en la corteza de forma muy amplia, aunque en general su concentración en las rocas es demasiado baja como para permitir que su extracción de las rocas resulte rentable. Como se ha explicado, su concentración para dar lugar a un yacimiento mineral se produce como consecuencia de algún proceso geológico (ígneo, sedimentario o metamórfico) que provoca la concentración del elemento. Por ejemplo, el oro que se encuentra concentrado en los yacimientos sedimentarios de tipo placer puede proceder del oro diseminado en áreas de gran extensión regional. En esas áreas el oro estará presente en las rocas, pero en concentraciones demasiado bajas como para poder ser extraído con una rentabilidad económica. Sin embargo, el proceso sedimentario produce su concentración en los aluviones o en playas, posibilitando en algunos casos su extracción económica. (Park & McDiarmid, 1981)

En definitiva, para que un elemento sea explotable en un yacimiento mineral, su concentración debe ser muy superior a su concentración media en la corteza terrestre.

---

El otro factor importante a considerar es el económico: esas concentraciones podrán ser o no de interés económico, lo que delimita el concepto de Yacimiento explotable o no explotable, en función de factores muy variados, entre los que a primera vista destacan algunos como el valor económico del mineral o minerales extraídos, su concentración o ley, el volumen de las reservas, la mayor o menos proximidad de puntos de consumo, la evolución previsible del mercado, etc., factores algunos fácilmente identificables, mientras que otros son casi imposibles de conocer de antemano. (Guilbert & Park, 1986)

Esta conjunción de factores geológicos y económicos hace que el estudio de los yacimientos minerales sea una cuestión compleja y problemática, en la que hay que conjugar la labor de especialistas de distintos campos, ya que incluye desde las cuestiones que afectan a la prospección o búsqueda de estas concentraciones, su evaluación, el diseño y seguimiento de su explotación minera, el estudio de la viabilidad económica de la explotación, el análisis del mercado previsible para nuestro producto, hasta factores políticos (estabilidad económica y social de un país) o cuestiones medioambientales, como la recuperación de los espacios afectados por esta actividad. (Park & McDiarmid, 1981)

El término de yacimiento mineral se he venido utilizando tradicionalmente para referirnos únicamente a los yacimientos de minerales metálicos, que se emplean para obtener una mena, de la que se extrae un metal. Es el caso, por ejemplo, del cinabrio, que se explota para la extracción del mercurio. No obstante, el auge de las explotaciones de minerales y rocas industriales, y la similitud de los procesos que dan origen a los yacimientos metálicos y de rocas y minerales industriales hacen que esta precisión no tenga ya sentido. De esta forma, en este temario se va a abordar de forma integral el estudio de ambos. (Guilbert & Park, 1986)



---

### **1.1.1. Las menas metálicas**

Una mena metálica es una asociación de minerales, que a partir de la cual uno o varios metales pueden ser obtenidos de forma económicamente favorable considerando diferentes factores como son; la ley, que es el contenido del metal o metales potencialmente extraíbles, el precio del metal en el mercado, los costos de explotación minera que dependen del tamaño y tipo del yacimiento, los costos de los procesos extractivos que dependen de las características físico-químicas de la mena como de las del metal que se va a obtener en mayor proporción; además, de los elementos tóxicos presentes, de impurezas, o de difícil comercialización como As, Hg, Bi, y Cd.

Debido a que los factores económicos son cambiantes entre las naciones, las cotizaciones son continuamente alteradas en los precios de los metales, así como el descubrimiento de nuevos yacimientos, y el agotamiento de otros conocidos pueden cambiar el estatus de mena para un material en particular; por ejemplo, el precio del oro durante la última década permitió explotar yacimientos en nuestro país hasta de 1 g/t de Au, y por el contrario, menas de gran volumen de cobre con valores de 1% de Cu; un caso aparte lo constituyen los platinoideos ya que no se tienen documentados yacimientos conocidos de ellos en nuestro país, y los pocos informes son muy limitados en cuanto a contenidos de tierras raras.

Por otro lado, en la actualidad los avances tecnológicos ha conducido a una gradual disminución de la ley de las menas por los avances en las técnicas de metalurgia extractiva en materias de molienda y flotación, el desarrollo de procesos de lixiviación combinados con procesos de recuperación de metales a partir de soluciones diluidas del tipo de intercambio iónico y extracción con disolventes que han permitido tratar minerales con menos de 0.1% de U y de tierras raras.

Pero esta tendencia de explotación de menas pobres se ha interrumpido gradualmente en la actualidad, debido a la caída del precio de los metales, y por

las exigencias medioambientales, pero no así, la tendencia al alza de recuperar metales estratégicos.

Por ello, el estudio de las menas en yacimientos que contienen tierras raras y platinoides son de importancia estratégica para cualquier país, ya que su valor económico relativamente estable radica en factores, por su aplicación en diferentes desarrollos tecnológicos actuales, y por su relativa escases que los revaloriza, y por los avances en materia de metalurgia extractiva para proporcionar un valor agregado a los mismos en yacimientos cuasi imposibles de tratar en décadas pasadas.

### **1.1.2. Origen de las menas metálicas**

En cuanto al origen de las menas metálicas se consideran dos tipos: primarias y secundarias (Ballester, 2000). Cabe señalar que la corteza terrestre es la única zona susceptible de explotación, y solo en sus partes más superficiales, está constituida básicamente por silicatos y se concentran los elementos con gran afinidad por el oxígeno como Si, Al y Ti, alcalinos y alcalinotérreos.

En la Tabla 1.1. Muestra la composición promedio de la corteza terrestre. (Taylor & McLeannan, 1985). En donde, se observa que los contenidos de oro y metales del grupo del platino son de 0.001-0.01 ppm y de lantánidos de 0.1 a 1 ppm. (Goldschmidt, 1954)

<b>Rango</b>	<b>Elementos</b>
<b>Más de 10%</b>	<b>O (47 %), Si (28 %)</b>
<b>1-10 %</b>	<b>Al (8 %), Fe (5 %), Ca (3 %) K (2 %)</b>
<b>0.1 -1 %</b>	<b>C, H, Mn, P, Ti</b>
<b>0.01-0.1 %</b>	<b>Ba, Cl, Cr, F, Rb, S, Sr; V, Zr</b>
<b>10-100 ppm</b>	<b>Cu, Ce, Co, Ga, La, Li, Nb, Pb, Sn, Th, Zn, Y</b>
<b>0.1- 1 ppm</b>	<b>Lantánidos, As, B, Br, Cs, Hf, Mo, Sb, Ta, U, W, Y, In, Tl</b>
<b>0.01-0.1 ppm</b>	<b>Ag, Pd, Se</b>
<b>0.001-0.01 ppm</b>	<b>Au, Ir, Os, Pt, Re, Rh, Ru</b>

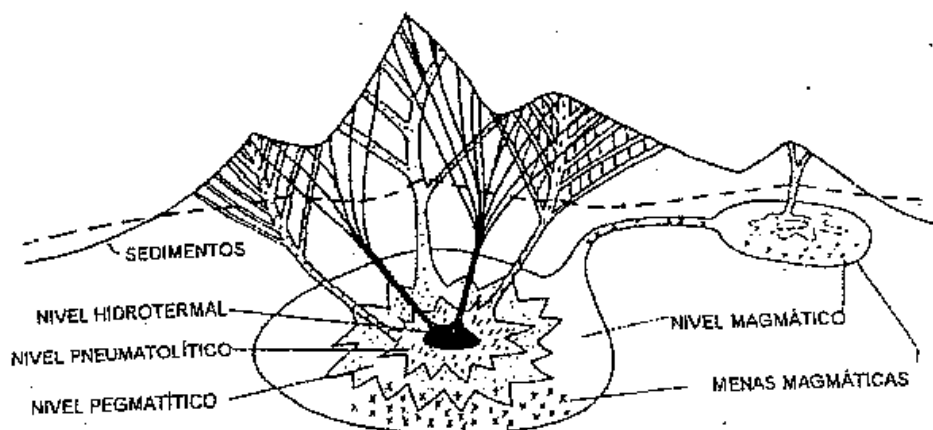
---

### 1.1.3. Clasificación De Yacimientos Minerales

De acuerdo al origen de las menas metálicas existen dos tipos de yacimientos; los primarios, y secundarios.

Para el caso de los yacimientos primarios o debido a procesos de segregación magmática, se han originado con los que ocurren durante el enfriamiento lento del magma a profundidad de la corteza terrestre. Cabe mencionar que los magmas son rocas fundidas constituidas por silicatos y óxidos, con agua, compuestos de cloro, azufre carbono, flúor y boro y material volátil, todo este material está a elevada presión  $1 \times 10^6$  atm que hace que la materia volátil se mantengan en solución. El origen de los magmas es diverso pueden ser de material fundido primario sin estar nunca en estado sólido con raíces muy profundas en el manto, también, pueden ser por efusión de partes de la corteza sometidas a compresión adiabática, por contracción de las capas más externas debido al enfriamiento del planeta, o por fenómenos orogénicos.

Cabe mencionar que el mecanismo exacto de los procesos magmáticos no es bien conocido, pero existen cuatro fases fundamentales de enfriamiento lento como se muestran en la siguiente Figura 1.1.



**Figura 1.1** Esquema de un magma con las etapas fundamentales del proceso de segregación (Modificado de Gilchrist ,1980)

---

### 1) Fase magmática mayor a 1000 °C

En esta fase solidifica la mayor parte de la sílice y de los silicatos; se produce un descenso del punto de fusión del magma residual por lo que la concentración de agua y materiales volátiles aumentan, y se separan los minerales formadores de rocas como cuarzo, feldespatos, piroxenos, se forman granitos, entre tanto, los minerales de menas se separan por densidad de los sulfuros y óxidos.

Segregación en estado líquido: se separan sulfuros de hierro (pirrotita,  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) y níquel (Pentlandita,  $(\text{Ni}, \text{Fe})\text{S}$ ), también, cantidades menores de metales del grupo del platino (esperrilita,  $\text{PtAs}_2$ ).

Segregación en estado sólido como del tipo de Hierro, espinela con alto punto de fusión: cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ )

### 2) Fase Pegmatítica (1000-700°C)

Se caracteriza por cristalización de sílice, y de silicatos del líquido residual con formación de grandes cristales con frecuentes inclusiones líquidas y se forman diques y filones, también se forman minerales de rocas de cuarzo y feldespato ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), y apatito ( $(\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3)$ ).

Al igual que se tienen minerales formadores de menas de niobita-tantalita ( $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3)_2(\text{Fe}, \text{Mn})$ ),  $\text{ZrSiO}_4$ , Berilo ( $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ), uraninita ( $\text{UO}_2$ ), Thorianita ( $\text{ThO}_2$ ), Monacita ( $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Th}, \text{Y})\text{PO}_4$ ) Cabe mencionar que las pegmatitas son relativamente pobres en su conjunto pero su interés va en aumento por la utilización de metales estratégicos como son los lantánidos, Li, Nb, Ta, Zr, Be, U, Th.

### 3) Fase neumatolítica (700-400°C)

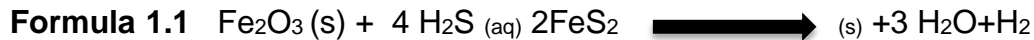
Se caracteriza por la proporción muy elevada de agua, y de material volátil residual, y que su presión de vapor sobrepasa las del sistema. Existe ebullición de la solución desprendiéndose metales del tipo de haluros volátiles con vapor de agua,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ , y no se forman rocas en esta fase. Los vapores se infiltran en

---

las fracturas de las rocas adyacentes formándose filones o impregnaciones neumatolíticas y se depositan sulfuros del tipo piritita FeS<sub>2</sub>.

4) Fase hidrotermal (400-100°C)

La eliminación de material volátil en la etapa precedente, así como el descenso de la temperatura, estabilizan una solución residual de tipo acuoso. Así las soluciones que tienen gran movilidad tienden a rellenar grietas formando los filones hidrotermales. Se infiltran por los poros formando impregnaciones y llevándose a cabo reacciones de reemplazamiento como se muestra en la Formula 1.1.



En esta fase cristalizan carbonatos de Ca, Mg, Sr, Ba, sulfatos de Ba, Sr, sulfuros metálicos de piritita, arsenopiritita (FeAsS), esfalerita (ZnS) calcopiritita (CuFeS<sub>2</sub>), Galena (PbS), sulfuros de plata, sulfuros arseniuros, antimoniuros de Ni y Co, Au en la fase de mayor temperatura. (Ballester, 2000)

**1.1.4. Yacimientos Secundarios**

**Procesos de meteorización**

Los agentes atmosféricos y supergénicos sobre yacimientos primarios puede destruir yacimientos valiosos; pero también, originar yacimientos secundarios de importancia por procesos de concentración mecánica o química.

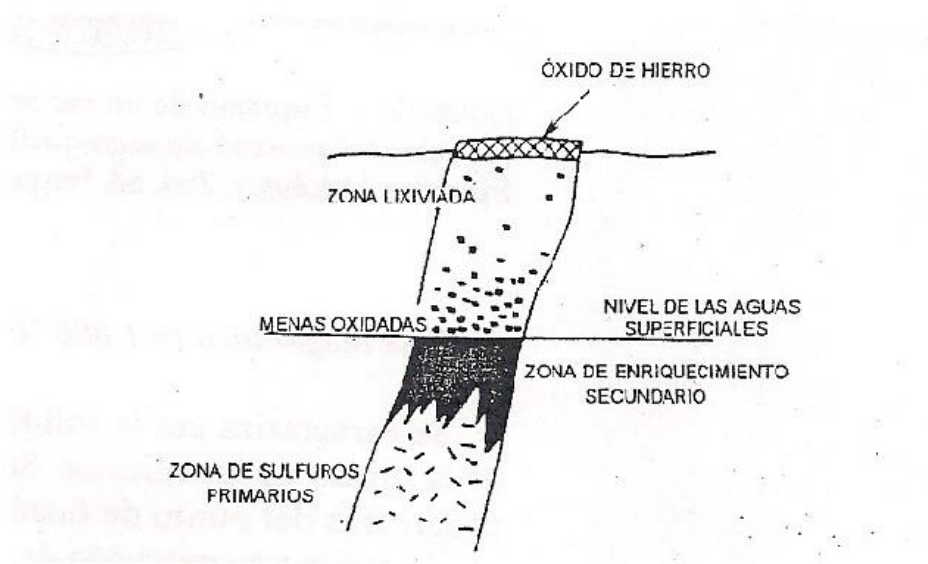
1) Concentración mecánica

La disgregación de las rocas por la acción combinada de los agentes físicos, como son los cursos de agua, viento, glaciares, y químicos, aguas carbónicas, ácidos orgánicos del suelo entre otros, que originan las gravas y arenas, y en cuyo transporte se produce una concentración de minerales densos, y poco

alterables por los agentes químicos como son la monacita, ilmenita thorianita oro y platinoides.

## 2) Concentración química

a) Meteorización de yacimientos de sulfuros. La percolación de aguas superficiales sobre yacimientos de sulfuros metálicos, produce oxidación formando sulfatos, lixiviación (transporte) y reposición (precipitación) de algunos nuevos sulfuros en las zonas internas, como se muestra en la Figura 1.2.



**Figura 1.2** Esquema de la formación de zonas de oxidación y cementación sobre un depósito filoniano de sulfuros. (Modificado de Gilchrist, 1980)

### **Zona de oxidación.**

La pirita ( $\text{FeS}_2$ ) origina soluciones de sulfato férrico que lixivian a los sulfuros de cobre, zinc, níquel, y cobalto. Las soluciones de sulfato férrico se hidrolizan originando goethita ( $\text{FeOOH}$ ), o se precipitan en compuestos tipo jarosita ( $(\text{K,Na})\text{Fe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ ) con presencia de cationes alcalinos. El plomo se fija como plumbojarosita ( $\text{Pb}_{0.5}\text{Fe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ ) o anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ), y la plata como argentojarosita ( $\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) o clorargirita  $\text{AgCl}$ . En tanto, el oro se mantiene inalterado, y cabe mencionar que a la abundancia de minerales oxidados de hierro se le denomina gossan. (Ballester, 2000)

---

### **Zona de cementación.**

Las soluciones descendentes ricas en sulfatos de Cu y Ag encuentran en profundidad a los sulfuros primarios y se producen reacciones de cementación como se muestra en las siguientes formulas. (Formula 1.2 y Formula 1.3).

#### **Formula 1.2**



#### **Formula 1.3**



En esta zona se enriquecen minerales de cobre y plata: covelita (CuS), calcosina (Cu<sub>2</sub>S), bornita (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), acántita (Ag<sub>2</sub>S).

### ***Características de las menas***

El origen de las menas lo determina su composición química y sus propiedades físicas. Así las características químicas se deben a sus combinaciones presentes como los tipos de minerales, sus rocas asociadas. (Melgarejo, 1997)

En tanto, sus características físicas son asociadas con respecto a la forma del yacimiento como son su masa, filón, capa, impregnación, tamaño y grado de interpenetración de los distintos minerales.

Es por eso, las características químicas condicionan su técnica de explotación. Por ello desde la antigüedad se han propuesto algunas forma para su clasificación, así Smirnov (1976) es quien ubicó los depósitos minerales en un marco tectónico-formacional, clasificándolos de acuerdo a su formación, produciendo cada uno diferentes depósitos minerales a lo largo de su desarrollo geológico.

---

### **1.1.5. Yacimientos Sedimentarios Exhalativos (SEDEX)**

Según Melgarejo (1997) quien menciona que Los yacimientos sedimentarios exhalativos son depósitos que se originan a partir de la descarga de fluidos hidrotermales en la superficie de la corteza terrestre, ya sea en medios subaéreos o submarinos. Estos fluidos emitidos en la superficie son la manifestación externa de circuitos hidrotermales.

Estos tipos de depósitos se caracterizan por presentar morfología estratiforme, aunque algunos casos se hallan asociadas a mineralizaciones filonianas que se interpretan como precipitados en los canales de emisión de los fluidos hidrotermales. En este sentido algunos autores como Plimer (1978) y Large (1979) *in Melgarejo (1997)*, distinguen en función de la distancia respecto al centro exhalativo entre los depósitos estratiformes proximales es decir cuando la mineralización estratiforme presenta en su base canales de alimentación, que se manifiesta como una mineralización en fracturas, y depósitos estratiformes distales, cuando la mineralización se halla a una cierta distancia de dichos canales.

Existen clasificaciones diversas de los depósitos exhalativos, basadas en criterios muy diferentes, a saber: el tipo de mena dominante, contexto geodinámico, tipo de roca encajonante, etc. Así, puede establecerse una primera diferenciación, generalmente aceptada, a partir de roca encajonante. (Melgarejo, 1997)

En lo que concierne a los depósitos de tipo SEDEX, la subdivisión resulta más problemática que para los volcanogénicos de sulfuros masivos (VMS). En el caso estudiado en este trabajo, se tiene un depósito de metales base, donde existen acumulaciones de metales (Cu, Pb y Zn y de forma subordinaria Ba, Ag, Au, Fe y Mn), en forma mayoritariamente de sulfuros, aunque también de sulfatos y óxidos.

Los depósitos son estratiformes, dispuestos en capas, generalmente de pocos metros de espesor y hasta miles de metros de extensión lateral (Large, 1983). Son concordantes con los sedimentos, aunque en muchos depósitos se han apreciado



---

mineralizaciones en stockwork en la base, que representa los canales de alimentación.

Depósitos SEDEX son de importancia en la producción mundial de metales base, lo que ha propiciado una gran cantidad de modelos descriptivos de los mismos. En cuanto al modelo genético, desde trabajos ya clásicos de (Large, 1983) parece establecido que se forman en cuencas extensionales submarinas de tercer orden, en asociación a fracturas sedimentarias que controlan a su vez, la evolución de la cuenca. Por su carácter extensional, la cuenca presenta volcanismo, que actúa como motor de un gradiente geotérmico elevado.

El proceso de mineral de génesis de los depósitos SEDEX, la mineralización es muy variada, dependiendo del tipo de mineral que se deposita por procesos exhalativo sedimentarios.

- Fuente de los metales es estratos sedimentarios que transportan iones metálicos atrapados dentro de arcilla y minerales de filosilicatos y electroquímicamente adsorbida a sus superficies. Durante diagénesis, la pila sedimentaria deshidrata en respuesta a calor y presión, liberando una salmuera formativa altamente salina, que lleva los iones metálicos dentro de la solución.
- Alternativamente, los depósitos SEDEX pueden ser obtenidos de los fluidos magmáticos de cámaras de magma del subsuelo marino y fluidos hidrotermales generados por el calor de una cámara magmática entrometerse en sedimentos saturados. Este escenario es relevante para entornos de dorsales oceánicas y las cadenas volcánicas arcos de islas donde las fumarolas (Black Smokers) se forman mediante la descarga de fluidos hidrotermales.
- El transporte de estas salmueras sigue vías depósito estratigráficas con fallas, que aíslan la estratigrafía enterrados en las cuencas sedimentarias reconocibles. Las salmueras se filtran hasta la cuenca delimitando fallas y se liberan en el agua oceánica que lo recubre.

- 
- Trampa sitios son zonas bajas o deprimido de la topografía del océano donde el pesado, salmuera caliente fluye y mezcla con refrigerante de agua de mar, haciendo que el metal disuelto y azufre en la salmuera precipiten de la solución como un sólido mineral de sulfuro de metal, depositados como capas de sulfuro sedimentario.

La exploración de los fondos submarinos ha posibilitado, durante los últimos años, el descubrimiento de centros exhalativos, activos en la actualidad, que permite establecer un modelo actual en base al cual interpretar los diversos ejemplos fósiles. La mineralización se forma a partir de centros emisores que descargan los fluidos hidrotermales a alta temperatura. Estos fluidos son ricos en metales, y pueden ser de color oscuro o claro de ahí que los centros exhalativos reciban el nombre de “Black Smokers” o “White Smokers”, y a menudo emergen a partir de chimeneas, que a su vez se apoyan en montículos. Ambos tipos de formas están constituidas por precipitaciones químicas.

Las chimeneas se apoyan sobre depósitos masivos de sulfuros, que se ven atravesados por el entramado de canales de alimentación de las chimeneas (Goodfellow & Blaise, 1988).

Otro aspecto notorio de algunos sedimentos asociados a varios depósitos es la abundancia de V y otros elementos poco inusuales, algunos depósitos exhalativos actuales se caracterizan por presentar anomalías significativas de Au y PGE (Elementos del Grupo de Platino), que contienen entre 0.2 ppm de Au y Pt. El Pt se encuentra en esta mineralización en la estructura de la calcopirita y de la marcasita. Un aspecto interesante a la hora de establecer una zonación en la distribución y la composición mineral de los sedimentos con influencia exhalativa, niveles feldespáticos, de manganeso etc.

El modelo genético de los depósitos exhalativos es complejo, para obtenerlo, en un caso concreto, es preciso, en primer lugar, establecer cuidadosamente la distribución de los diferentes litotipos, definidos en la base a variaciones mineralógicas. Esto puede conllevar a establecer las zonaciones laterales y verticales.

---

## 1.2. TIERRAS RARAS

Los elementos de Tierras Raras o REE por sus siglas en inglés (Rare Earth Elements) son un grupo de 17 elementos químicos (metálicos) que aparecen en la tabla periódica. El grupo está formado por los 15 elementos de lantánidos junto con itrio y escandio. Ellos comparten muchas propiedades similares, por lo que se producen juntos en depósitos geológicos. Los 17 elementos de Tierras Raras se encuentran en todos los depósitos de Tierras Raras, pero su distribución y concentraciones varían. Estos elementos se conocen como "raros" porque no es común encontrarlos en concentraciones comercialmente viables.

Las Tierras Raras generalmente se dividen en una de dos categorías: 1) Las Tierras Raras Ligeras (LREE) y 2) Tierras Raras Pesadas (HREE), con diferentes niveles de usos y la demanda como se ve en la Tabla 1.2. Los depósitos de minerales de tierras raras suelen ser ricos en cualquiera LREE o HREE, pero rara vez contienen cantidades significativas. En general, son de vital importancia para algunos de los mercados de más rápido crecimiento del mundo: energía limpia y alta tecnología. Los nombres de estos elementos o Tierras Raras son: Escandio (Sc), Itrio (Y), Lantano (La) , Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometió (Pm) Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu), como se muestran en la tabla periódica de la Figura 1.3.

---

**Tabla 1.2 Tierras Raras Ligeras y Tierras Raras Pesadas**

---

<b>Tierras Raras Ligeras (LREE)</b>		<b>Tierras Raras Pesadas (HREE)</b>	
La	Lantano	Y	Itrio
Ce	Cerio	Eu	Europio
Pr	Praseodimio	Gd	Gadolinio
Nd	Neodimio	Tb	Terbio
Sm	Samario	Dy	Disprosio
		Ho	Holmio
		Er	Erblio
		Tm	Tulio
		Yb	Iterbio
		Lu	Lutecio

---

1																	2		
H																	He		
3	4											5	6	7	8	9	10		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
11	12	Metales de Transición										13	14	15	16	17	18		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43					47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc					Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75					80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re					Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89																	
Fr	Ra	Ac																	
		Tierras Raras		Elementos del Grupo del Platino															
				58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
				Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
				90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
				Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

Figura 1.3 Tierras raras en la tabla periódica

Elementos de Tierras Raras no son tan "raros", como su nombre implica. Tulio (Tm) y Lutecio (Lu) son los dos menos abundantes elementos de Tierras Raras, pero cada uno tiene una abundancia media de la corteza que es casi 200 veces mayor que la abundancia de la corteza de oro. Sin embargo, estos metales son muy difíciles para ser explotados, ya que es raro encontrar en concentraciones lo suficientemente altas como para la extracción económica. (Volker, 2013)

Los más abundantes elementos de tierras raras son Cerio (Ce), Itrio (Y), Lantano (La) y Neodimio (Nd). Tienen abundancias de la corteza promedio que son similares a los usados comúnmente metales industriales, tales como cromo, níquel, zinc, molibdeno, estaño, tungsteno y plomo. Una vez más, rara vez se encuentran en concentraciones extraíbles.

Las Tierras Raras son relativamente abundantes en la corteza terrestre, pero se ha descubierto que concentraciones explotables son menos comunes que la mayoría de los otros minerales.

Las tierras raras producen campos magnéticos poderosos lo que ha permitido un mayor desarrollo de la tecnología médica y el cuidado de la salud, como el MRI

---

(Magnetic Resonance Imaging), con lo cual permite a los médicos diagnosticar enfermedades que de otra manera serían más difíciles de detectar. Así mismo las tierras raras se utilizan en equipos modernos para cirugía como los robots. (Volker, 2013)

### **1.2.1. Propiedades Físicas Y Químicas**

En el sistema periódico de los elementos de la REE son metales de transición y pertenecen al tercer subgrupo, el grupo de escandio, junto con el escandio, itrio y el grupo de los actínidos radiactivos. Los lantánidos muestran electrones de configuraciones especiales en el nivel atómico. Los núcleos atómicos están rodeados por electrones en varios orbitales y con el aumento del número atómico, protones, neutrones y electrones se ganan. Los electrones generalmente se adhieren a los orbitales exteriores. Para los lantánidos sin embargo, no se llena la capa exterior, pero un orbital más profundo acomodara el nuevo electrón: el 4f-orbital. Así que la apariencia externa sigue siendo el mismo para todos los lantánidos y como los orbitales interiores no influyen en la química tanto, esto explica la semejanza química de las Tierras Raras. (Volker, 2013)

Por otra parte, no ocurre lo mismo con la física como en la química, los elementos de Tierras Raras tienen un comportamiento físico diferente. Una de las principales características de los lantánidos es su estado de oxidación 3, mientras que algunas Tierras Raras se muestran también otros estados. Estados estables preferidos son alcanzados por vacío, medio o orbitales ocupados plenos, es decir,  $\text{La}^{3+} (f^0)$ ,  $\text{Gd}^{3+} (f^7)$  y  $\text{Lu}^{3+} (f^{14})$ . Otros elementos con configuración estable son  $\text{Eu}^{2+} (f^7)$  (que sirve como una buena reducción en agentes),  $\text{Yb}^{2+} (f^{14})$ ,  $\text{Ce}^{4+} (f^0)$  (como un buen agente de oxidación) y  $\text{Tb}^{4+} (f^7)$ .

Una particularidad en la configuración electrónica es que con el número atómico creciente los radios iónicos se hacen más pequeños; conocido como el lantánido-contracción. Este hecho da lugar a los radios iónicos de la mayoría de las Tierras Raras trivalentes similar a los radios de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$  y  $\text{U}^{4+}$ . El  $\text{Eu}^{2+}$  un poco más

---

grande tiene un radio similar a  $\text{Sr}^{2+}$ . Esta coincidencia es importante para la comprensión de los procesos petrogenéticos ya que la mayoría de las Tierras Raras pueden hacer y reemplazar elementos con radios iónicos similares. Así las Tierras Raras se puede encontrar en las rocas que contienen Ca, Th, U y Sr. (Volker, 2013)

Las características físicas de las Tierras Raras, muestran muy diversos comportamientos que los hacen especialmente útiles para una amplia gama de aplicaciones. En el magnetismo de algunas Tierras Raras como Gd, Dy, Er sino también Nd y Sm muestran complejos potenciales que pueden ser y son utilizados por los imanes de fabricación. Algunas Tierras Raras proporcionan claramente estados definidos de energía que se pueden utilizar de manera eficiente en aplicaciones de iluminación y láser.

En resumen hay una amplia variedad de características similares y especiales inherente a las Tierras Raras. Especialmente las diferentes estructuras atómicas y los estados llevan a algunas propiedades únicas. Así un complejo y enormes resultados del campo de aplicación de estas propiedades que muestran, sino también características similares completamente diferentes. Esto debería dar también una idea que las Tierras Raras no se pueden comparar y tratado como un solo elemento. (Volker, 2013)

### ***1.2.2. Análisis Geoquímico De Las Tierras Raras***

El método geoquímico de exploración o prospección respectivamente es un método indirecto. La exploración geoquímica a minerales incluye cualquier método basándose en la medición sistemática de una o varias propiedades químicas de material naturalmente formado. El contenido de trazas de un elemento o de un grupo de elementos es la propiedad común, que se mide. El material naturalmente formado incluye rocas, suelos, capas de hidróxidos de Hierro (Fe) formadas por meteorización llamadas 'gossan', sedimentos glaciares, vegetación, sedimentos de ríos y lagos, agua y vapor. La exploración geoquímica está enfocada en el descubrimiento de distribuciones anómalas de elementos.

---

Se distingue los estudios geoquímicos enfocados en un reconocimiento general y los estudios geoquímicos más detallados aplicados en un área prometedora para un depósito mineral. Además se puede clasificarlos con base en el material analizado.

#### **1.2.2.1 Difracción De Rayos X**

La Difracción de Rayos X es una técnica analítica no destructiva y de las más importantes en la caracterización de materiales cristalinos, tales como los metales, cerámicos, polímeros, intermetálicos, minerales, u otros compuestos orgánicos e inorgánicos.

La técnica de Difracción de Rayos X puede ser utilizada para identificar las fases cristalinas presentes en la muestra, desde materia prima de partida hasta un producto final. Esta técnica ha sido utilizada durante muchas décadas con gran éxito para proporcionar información precisa sobre la estructura de los materiales. La calidad del patrón de difracción suele ser limitado por la naturaleza y la energía de la radiación disponible, por la resolución del instrumento y por las condiciones físicas y químicas de la muestra. Dado que muchos materiales sólo pueden ser preparados en una forma policristalina, la técnica de difracción de rayos X se convierte en la única opción realista para una determinación de la estructura cristalina de estos materiales. (Cerecedo Sáenz & Salinas Rodriguez, 2013)

#### **1.2.2.2. Microscopía Electrónica De Barrido Y Espectrometría De Dispersión De Energías**

El Microscopio electrónico de barrido, utiliza un haz de electrones en para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de

---

electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

Se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores científicos y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras. (Cerecedo Sáenz & Salinas Rodríguez, 2013)

### **1.2.2.3. Espectrometría De Masas Con Plasma De Inducción Acoplada**

La espectrometría de masas con plasma de inducción acoplada es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/l – mg/l). Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal.

Su principal ventaja son sus bajos límites de detección para la mayoría de los elementos detectando unas pocas ppb – ppt lo que la hace ideal para el análisis de elementos traza.

La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Argón. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un cuádrupolo y dirigidos al detector.



---

Tiene gran variedad de aplicaciones en las siguientes áreas: biología, física de materiales, medioambiente, geoquímica. (Cerecedo Sáenz & Salinas Rodriguez, 2013)

### ***1.2.3. Usos Y Aplicaciones De Las Tierras Raras***

Metales de las tierras raras y las aleaciones que los contienen se utilizan en muchos dispositivos que la gente usa todos los días, como la memoria del ordenador, DVD, pilas recargables, teléfonos celulares, los convertidores catalíticos, los imanes, las lámparas fluorescentes y mucho más. (Volker, 2013)

Durante los últimos veinte años, ha habido una explosión en la demanda de muchos artículos que requieren metales de tierras raras. Hace veinte años había muy pocos teléfonos móviles en uso, pero el número ha aumentado a más de 7 mil millones en la actualidad. El uso de elementos de tierras raras en los ordenadores ha crecido casi tan rápido como los teléfonos celulares.

Muchas baterías recargables están hechas con compuestos de tierras raras. La demanda de las baterías está siendo impulsado por la demanda de dispositivos electrónicos portátiles, como teléfonos móviles, lectores, ordenadores portátiles y cámaras.

Varias libras de compuestos de tierras raras están en pilas que alimentan cada vehículo eléctrico y del vehículo híbrido-eléctrico. En lo que respecta a la independencia energética, el cambio climático y otros temas la venta de vehículos eléctricos e híbridos, la demanda de baterías hechas con compuestos de tierras raras subirá aún más rápido.

Las tierras raras se utilizan como catalizadores, fósforos, y compuestos de pulido. Estos se utilizan para el control de la contaminación del aire, pantallas iluminadas en dispositivos electrónicos, y el pulido de vidrio de calidad óptica. Todos estos productos se espera que experimente la demanda creciente. Otras sustancias pueden ser sustituidas por elementos de tierras raras en sus usos más importantes; sin embargo, estos sustitutos son por lo general menos eficaces y costosos.

---

Desde la década de 1950 hasta principios de la década de 2000, óxido de cerio era un pulimento lapidario muy popular. No era caro y muy eficaz. Los recientes aumentos de precios casi se han eliminado el uso de óxido de cerio en volteo de rock y las artes lapidarias. Otros tipos de esmalte, tales como aluminio y óxido de titanio, se utilizan ahora en su lugar. (Xuexiang, 2007)

#### ***1.2.4. Las Tierras Raras En El Mundo***

Debido al gran interés que han despertado las energías limpias, la informática y el sector de comunicaciones, se ha suscitado una alta demanda de minerales de tierras raras en diferentes países, incluido México.

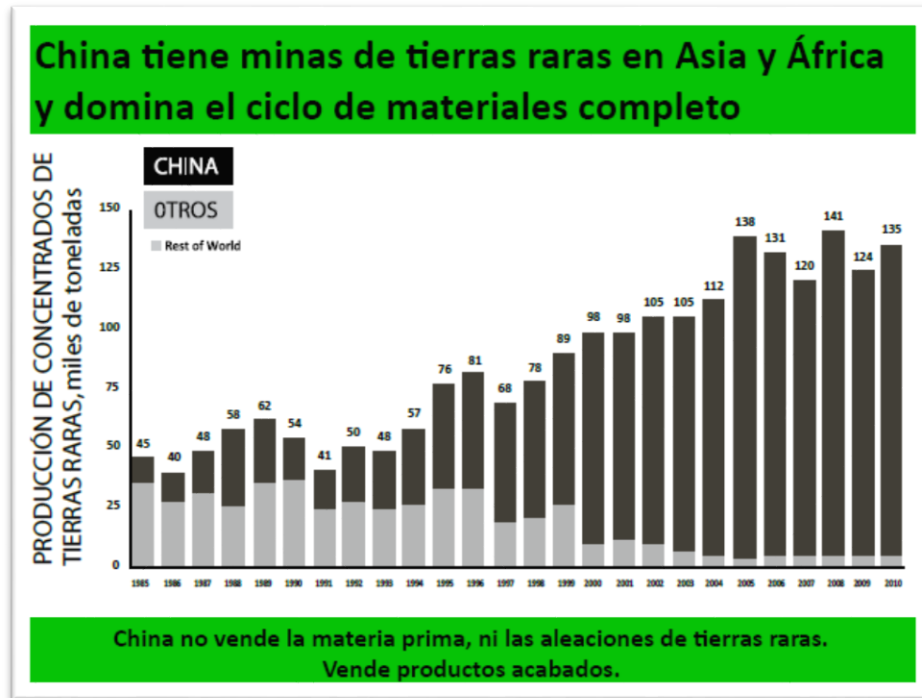
Estados Unidos y los recursos mundiales están contenidos principalmente en bastnäsite y monacita. Depósitos bastnäsite en China y los Estados Unidos constituyen el mayor porcentaje de la los recursos económicos de las tierras raras del mundo , mientras que los depósitos de monacita en Australia , Brasil , China , India , Malasia , Sudáfrica , Sri Lanka, Tailandia y los Estados Unidos constituyen el segundo mayor segmento .

China se convirtió en el productor dominante en el mundo de tierras raras en la década de 1990. Debido a que China vendió tierras raras a precios muy bajos, las minas como paso de montaña de Molycorp en California y otros en todo el mundo no pudieron competir. Para el año 2000, China representó más del 95 % de la producción de tierras raras mundo. (Xuexiang, 2007)

En consecuencia al dominio que tiene China con respecto a la producción de tierras raras, es considerado como el primer productor de minerales y aleaciones de tierras raras del mundo hasta alcanzar cerca del 97% de la producción mundial, por esta razón los precios se han elevado de manera importante. Los precios de las tierras raras en los años recientes han tenido incrementos entre 200 y 600% según la escasez de cada mineral, como se ilustra en la Figura 1.4.

Actualmente oscilan entre cincuenta mil y cinco millones de dólares la tonelada de concentrados óxidos colocando a las tierras raras entre los materiales más caros

de la industria minera. La preocupación por la altísima concentración de la producción de aleaciones de tierras raras en un solo país ha galvanizado esfuerzos mundiales para mitigar su vulnerabilidad estratégica en este campo. (Xuexiang, 2007)



**Figura 1.4** China el mayor productor de Tierras Raras (Modificada de PetroQuiMex, 2014)

El gobierno de Estados Unidos creó el Critical Materials Hub (autollamado “Proyecto Manhattan” de las tierras raras) formado por los más importantes liderazgos de investigación en minería y materiales para impulsar iniciativas para fortalecer la disponibilidad de aleaciones de tierras raras.

En el Reino Unido el tema llegó al parlamento; Dinamarca reaccionó asegurando en Groenlandia un hallazgo fuerte de minerales de tierras raras en una zona volcánica que resultó expuesta durante los deshielos provocados por el cambio climático.

Con el mismo impulso varias compañías mineras internacionales en Afganistán, Nueva Zelanda y varios países africanos han encontrado importantes yacimientos de tierras raras en el pasado reciente. (PetroQuiMex ,2014)

#### 1.2.2.4. La Tierras Raras En México

Se ha realizado prospección geológica preliminar en los estados que se muestran en la figura 1.5, dicha región tiene la particular característica de contener rocas del grupo de las pegmatitas que contienen elementos químicos conocidos como tierras raras. (PetroQuiMex ,2014)

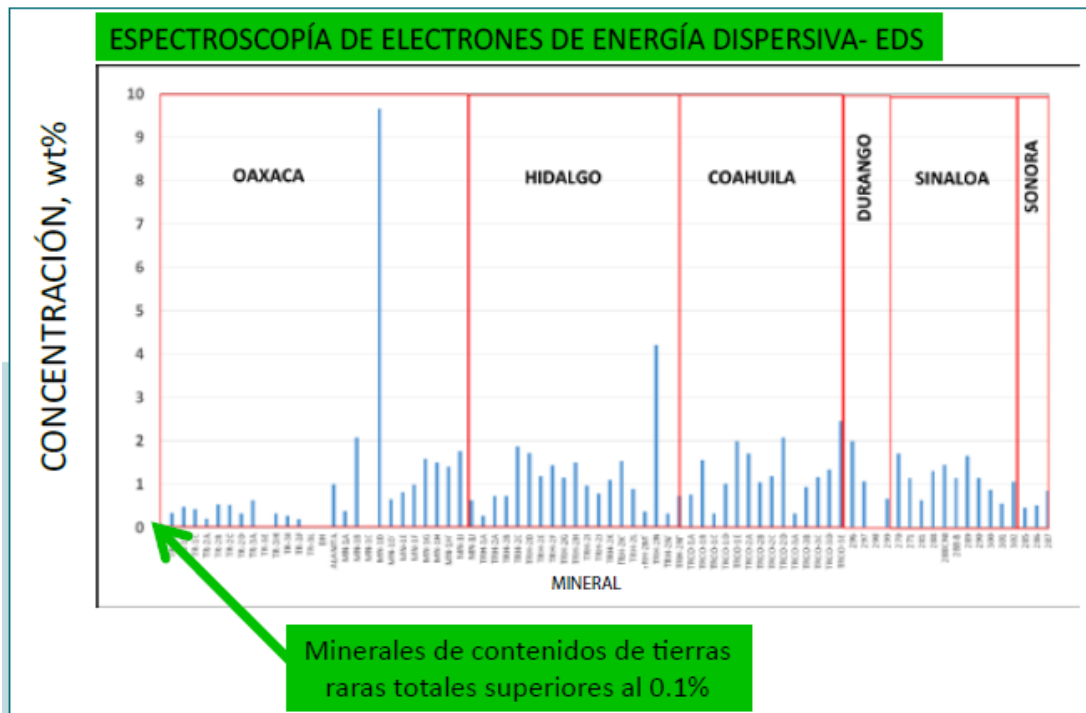
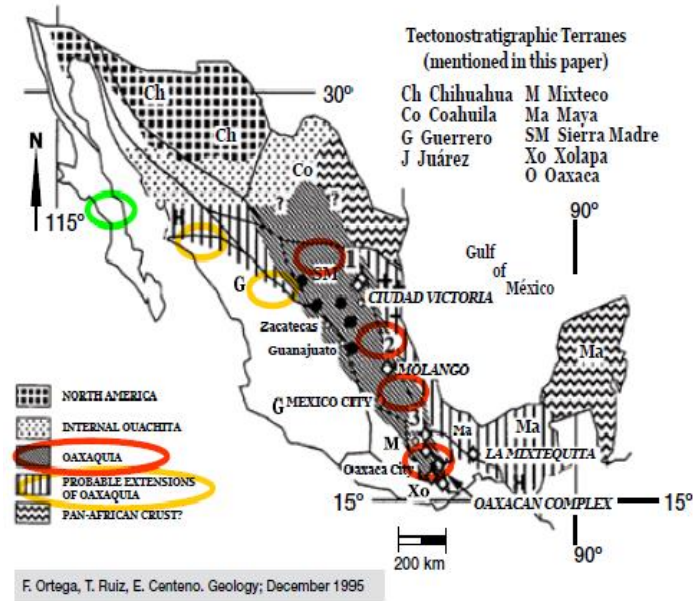


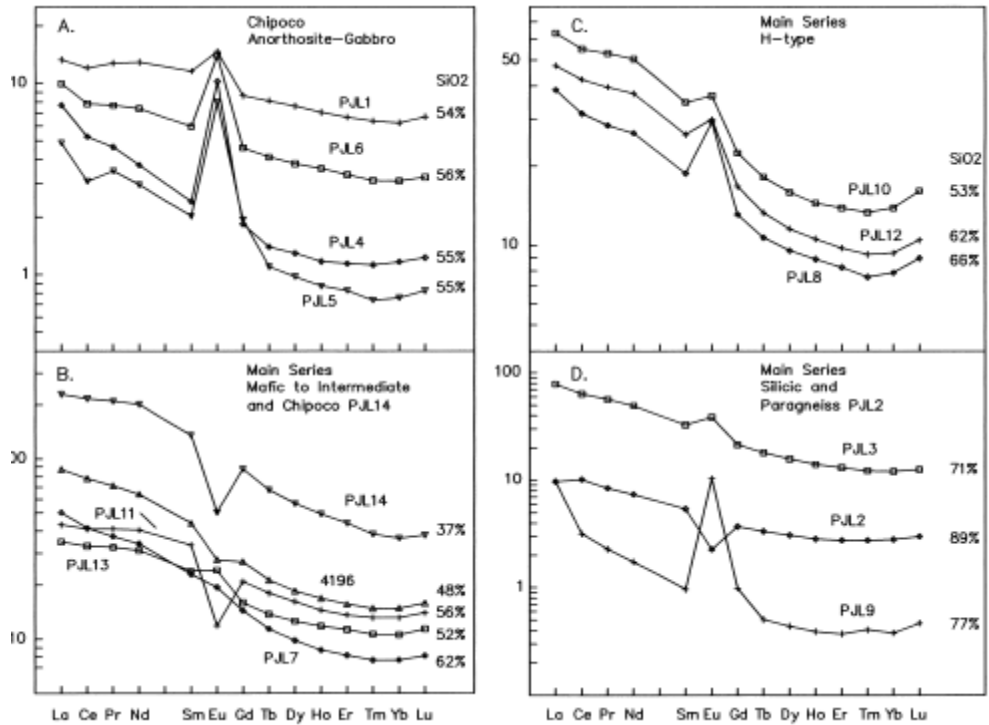
Figura 1.5. Prospección de Tierras Raras en algunos estados de México (Modificado de PetroQuiMex, 2014)



**Figura 1.6** En el complejo oaxaqueño existe la posible presencia de Tierras Raras (tomada de PetroQuimex, 2014)

### 1.2.2.5. Las Tierras Raras En Hidalgo

En un estudio realizado al final de la década de los 90's en Molango, realizado por investigadores de la Universidad de California y la UNAM, con el objetivo de datar el Gneis Huiznopala y determinar su procedencia. Al realizar estudios geoquímicos de algunas muestras tomadas cerca del Gneis, arrojaron resultados inesperados, como lo fueron las Tierras Raras, los valores no fueron tan significantes, pero permito obtener información de esos metales bases en Molango. Como se ilustra en la Figura 1.7.



**Figura 1.7** Diagrama de las muestras donde se obtuvo Tierras Raras

También existen otros trabajos en el área de estudio que tratan la geología desde diferentes ópticas. Entre los trabajos relacionados con la tectónica se encuentran los realizados por Maynard y Klein en el cual tratan la subsidencia diferencial en el área de Molango, por lo que el evento tectónico de subsidencia lo relacionan con el emplazamiento de los depósitos del distrito manganesífero de Molango. (Maynard & Klein, 1995)

Además, en lo referente a la geología económica destacan los trabajos de Okita quien realizó la descripción de los yacimientos de manganeso del distrito manganesífero de Molango, clasificándolos como de tipo SEDEX

Entre tanto, en la región más oriental, realizaron trabajos de prospección Cerecedo Sáenz, *et. al.* Quienes documentaron la relación con yacimientos SEDEX de manganeso en la región de Chichapala, Veracruz. Otros trabajos relacionados a la prospección de yacimientos minerales corresponden a Cerecedo Sáenz sobre los lechos rojos de Cu-Ag, y Cerecedo Sáenz y Cantú-Chapa.

---

Respecto a los trabajos de estratigrafía destacan el realizado por H. K. Erben en donde documenta, el jurásico inferior de México y sus amonitas.

En cuanto a los trabajos de geología regional destacan los de Ochoa Camarillo, Cantú-Chapa, Carrillo Bravo, Aguayo Camargo, Hermoso de la Torre y Martínez Pérez, Cantú-Chapa, además, Cantagrell y Robin quienes realizaron trabajos sobre las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental; así como estudios sobre las fases de vulcanismo en la región de Tlanchinol.

Entre tanto, los trabajos más recientes corresponden a la prospección de orientación de metales base en el área de Molango, en donde se realizó una caracterización preliminar en el área de estudio por E. Cerecedo Sáenz, V. Rodríguez Lugo, P. D. Andrade Tafoya, E. Salinas Rodríguez, D.M. Morales Rendón, & J. Hernández Ávila.(2015)

---

# CAPITULO II

---

*MARCO GEOLÓGICO*



---

## CAPITULO 2 MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

Las rocas que afloran la región del área estudio abarcan edades de las más antiguas a las más recientes, como el Gneis Huizonapala del Neoproterozoico a la Formación Atotonilco El Grande del Cuaternario, mismas que se describen a continuación basada en diferentes autores, se muestra Tabla de Cronoestratigrafica del NE del estado de Hidalgo, (Anexo 1).

#### 2.1.1 *Gneis Huiznopala*

Definido por (J. & Rincón , 1965), expuesto en el núcleo del Anticlinorio de Huayacocotla, su localidad tipo se encuentra en los valles del río Claro, Arroyo Agua de sal, y Arroyo Acatepec, ubicados cerca del pueblo Huiznopala, Se describe como gneises bandeados de facies granulita mientras que Ochoa-Camarillo lo define una exposición como un ortogneis y un paragneis. Lawlor, consigna la presencia de metanortositas y gneises gabroicos al NW de la comunidad Chipoco. El Gneis Huiznopala se correlaciona con el Gneis Novillo, de la región de Ciudad Victoria, Tamaulipas y ambos se consideran parte del basamento del bloque Oaxaquia. Dentro de la región, el Gneis Huiznopala aflora en cinco localidades: comunidad Huiznopala sobre el Río Claro, estableciéndose como localidad tipo, visto en campo una exposición de gneis bandeado totalmente alterado, con un elevado contenido en micas, es cortado por intrusivos cuarzosos que han mineralizado en forma de skarn; cercano a la comunidad de Otongo, en el Río Pilapa está la parte charnokítica que consta de gneis bandeados con partes silicificadas; entre las comunidades de Chipoco e Ixtlapala, se ubica al NE de la localidades anteriores en el Arroyo Chipoco, consta de anortositas y gabros leucocráticos con bandas de piroxenos y granate en menor cantidad, en algunas partes es cortado por intrusiones básicas además de tener partes migmatizadas; al sur de Tlanchinol se ubica el afloramiento de la comunidad de San Cristóbal

---

Ajacayac donde fue visto como gneis granítico con granate en algunas bandas de minerales melanocráticas, es donde mejor fue observado el bandeo y es una de las zonas más difíciles de acceder; por último, se tiene un área que puede observarse cercana a la comunidad de Chapula estudiada por Rosales-Lagarde sobre el Río Tlacolula.

### **2.1.2 formación otlamalacatla**

Propuesta por Ochoa Camarillo (1996) para las rocas cuyo afloramiento está situado en el rancho Otlamalacatla y Tuzancoa. Dichas rocas están constituidas principalmente por alteraciones de areniscas y lutita. La edad de esta formación se ha definido con base en la identificación de braquiópodos y trilobites descritos para rocas del Pérmico Inferior-Wolfcampiano/Leonardiano.

### **2.1.3 formación tuzancoa**

Definida por Ochoa Camarillo (1996) y Rosales Lagarde (2002) propuso su nombre su localidad tipo, se encuentra cercana a la comunidad de Tuzancoa en el Noreste de Hidalgo. La formación está compuesta principalmente por interestratificaciones submarinas de flujos de lava andesítico-basáltico con turbiditas siliciclásticas, turbiditas volcanoclásticas, flujos y escombros calcáreos y lentes conglomeráticos. Esta unidad contiene abundantes fósiles del Pérmico, dándole una edad Wolfcampaniano-Leonardiano y un ambiente relacionando con subducción. Carrillo-bravo (1965) la considero como Formación Guacamaya, sin embargo la litología no corresponde a la de dicha Formación. Su edad corresponde al Pérmico Inferior, Wolfcampaniano-Leonardiano.

### **2.1.4 Formación Huayacocotla**

Definida por Imlay (1948) establece su localidad tipo a lo largo del Río Vinasco, al sur de Huayacocotla, Veracruz. Como una secuencia de lutitas con intercalaciones de arenisca, conglomerado y pocos lentes de caliza. Erben (1956) divide la Formación en nueve unidades de acuerdo a su contenido faunístico y litológico: a) Unidad con *Coroniceras Pseudolyra*, b) Unidad con *Arnioceras geometricoides*, c) Unidad con *Oxynoticeras*, d) Unidad con conchas, e) Unidad con *Pleurechioceras*

---

subdeciduum, f) Unidad con *Pleurechioceras* g) Unidad con *Echioceras burckhardti*, h) Unidad con *Microderoceras bispinatum altespinatum*, i) lutitas con plantas. La Formación Huayacocotla se encuentra siempre discordante, está suprayaciendo al Gneis Huiznopala en la mayoría de sus afloramientos, a excepción de los de San Cristóbal y Tuzancoa; se presenta su miembro basal en las exposiciones del paragneis y del gneis gabro-anortosítico mientras que, relacionado al cuerpo charnokítico se presenta el miembro superior con fósiles de plantas continentales. Suprayaciendo a esta unidad generalmente se presentan las unidades calcáreas del Jurásico medio, en contacto discordante con la Formación Tamaulipas indiferenciada, por medio de la falla Tlatzintla; también infrayace a las basaltos de la Formación Tlanchinol sobre gran parte de la Carretera Federal 105 desde Ixtlahuaco hasta Tlanchinol. Su edad corresponde al Jurásico Inferior del Sinemuriano-Pliensbaquiano.

La Formación Huayacocotla, bio, y litofacialmente, representa la transición de la Formación Totolapa, exclusivamente lutítica, y que contiene casi exclusivamente cefalópodos, a la Formación Divisadero, en la cual predominan rocas clásticas, de grano algo más grueso, y que está caracterizada por la predominancia considerable de pelecípodos en su fauna. Dicha transición, se muestra por la presencia de elementos arenáceos y por el aumento del tamaño del grano en las rocas de la Formación Huayacocotla. En cuanto a litofacies es muy típica la presencia de "lutitas bandeadas" y de "areniscas o limolitas bandeadas", es decir de rocas sedimentarias que muestran una microestratificación en estratos delgadísimos de diferente color, siendo en general, los microestratos oscuros más arcillosos y los claros más arenáceos. Las diferencias principales que distinguen la Formación Huayacocotla de las Formaciones Totolapa y Divisadero ya se mencionaron. De la Formación igual marina, Caracahui, la formación Huayacocotla se diferencia, biofacialmente, por su contenido predominante de cefalópodos y, litofacialmente, por su escases en calizas, que se encuentran muy raras veces. Las Formaciones continentales Rosario y Barranca Superior se distinguen de la Formación Huayacocotla por su contenido de plantas fósiles terrestres y la falta completa de organismos fósiles marinos respectivamente. En

---

cuanto a la litofacie de dichas dos formaciones, resulta que ambas contienen mucho menos lutitas puras y mucho más areniscas que la Formación Huayacocotla. El espesor total de la formación Huayacocotla se estima en 400 m. Su contacto inferior no es conocido. En su contacto superior con ligera discordancia angular, descansa sobre ella la Formación huizachal. (Imlay, 1980)



**Figura 2.1.** Afloramiento de la Formación Huayacocotla, en el puente del Rio Chinameca.

### **2.1.5. Formación Cahuassas**

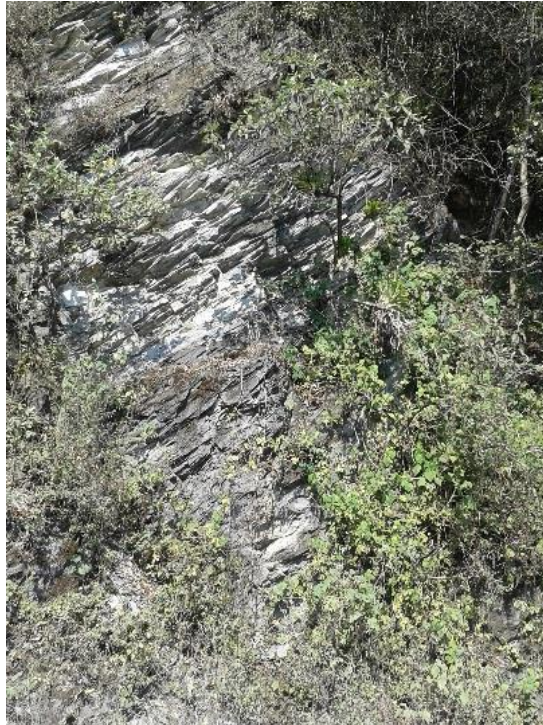
Definida por Carrillo-Bravo (1965), su localidad tipo se localiza en el Valle del río Amajac, en la ranchería Cahuassas, consta de una secuencia de arenisca, conglomerado y limonita de color rojo que aflora en gran porción central de la Sierra Madre Oriental y al S de la región petrolera de Pánuco – Ébano: la constituye una potente secuencia de capas rojas hasta de 2000 metros de espesor y se infiere una edad Jurásico medio, Caloviano. Suter (1990) indica una actividad volcánica contemporánea al depósito de esta formación. Los análisis petrofísicos y geoquímicos de tres muestras indican una composición que varía de félsica a intermedia, la Formación descansa con discordancia angular sobre la Formación Huayacocotla. El espesor de la Formación varía en la región de Molango entre 0 y 300 m. En la localidad tipo al occidente de la Región de Molango, la Formación Cahuassas aparece abruptamente, donde tiene, de acuerdo con los datos de Suter

---

(1990) espesores de hasta 600 m. Se le asigna una edad Jurásico Medio basándose en su posición estratigráfica. Los afloramientos característicos de la localidad, se presentan en cabalgadura en los flancos Norte y Sur del cuerpo gabro-anortosítico.

### **2.1.6 Formación Tepexic**

Definida por Erben (1956), la localidad tipo se designó en el sifón de la presa del río, Necaxa, ubicada aguas debajo de la planta Tepexic, en el norte del estado de Puebla. Como una secuencia de caliza de color gris a gris oscuro, caliza del mismo color de grano grueso y con bastantes granos de cuarzo, así como de calcarenita de color gris hasta gris oscuro. Esta Formación se considera por Rosales Lagarde de edad Calloviana, consta principalmente de caliza arenosa, marga y limolita, caracterizándose por su abundancia de fósiles, principalmente del género *Gryphaea*. Sus características litológicas indican un ambiente de depósito continental con una fuente de suministro constituida principalmente de rocas ígneas, con períodos de actividad volcánica, erosión y transporte contemporáneos, como un reflejo de la inestabilidad tectónica.



**Figura 2.2.** Afloramiento de la Formación Tepexic

### **2.1.7 Formación Santiago**

Definida formalmente por Cantú-Chapa, su localidad tipo en el Arroyo Santiago que desemboca en el Río Moctezuma, dentro el poblado Tamán, San Luís Potosí. Esta formación está constituida de: lutita de color gris oscuro con intercalaciones de caliza arcillosa en capas hasta de 40 cm de espesor, que se intemperizan a café pardo o rojizo, presentan clivaje diagonal a los planos de estratificación. En la cual el contacto inferior de la Formación Chipoco, constituida por un paquete de limolita negra calcárea en estratos de 10 a 30 cm. Presenta estratos de caliza negra. La parte superior de la Formación presenta abundantes concentración negras calcáreas, donde frecuentemente se hallan amonites bien conservados de género *reinecita*, presenta algunos estratos de calza arcillosas en forma aislada de color negro en espesores de 5 a 15 cm y se ha observado pirita diseminada. La Formación Santiago sobreyace concordantemente a la Formación Tepexic y subyace transicional y concordantemente a la Formación Chipoco. En base al

---

estudio de amonites su edad se determinó al Caloviano-Oxfordiano. Anteriormente Heim (1926) la considero como un miembro arcilloso de la Formación Tamán.

### **2.2.8 Formación Chipoco**

Definida por Hermoso y Martínez, su localidad tipo se encuentra al oeste del rancho Chipoco, Hidalgo, en la inmediación del Tajo Tetzintla de la Compañía Minera Autlán como una mezcla de diversas litologías; esta conjunto de rocas sedimentarias dispuestas en una alternancia de caliza de textura grainstone y lutita calcárea gris oscura. Ochoa Camarillo (1996) distinguió cuatro unidades litológicas se han descrito: La unidad Manganesífera eta constituida por caliza manganesífera arcillosa negra, en estratos de 10 a 20 cm, con algunas intercalaciones de lutitas calcáreas negras, La Unidad Arenosa está constituida por arenisca calcárea gris oscura en estratos de 20 a 60 cm con algunos a horizontes de cuarzo blanco lechoso, La Unidad limolítica se caracteriza por un predominio de limolita y lutitas calcárea gris oscura con algunas intercalaciones de caliza arcilloso negra con espesor de 20 a 40 cm, La unida rítmica está constituida por una secuencia de caliza negra recristalizada con estratos de 10 a 40 cm, por lo general es concordante y abrupto con la Formación Santiago, la edad se ha designado en base a los fósiles de amonites que comprende del Kimerkiano temprano al Titoniano temprano.



**Figura 2.3.** Afloramiento de la Formación Chipoco

### **2.1.9 Formación Pimienta**

Fue definida por Heim (1992) La localidad Tipo se encuentra 1 Km al norte del pueblo Pimienta sobre el rio Moctezuma. Suter (1990, p. 19) la describe como caliza micritica negra, con estratificación delgada y nódulos de pedernal negro, caliza arcillosa que contiene, en parte concentraciones esféricas de caliza y lutita, en partes bentónica, de color rojizo y verdoso, se puede diferenciar de la Formación Chipoco por la presencia de pedernal, así como los pliegues tipo chevron dentro de la Formación Pimienta, ya que la Formación Chipoco no tiene pedernal y generalmente no presenta pliegues internos, la zona de transición no pasa más de 20 m de espesor. La litología descrita en durante la extracción de muestras coincide con lo ya mencionado en la que afloran calizas de estratificación delgada de color negro con pedernal que van de 30 a 50 cm, con intercalaciones rítmicas de lutita negra, en espesores de 1 a 5 cm se encuentra con frecuencia pliegues tipo chevron. En general el espesor es considerable, llegando aproximadamente a 200 y hasta 250 m. Esta descansa encordantemente y transicional sobre la Formación Chipoco. En la que se encontraron fósiles de amonites. El Ambiente de depósito de la Formación pimienta es de carácter transgresivo, varia de plataforma externa a cuenca, con muy baja energía, su edad



---

corresponde a Tithoniano-Berriasiano. Por otro lado la Formación Pimienta sin duda, también representa partes considerables del Cretácico Inferior. Esto se deduce de su contacto superior de transición con la Caliza Tamaulipas, que es del Albiano-Cenomanian.



**Figura 2.4.** Afloramiento de la Formación Pimienta

#### **2.1.10 Formación Tlanchinol**

Establecida por Robín y Bobier (1975), describir los derrames volcánicos que afloran en la región del pueblo de Tlanchinol, describe a esta formación como una secuencia de derrames basálticos que descansan subhorizontalmente sobre sedimentos marinos plegados y erosionados. Las rocas de la Formación Tlanchinol pertenecen a la provincia magmática alcalina del oriente de México, propone una subdivisión de la provincia magmática, alcalina e incluye a la Formación Tlanchinol en la subprovincia del límite del altiplano, de basaltos y riolitas. Esta subprovincia se caracteriza por derrames basálticos intercalados, con secuencias félsicas y otros piroclásticos. En la región de Molango se comprobó que la Formación Tlanchinol, esta constituida por una serie de derrames basálticos intercalados con horizontes piroclásticos. La Formación Tlanchinol descansa sobre rocas precámbricas y sobre sedimentos marinos jurásicos y cretácicos, con discordancia angular y erosional muy marcada. El espesor máximo se encuentra entre los pueblos de Tlanchinol y Quetzalongo y es de 750 m.

---

### **2.1.11 Formación Atotonilco El Grande**

Los antecedentes de esta Formación fueron presentados por Geyne y colaboradores (1963, p. 56). Esta Formación se encuentra en la periferia del poblado de Atotonilco El Grande, Edo. De Hidalgo, La localidad tipo de esta formación se encuentra en la periferia del poblado Atotonilco el Grande, Estado de Hidalgo. Compuesta principalmente por capas de textura variable desde fangosita hasta conglomerado. En el área la litología consta principalmente de una secuencia de vulcanismo bimodal de rocas volcánicas como basaltos, intercalados con tobas de composición riolítica, dacítica y andesítica; lindinzita ya que nos encontrábamos en el centro de lo que antes fue un volcán y en la parte del escarpe, en la parte baja se encuentran bloques de extensión lo que indica la simetría de un rift de igual manera Robín (1975, 1982) considero estas tobas como ignimbritas. Y se estima que el espesor de esta Formación es mayor que 400 m, según los afloramientos de las inmediaciones de Molango. Las rocas de la Formación Atotonilco El Grande a una edad del Plioceno.



**Figura 2.5.** Derrames de basalto de la Formación Atotonilco El Grande

---

## 2.2. GEOLOGÍA LOCAL

En el área de estudio aflora areniscas y lutitas correspondientes a la Formación Huayacocotla de edad Sinemuriano – Pliensbaquiano del Jurásico Inferior, que de acuerdo con Ochoa-Camarillo, pertenece a la Unidad 3, con fósiles retrabajados, la cual suprayace a las calizas y lutitas de la Formación Tepexic de edad Calloviano del Jurásico Medio, a causa de la cabalgadura puerto la ermita, evidencia de un evento de compresión. Así mismo también se observan los derrames de basalto de la Formación Atotonilco El Grande, de edad Piacenziano – Gelansiano. Lamina 2.6.



**Figura 2.6.** Se observa la estratificación de la Formación Huayacocotla intemperizada.

En el área de estudio, se observa a simple vista una fuerte oxidación con un ramaleo de vetas de cuarzo tipo Stockwork consecuencia de la circulación de fluidos hidrotermales que se condujeron a través de una red de fracturas cercanas al fondo marino, alterando la roca encajonante e introdujeron la mineralización existente como se ve en la Lamina 2.7 así mismo también se observa una gran cantidad de pirita diseminada, Lamina 2.8



**Figura 2.7.** Se observa la mineralización tipo Stockwork.

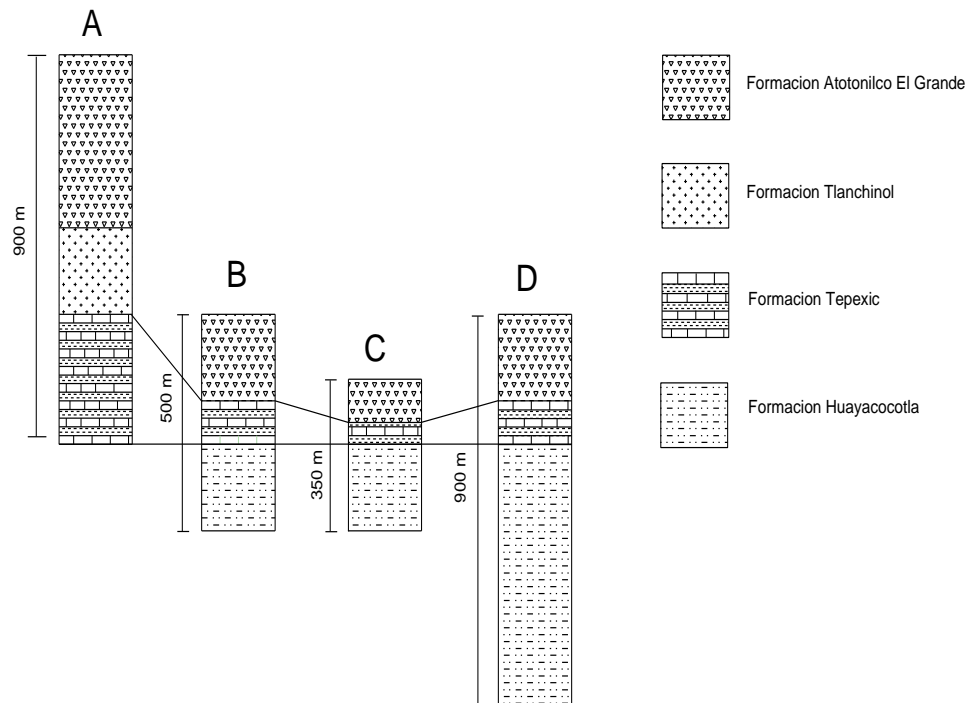


**Figura 2.8.** Se observa la disseminación de pirita.

En la correlación estratigráfica que se observa en la Figura 2.9, en donde en A) se encuentra al NE del área de estudio, en dirección hacia Xochicoatlán, donde podemos observar que aflora la Fm. Tepexic, Fm. Tlanchinol y Fm. Atotonilco El Grande, con ausencia de la Fm. Huayacocotla en esta área. B) esta columna se encuentra al SE, en dirección a Coatitlamixtla, en donde aflora la Fm. Huayacocotla, Fm. Tepexic y Fm. Atotonilco El Grande. C) esta columna se encuentra al SW, en donde está el área de estudio, aquí afloran la Fm. Huayacocotla, Fm. Tepexic y Fm. Atotonilco El Grande. D) esta columna está al NW, en dirección a Molango, en donde también se observó la Fm. Huayacocotla, Fm. Tepexic y Fm. Atotonilco. En el Anexo 2. Se muestra el mapa geológico de área de Xochicoatlán, Hidalgo.

Se observa un ciclo transgresivo del Jurásico Medio de la Formación Tepexic con dirección NE-SW, con el espesor menor en las columnas B y C, incrementando en dirección a la columna A, en contra parte de la columna D, en donde se exhiben los mayores espesores con afinidad continental.

Posiblemente de origen Precámbrico y continuo en el Jurásico Medio en la Formación Cahuassas, cabe mencionar que es notable otra fase transgresiva con dirección N-S, que coincide con fallas normales del Precámbrico y Jurásico Medio localizadas en Ixtlahuaco y en ortogneis del socavón de la mina Tetzintla, Otongo. (Cerecedo-Saenz, 2002)



**Figura 2.9.** Correlación estratigráfica del área de Xochicoatlán, Hidalgo.

---

## 2.3. ESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA CON RELACIÓN AL ORIGEN DEL GOLFO DE MÉXICO

### 2.3.1. Principales Eventos Tectónicos

Se observaron diversos eventos tectónicos como una fase de extensión que se inició durante el Jurásico Temprano y terminó a finales del Jurásico Medio. Lo que propició la formación de pilares y fosas tectónicas, que están delimitados por fallas normales de orientación NNW-SSE y N-S. Todas las fallas del Jurásico Inferior observadas están delimitando afloramiento del zócalo cristalino. Durante el Jurásico Medio, continuó la deformación distintiva, que propició e parte la formación de fosas nuevas y pilares tectónicos, evidenciados por la terminación busca lateral de los lechos rojos de la Formación indican que se depositaron en un sistema de fosas.

Las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas fueron plegadas entre el Cretácico Tardío (Orogenia Laramidica), formando un complejo de pliegues cabalgaduras llamado Anticlinorio de Huayacocotla, cuya complejidad es causada por la geometría estructural preexistente o inherente del basamento, así como por los sedimentos del horts y Grabens en esta región. El despegue basal de las estructuras Laramidica se encuentra en la Formación Huayacocotla, que descansa sobre el basamento metamórfico precámbrico. Despegue de pliegues y flats. Otro fenómeno Laramidico es la reactivación de las fallas normales jurásicas como fallas inversas, que delimitan al horts jurásico de Huiznopala (alto del basamento) en su lado oriental. Esta inversión está asociada con un acortamiento relativo local máximo. Las evidencias de dicho acortamiento se manifiestan al oriente del alto del basamento de Huiznopala, donde la cobertura sedimentaria esta intensamente plegada, siendo la de encima del alto del basamento menos plegada. Entre las formaciones Santiago y Chipoco se encuentra una brecha tectónica. El cual fue originado durante la orogenia Laramide. La parición abrupta de manganeso en la base de la Formación Chipoco, la ausencia total del manganeso en la cima de la Formación Santiago y el cambio litológico abrupto entre estas dos formaciones, sugieren un cambio brusco en las condiciones fisicoquímicas de la fosa donde se

---

estaban depositando la Formación Santiago, que se piensa se debió a la comunicación entre la fosa de Huayacocotla y el Golfo de México, que también permitió la comunicación entre los océanos Pacífico y Atlántico.

El último elemento tectónico es debido a extensión pospliocénica, evidenciadas por fallas normales de rumbo NW-SE. Que están delimitando al graben de Molango. El graben presenta una longitud de más de 10 km y un salto de más de 200 m. (Cerecedo Sáenz, 2002)

### **2.3.2. Eventos De Compresión**

Las rocas sedimentarias jurásicas cretácicas fueron plegadas durante el Cretácico superior al Eoceno superior (Orogenia Laramide), y formaron un conjunto complejo de pliegues y cabalgaduras el (Anticlinorio de Huayacocotla), en esta zona es posible observar la reactivación como fallas inversas de las fallas normales jurásicas, que permiten inferir en las cercanías un horst jurásico, (alto del basamento); esta inversión podría deberse a un acortamiento relativo local máximo. Las evidencias son inferidas al oriente del alto del basamento, donde la cobertura sedimentaria está intensamente plegada; en tanto que la cobertura sedimentaria del alto del basamento está menos plegada. El posible yacimiento de cobre - plata se encuentra exactamente en la zona de mayor complejidad estructural. En las cercanías de la cabalgadura de Naopa, y con cabalgaduras intraformacionales de la formación Cahuasas.

### **2.3.3. Eventos De Extensión**

Durante el Jurásico Inferior y Medio que propició la formación de fosas y pilares tectónicos delimitados por fallas normales. En el Jurásico Medio continúa la formación de las fosas y pilares tectónicos que son evidenciados por la terminación brusca de los lechos rojos de la Formación Cahuasas. Las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas fueron plegadas durante el Cretácico tardío-Eoceno tardío, en lo que se conoce como Orogenia Laramídica, formando un conjunto complejo de pliegues y cabalgaduras llamado Anticlinorio de

---

Huayacocotla. Finalmente, se tuvo un evento tectónico por extensión, pospliocenico, evidenciado por fallas normales que están delimitando a un graben como graben de Molango. (Cerecedo Sáenz, 2002)

#### **2.3.4. Mega Estructura De Molango**

Es una depresión topográfica formada por efectos de subsidencia causada a su vez por fallas normales relativamente paralelas, que se asocian con actividad volcánica y sísmica.

Como producto de la separación a lo largo de brazos activos del rift se desarrollan geosinclinales solo en los márgenes. Por su parte, un Aulacogeno es una estructura tectónica que se inicia por una fase de extensión en una región determinada, cuando cesa esta fase y no presenta un aspecto tectónico de un bien formado reside el nombre de Aulacogeno. Entre ambas estructuras, rift y Aulacogeno, hay su diferencia que permite reconocerlas, el rift continua con una fase de extensión posterior a su origen, el Aulacogeno se inicia como un graben estrecho, limitado por fallas posteriormente se ensancha, la dirección de los esfuerzos produce cabalgamientos y también se rompe por fallas.

Para reconocer la presencia de la estructura tectónica principal en Molango, Hidalgo, se tomaron también en cuenta los criterios siguientes:

- 1) Coladas de basalto y rocas ígneas bimodales

En Molango se tiene una secuencia de naturaleza bimodal (Robin 1979) que incluye las Formaciones Tlanchinol y Atotonilco el Grande, ambas del Cenozoico.

- 2) Lineamientos controlados por fallas

Suter (1990) y Carrillo-Martinez (1991) describieron la tectónica de una porción de la Sierra Madre Oriental y parte de la Cuenca de Tampico-Misantla; también describen alineamientos controlados por fallas de orientación noroeste-sureste; Ochoa Camarillo (1996, 1997) describe alineamientos controlados por fallas de dirección noroeste-sureste y norte-sur en la parte central del Anticlinorio de Huayacocotla.

- 3) Los pilares y fosas crean una paleotopografía de cuenca y sierras.



---

# CAPÍTULO III

---

*MÉTODOS GEOQUÍMICOS DE  
EXPLORACIÓN Y TÉCNICAS DE  
CARACTERIZACIÓN*

---

## **CAPITULO 3 METODOS GEOQUIMICOS DE EXPLORACION Y TECNICAS DE CARACTERIZACION**

### **3.1. LOS MÉTODOS GEOQUÍMICOS DE EXPLORACIÓN**

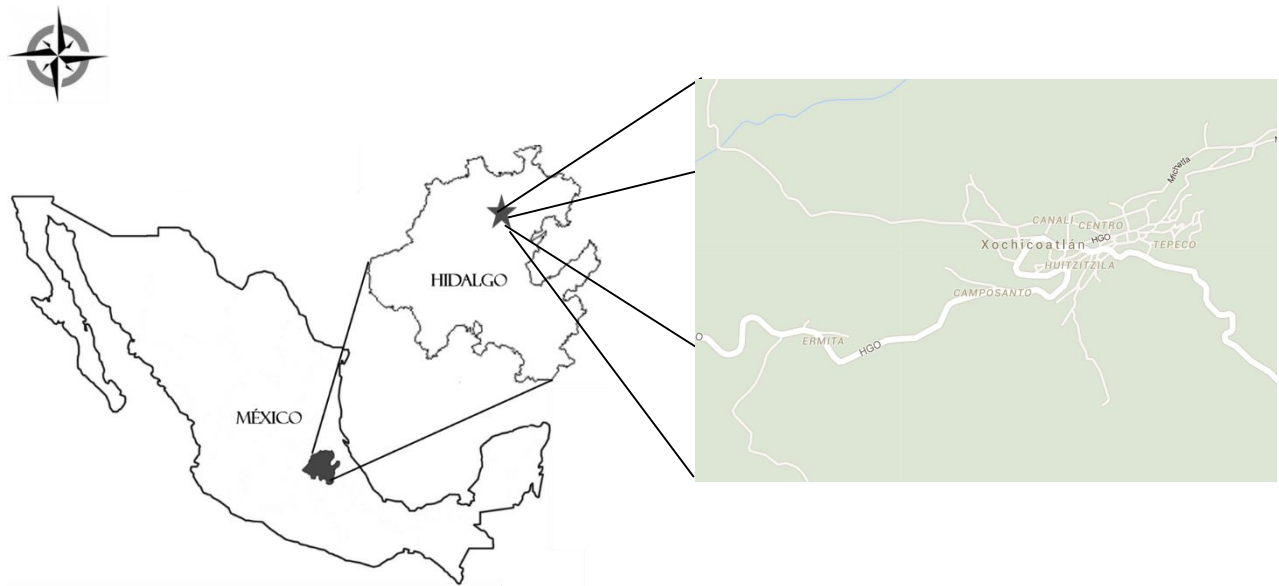
El área de estudio de donde se extrajo la muestra de núcleo, es posible observar una continua sección estratigráfica que permite obtener una relación preliminar de la geología, estratigrafía y tectónica del lugar para ubicar a la mineralización estudiada en una edad relativa del jurásico inferior.

Las muestras de material mineralizado así obtenidas, fueron estudiadas por diferentes métodos analíticos para establecer un análisis sistemático preliminar del yacimiento objeto de estudio, por lo que los esfuerzos se concentraron en los primeros cuatro metros de la principal zona mineralizada observándose en análisis microscópico en afloramiento de pirita fina diseminada y predominio de alta silicificación.

### **3.2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se localiza a 76 km en línea recta en dirección N10°E desde la ciudad de Pachuca, y a 5 km al SE de Molango de Escamilla en el Estado de Hidalgo. Territorialmente, se localiza dentro del municipio de Xochicoatlán, en las coordenadas geográficas 20°46'36.45" de latitud norte y 98°40'47.91" de longitud oeste.

Para llegar al área de estudio partiendo de Pachuca se cuenta como principal vía de acceso la carretera federal 105 Pachuca - Huejutla de Reyes, a la altura de Molango de Escamilla, se encuentra una desviación al este hacia Xochicoatlán, donde se recorren 7.7 km de carretera pavimentada, donde esta la desviación al sur hacia Coatitlamixtla, donde se recorren 0.8 km por un camino de terracería que conduce al área de estudio.



**Figura 3.1.** Localización y vías de acceso del área de estudio.

### 3.3 MUESTREO

En el área de estudio se realizara un muestreo proporcional, solo se obtuvo una parte del yacimiento pues se tomó en cuenta que es el área donde se presenta más alteraciones en la roca, como algunas evidencias estructurales, que hace que exista la inquietud de saber lo que se pudiera encontrar.

El muestro se realizó con ayuda de una máquina de barrenacion Winkie Portatil la cual es accionada por gas con 2 ciclos y con motor de enfriamiento por aire, se perforo en la coordenadas, con una inclinación de  $45^\circ$ , en las coordenadas  $20^\circ 46' 01''$  N y  $98^\circ 41' 86''$ . Se extrajo un nucleo con 9 metros de longitud y con un diámetro de 1.23 pulgadas en el área de estudio, la cual previamente fue programada al haberse realizado el reconocimiento de la geología del área, como de las estructuras presentes, además con ayuda de la mineralogía se pudo inferir el sitio donde seria de interés perforar para así saber un poco más del yacimiento,

infiriendo en base a la reconstrucción paleogeografía la presencia de metales base en el yacimiento.



**Figura 3.2.** Máquina de barrenación en el área de estudio.

El núcleo de barrenación fue muestreado cada 0.25 m obteniendo 36 muestras del de las cuales 9 muestras son las que se caracterizaron por los diferentes métodos geoquímicos.

<b>Tabla 3.1. Datos de las muestras</b>		
<b>Numero de Muestras</b>	<b>Nombre de Muestras</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
1	XOCH-100	100 cm
2	XOCH-200	200 cm
3	XOCH-300	300 cm
4	XOCH-400	400 cm
5	XOCH-500	500 cm
6	XOCH-600	600 cm
7	XOCH-700	700 cm
8	XOCH-800	800 cm
9	XOCH-900	900 cm

---

### 3.4. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X, es muy útil para identificar fases minerales; se puede obtener una gran variedad de datos como son: el sistema cristalino de los diferentes minerales, su composición aproximada, el tamaño de cristal, su cristalinidad, su alineación preferencial, entre otros. Por su versatilidad y el gran número de datos que proporciona es una técnica muy empleada.

La fuente o tubo utilizado genera radiación de cobalto, y dispone su arquitectura de un detector curvo que utiliza una mezcla de gas inerte como etano-argón.

La energía de operación de este equipo usualmente es de 20 mA- 30 Kv. Por otro lado, la muestra se preparó a un tamaño fino de 35 $\mu$ m o 200 mallas de la serie de Taylor. Utilizando un mortero de ágata para pulverizar la muestra; la cual peso cada una unos 0.5 gramos aproximadamente.



**Figura 3.3.** Difractómetro Marca Inel, modelo Equinox 2000

---

### **3.4.1. Preparación De La Muestra**

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) en muestras de núcleo fueron preparadas pulverizando la muestra en un mortero de ágata a un tamaño de partícula aproximado de  $-10\ \mu\text{m}$ , luego se compactó en un porta muestras de aluminio de aproximadamente 1 cm de diámetro, con el apoyo de un pistón de Al de 2.54 cm de longitud.

La muestra así montada; se colocó en un difractómetro Marca Inel, modelo Equinox 2000 provisto de un detector curvo operable con mezcla de gas Etano-Argón de alta pureza 99.9 %.

Este tipo de análisis efectuado es de la zona mineralizada, y cuyos datos obtenidos del difractograma se compararon y evaluaron con el software de difracción Match 1.0

### **3.5. ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍAS (MEB-EDS)**

La microscopia electrónica de barrido MEB, proporcionan la textura, y morfología de la muestra mineral. Además, si cuenta con EDS es posible obtener un análisis por elemento aproximado en un punto preciso. Si requiere observar la textura del mineral, micro fósiles existentes, su textura, u observar un halo de descomposición, entonces, deberá cortar un pequeño fragmento de muestra montarla en resina y desbastarlo y pulirlo hasta acabado espejo. Si quiere observar la muestra sin bisecar alguna estructura en particular, puede montar el polvo en una cinta especial para MEB. En ambos casos, probeta o cinta, deberá de recubrir con grafito si quiere determinar metales incluyendo oro, y deberá de recubrir con oro los elementos con baja conductividad. No tendrá necesidad de recubrir si el MEB es de bajo vacío.



**Figura 3.4.** Microscopio JEOL JSM-6300 y equipado con un detector EDS.

### **3.5.1. Preparación De La Muestra**

Las muestras analizadas por microscopía electrónica de barrido fueron empleadas con el objetivo de estudiar texturas y distribución cualitativa de los elementos en las muestras de núcleo.

Por ello las muestras para determinar la composición por medio de MEB-EDS fueron finamente pulverizadas a malla +200 o más de 35  $\mu\text{m}$ , con mortero de ágata, posteriormente, se montaron en papel de grafito adhesivo y recubiertas con oro para ser analizadas en un microscopio JEOL JSM-6300 y equipado con un detector EDS.

### **3.6. ANALISIS POR PLASMA DE INDUCCION ACOPLADA (ICP)**

La Espectroscopía de Plasma-Masa Inductivamente Acoplada (ICP-MS por sus siglas en inglés) es un método de alta resolución que permite la detección de concentraciones de elementos en el orden de partes por millón (Schäfer, 2006; Kamber y Webb, 2007) y de ahí se transforman en otras unidades como ppm, gr/ton, o se transforman a óxidos. Es una técnica de análisis instrumental que muestra el análisis químico por elemento en ppb.

---

Desde luego, el análisis por vía húmeda es una técnica tradicional de análisis químico muy preciso. A través de reactivos de uso común en química se realizan diferentes técnicas volumétricas que permiten calcular de forma indirecta la cantidad de algún elemento químico en particular y proporciona con gran precisión el porcentaje del elemento químico.

En muchos análisis químicos basta 1 gramo para realizar el análisis por triplicado. A través de sencillas reglas de tres, se determina el porcentaje del elemento; como elemento o como mineral de acuerdo al consumo volumétrico y se requiere una gran variedad de reactivos químicos de alta pureza, algunos ácidos y bases, además, de materiales de vidrio de laboratorio.

### **3.6.1. Preparación De La Muestra**

A partir de un gramo de muestra, se requiere hacer diluciones de acuerdo a la técnica específica, se prepararan los patrones o soluciones con un contenido específico de elemento para realizar la curva de calibración; usualmente, se utiliza gas argón de ultra alta pureza para generar el plasma.



---

# CAPITULO IV

---

## *RESULTADOS Y DISCUSIÓN*

## CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS

#### 4.1.1. Caracterización Por Difracción De Rayos X (DRX)

##### 4.1.1.1. Muestra XOCH-100

En la Figura 4.1, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-100, que yace a un metro de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [99-100-5715], Moganita PDF: [99-100-2734], Albita PDF: [01-083-1605], Moscovita PDF: [00-019-0814], e Ilmenita PDF: [00-003-0778].

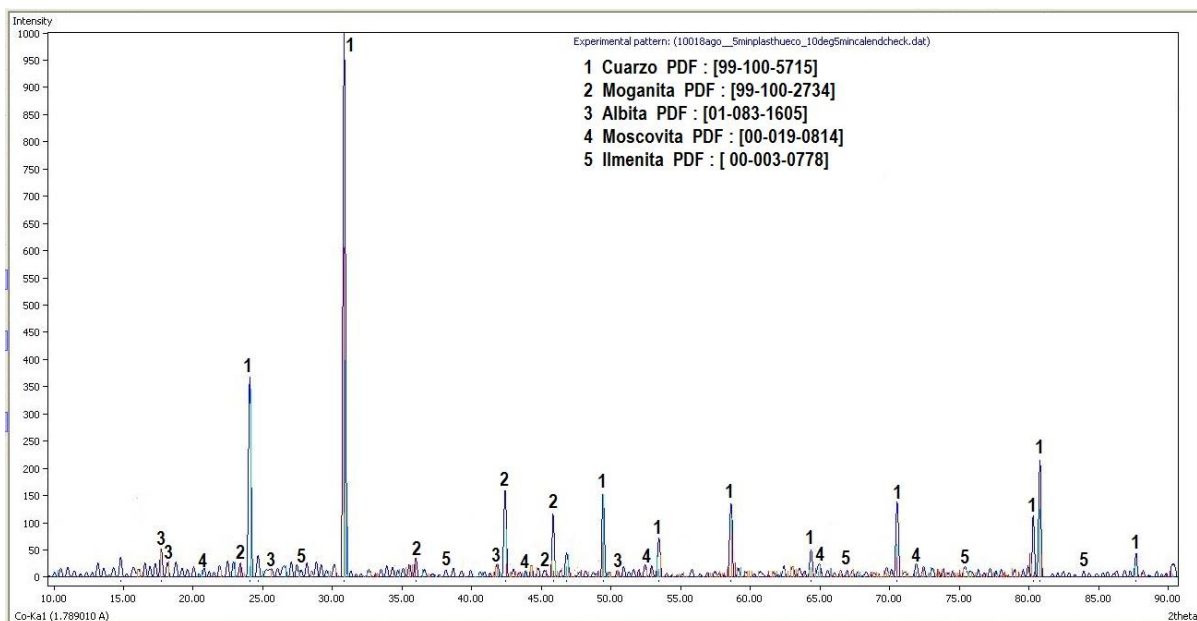


Figura 4.1. Difractograma de la muestra XOCH-100

#### 4.1.1.2. Muestra XOCH-200

En la Figura 4.2, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-200 que yace a dos metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [00-033-1161], Argentopirita PDF: [00-007-0347], Wurzita PDF: [01-072-0162], y Moscovita PDF: [00-019-0814].

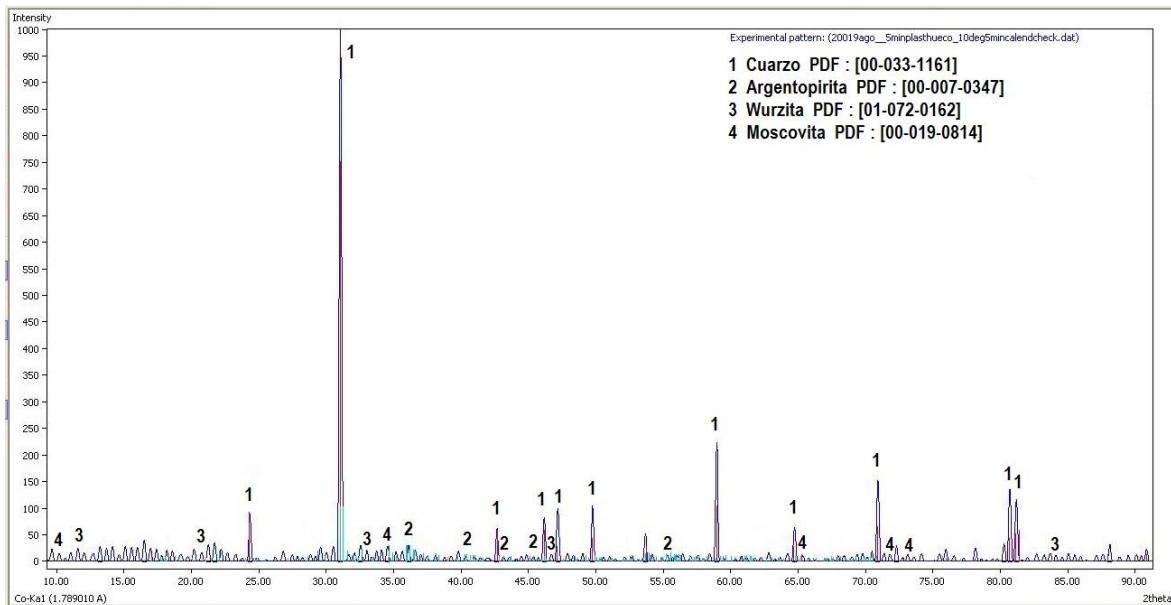


Figura 4.2. Difractograma de la muestra XOCH-200

### 4.1.1.3. Muestra XOCH-300

En la Figura 4.3, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-300 que representa tres metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [00-033-1161], Argentopirita PDF: [00-007-0347] y Monacita PDF: [00-004-0612].

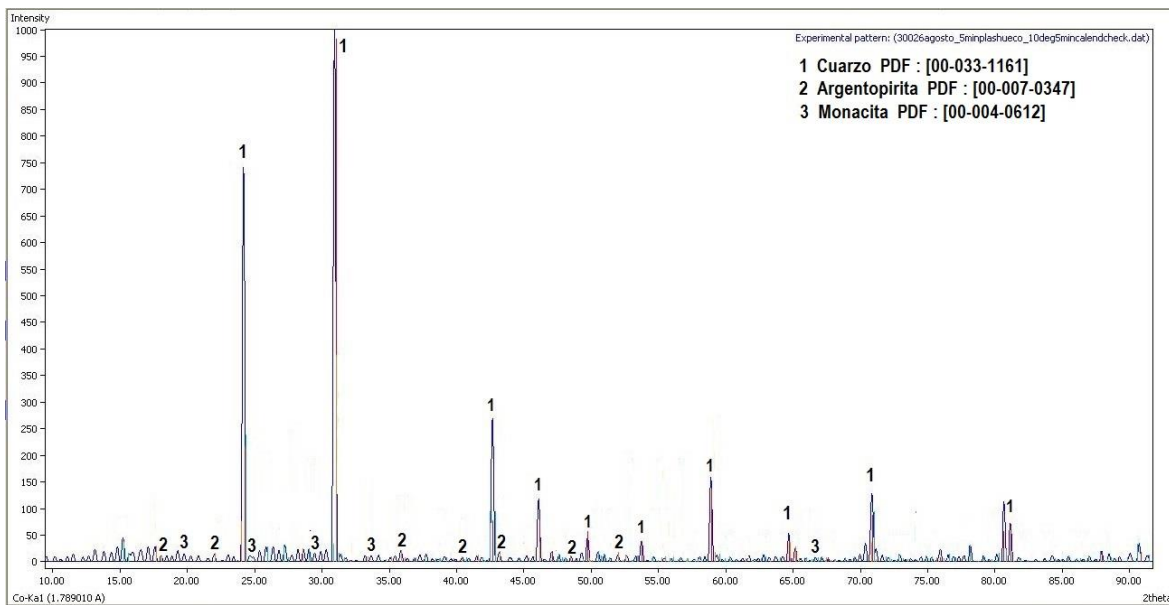


Figura 4.3. Difractograma de la muestra XOCH-300

#### 4.1.1.4. Muestra XOCH-400

En la Figura 4.4, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-400 que representa la muestra tomada a cuatro metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Ilmenita PDF: [00-003-0781], Moscovita PDF: [00-019-0814], Cuarzo PDF: [99-100-5718], Calcopirita PDF: [00-037-0471], Albita PDF: [01-083-1605] y Moganita PDF: [99-100-2734].

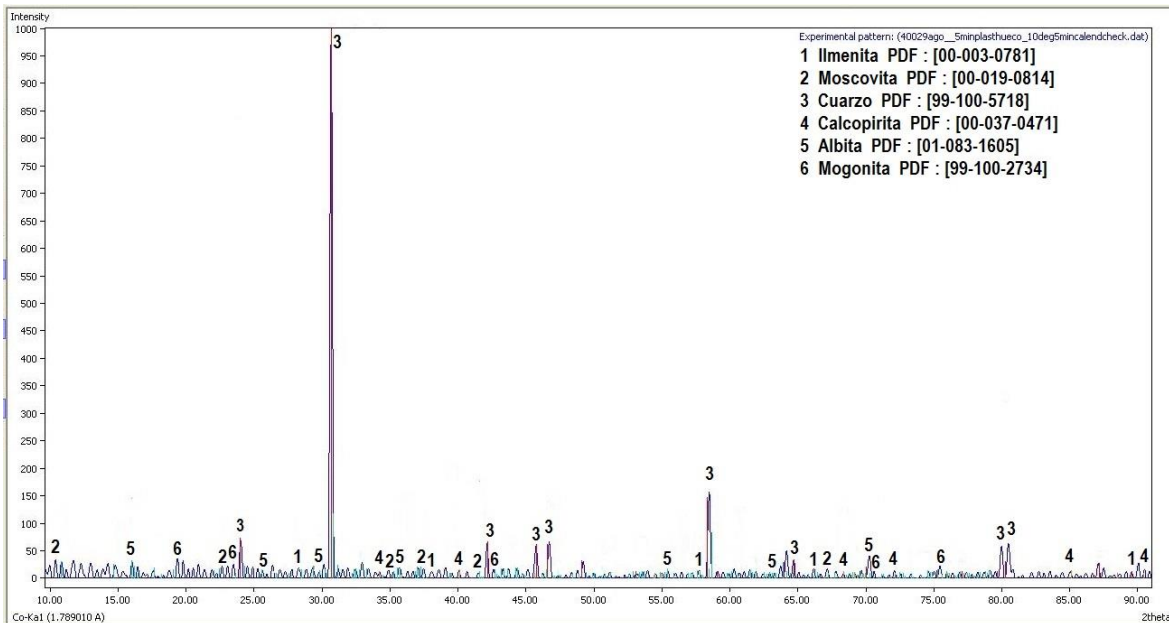


Figura 4.4. Difractograma de la muestra XOCH-400

#### 4.1.1.5. Muestra XOCH-500

En la Figura 4.5, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-500 que representa la muestra tomada a los cinco metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Monacita PDF: [00-004-0612], Magonita PDF: [00-038-0360], Moscovita PDF: [00-019-0814] y Albita PDF: [00-003-0508].

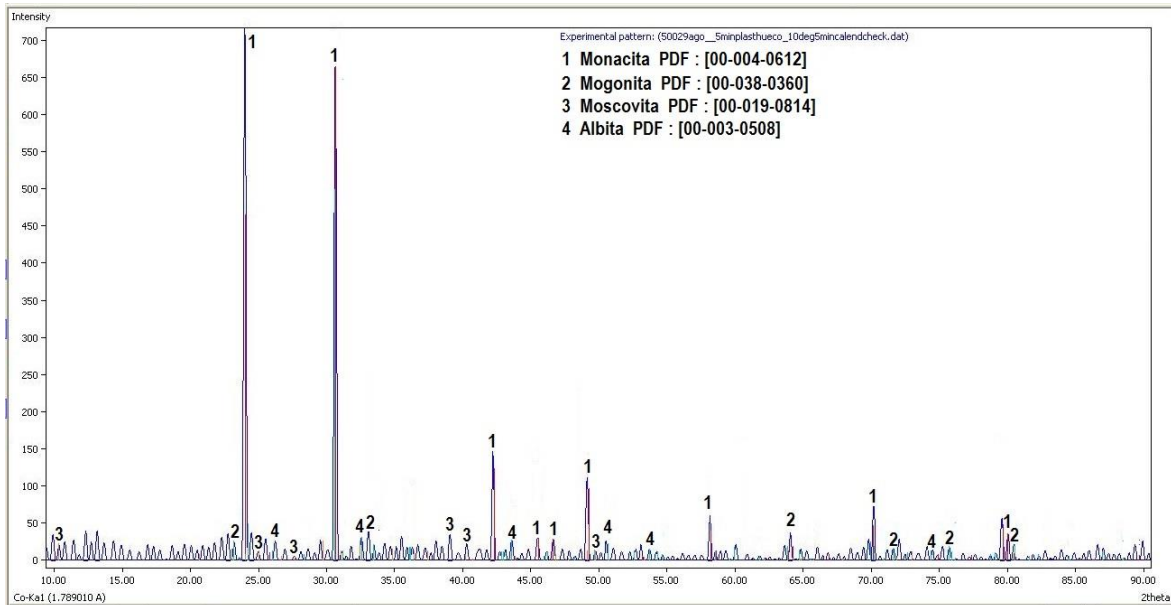


Figura 4.5. Difractograma de la muestra XOCH-500

#### 4.1.1.6. Muestra XOCH-600

En la Figura 4.6, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-600 que representa la muestra tomada a los seis metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [01-085-0798], Albita PDF: [01-083-1605], Ilmenita PDF: [00-003-0781], Moscovita PDF: [00-019-0814] y Monacita PDF: [00-004-0612].

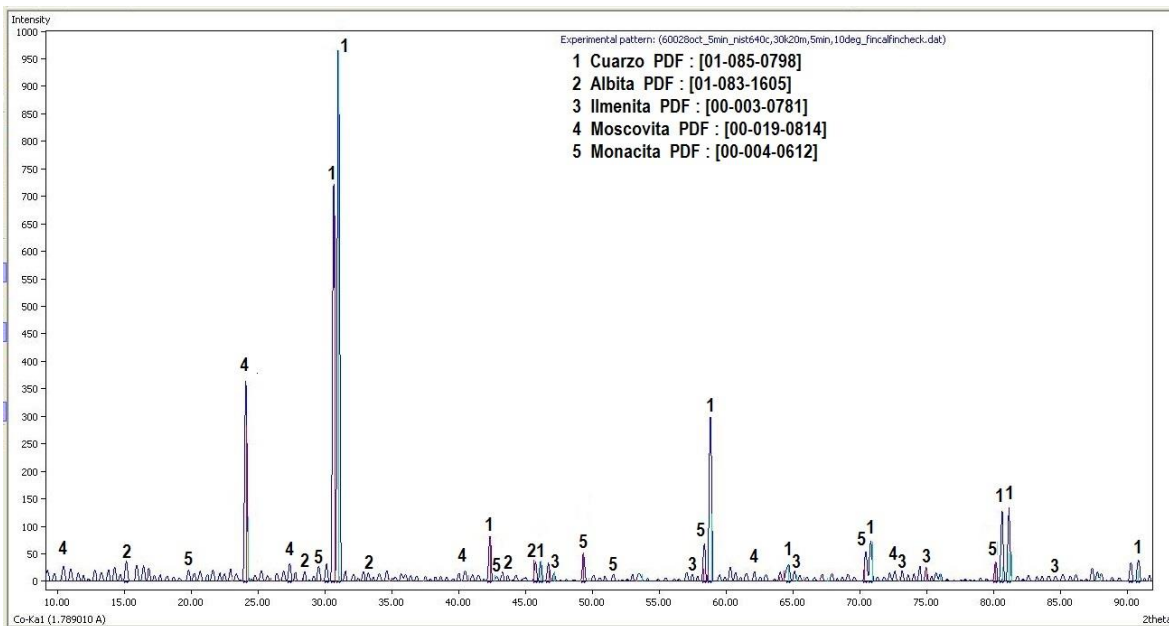


Figura 4.6. Difractograma de la muestra XOCH-600

#### 4.1.1.7. Muestra XOCH-700

En la Figura 4.7, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-700 que representa la muestra tomada a los siete metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [01-083-2466], Magonita PDF: [00-038-0360] y Moscovita PDF: [00-019-0814].

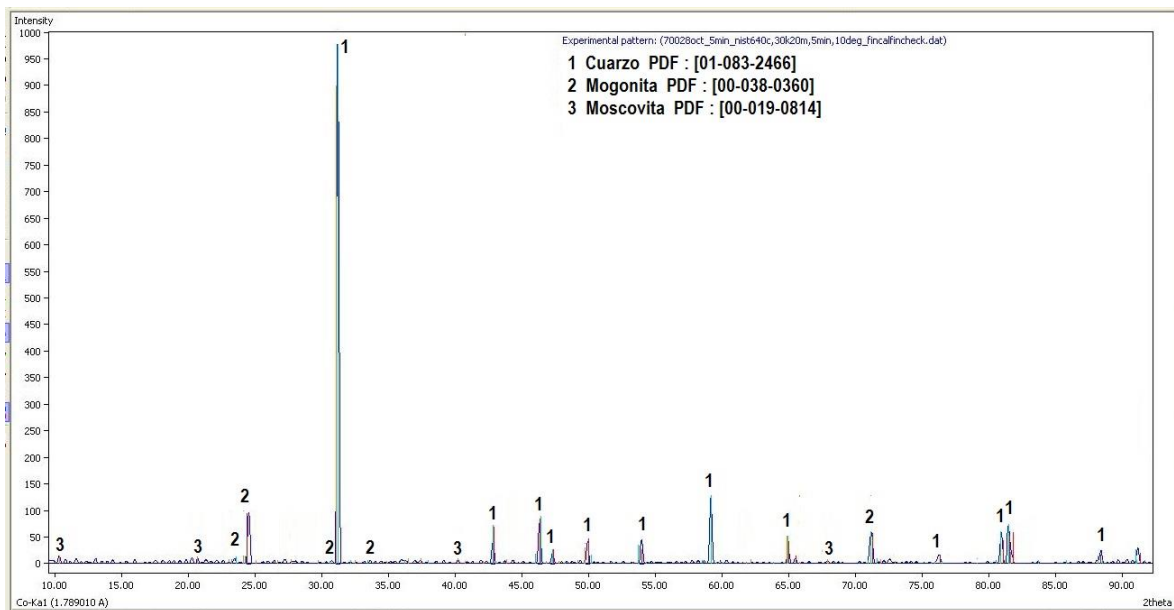


Figura 4.7. Difractograma de la muestra XOCH-700



#### 4.1.1.8. Muestra XOCH-800

En la Figura 4.8, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-800 que representa la muestra tomada a los ocho metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: [00-019-0814], Pirita PDF: [00-042-1340], Cuarzo PDF: [00-046-1045] y Monacita PDF: [00-004-0612].

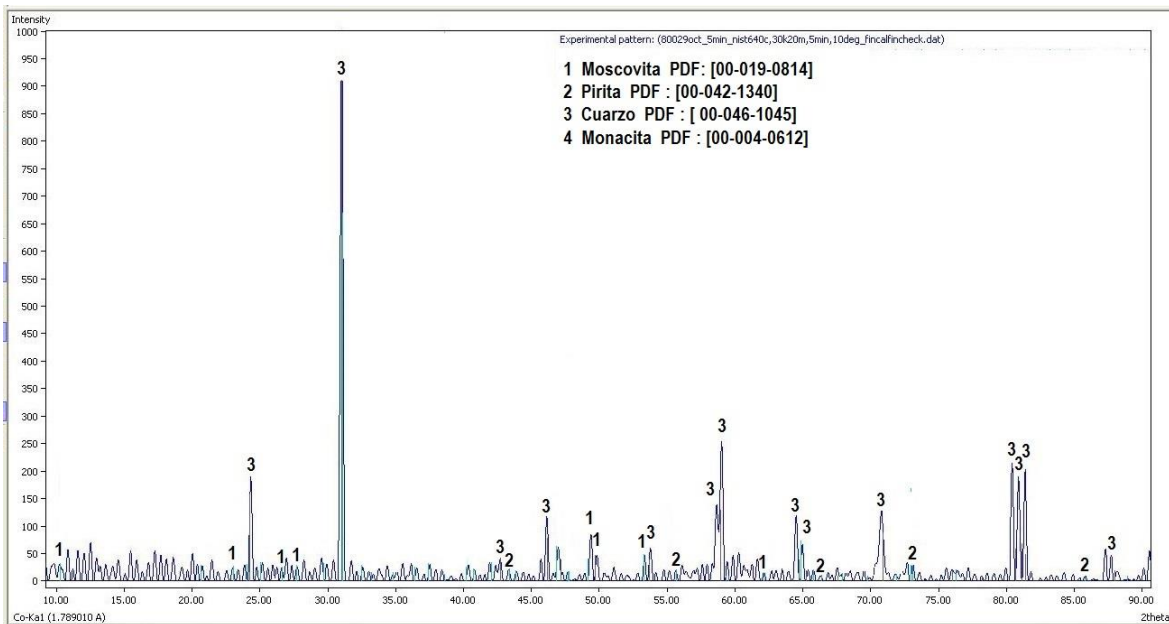
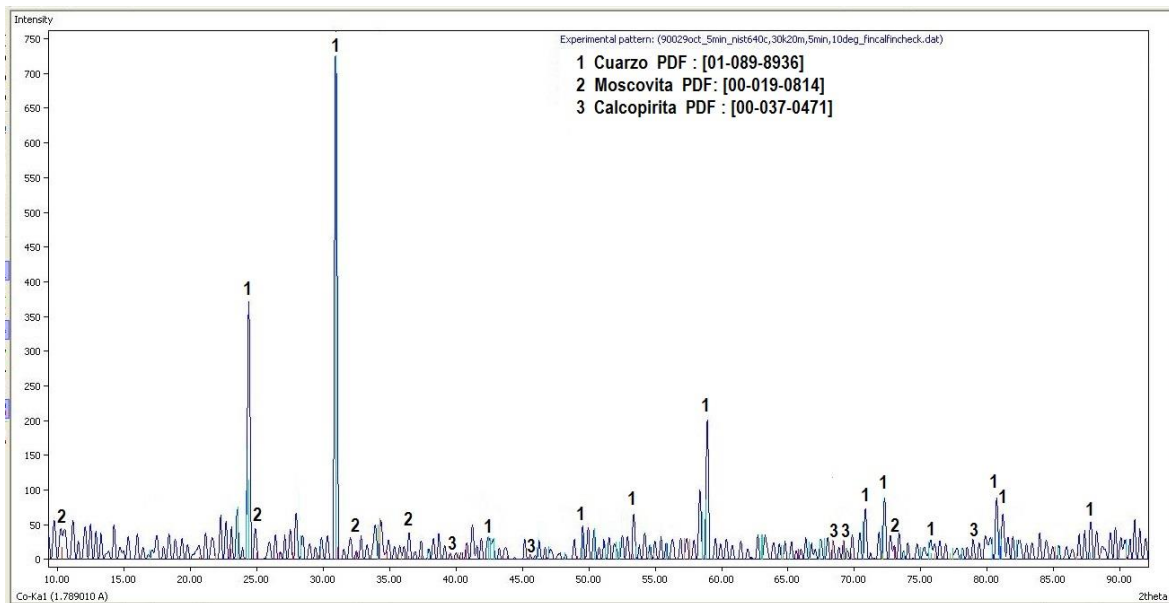


Figura 4.8. Difractograma de la muestra XOCH-800

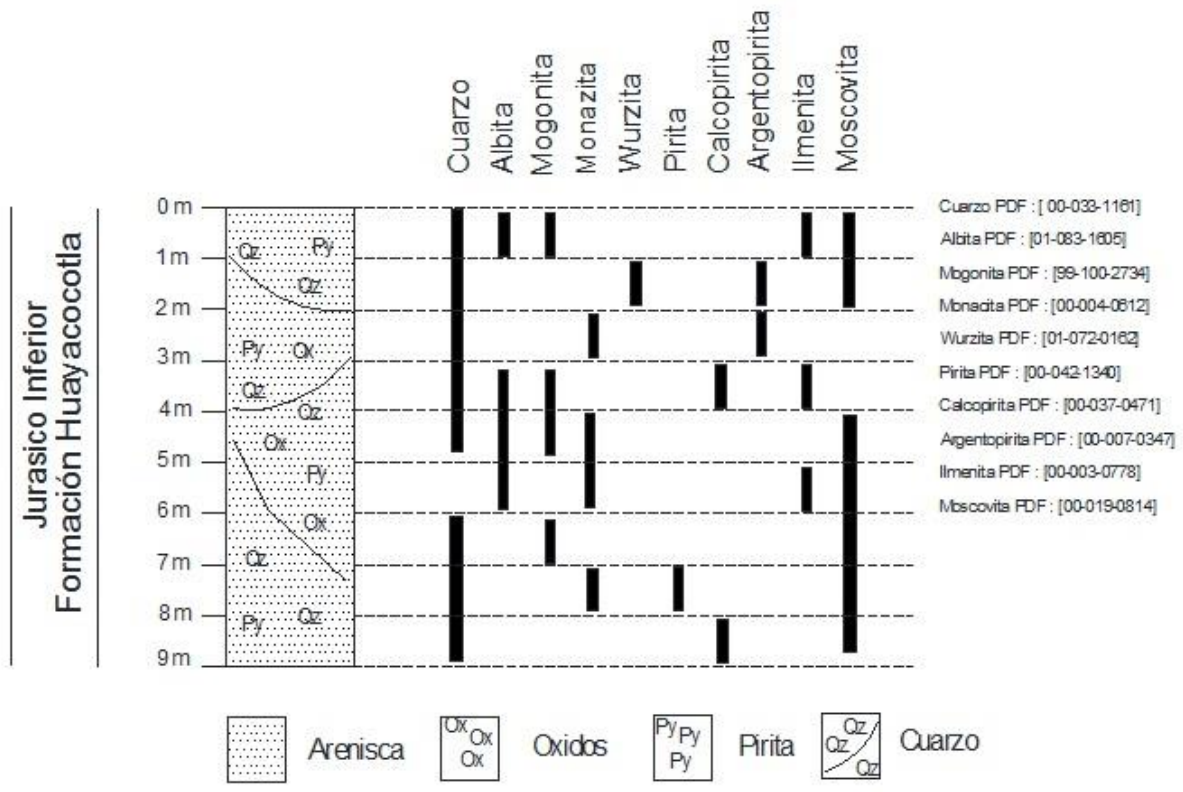
#### 4.1.1.9. Muestra XOCH-900

En la Figura 4.9, se muestra el difractograma de la muestra XOCH-900 que representa la muestra tomada a los nueve metros de profundidad, analizada bajo las condiciones mencionadas en el capítulo 3.

En el difractograma fue posible identificar los siguientes minerales: se encontraron los siguientes minerales: Cuarzo PDF: [01-089-8936], Moscovita PDF: [00-019-0814] y Calcopirita PDF: [00-037-0471].



**Figura 4.9.** Difractograma de la muestra XOCH-900



**Figura 4.10.** Distribución de minerales por medio de DRX, en el núcleo de barrenación.

---

## **4.1.2. Caracterización Microestructural Por Microscopia Electronica de Barrido y Espectrometria de Energia Dispersiva (MEB-EDS)**

### **4.1.2.1. Muestra XOCH-100**

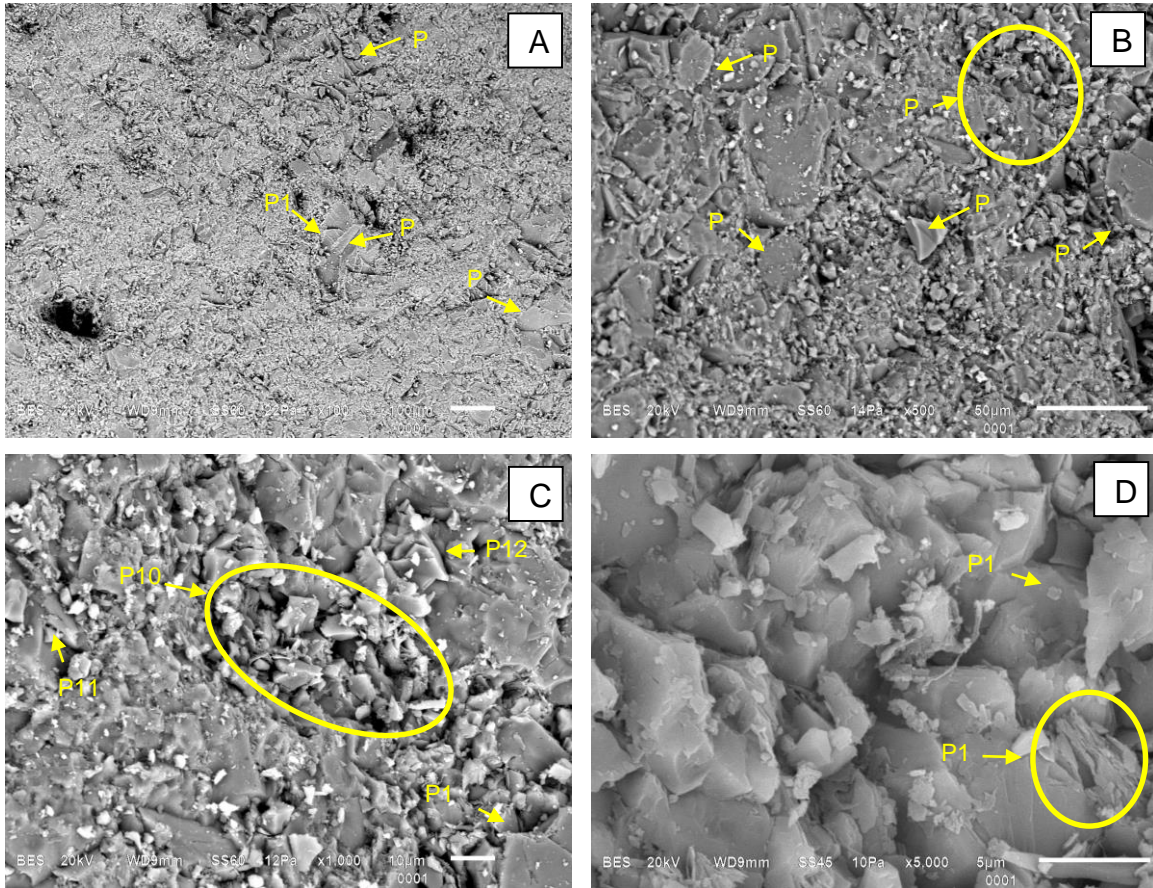
En la Figura 4.11. A) Se aprecia la microestructura de la muestra XOCH-100, en donde se observa una superficie sinuosa, constituida por partículas del orden de  $6.6 \mu\text{m}$  a  $21 \mu\text{m}$  en la que se distinguen estructuras euhedrales tales como en P1, en donde se observa un pentágono no uniforme con dos lados de  $46 \mu\text{m}$ , y dos lados de  $40 \mu\text{m}$  y un lado de  $33 \mu\text{m}$ , así mismo se distingue otra estructura euhedral señalada como P2 en donde se muestra un paralelepipedo con un largo de  $73 \mu\text{m}$ , mientras que su ancho va de  $20 \mu\text{m}$  a  $33 \mu\text{m}$ . En P3 se observa una estructura subhedral con lados de  $66 \mu\text{m}$  y  $100 \mu\text{m}$ , en tanto en P4 se observan un conjunto de estructuras anhedrales que van de  $13.3 \mu\text{m}$  a  $33 \mu\text{m}$ .

Por otra parte en las figuras, B, C y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se distingue estructuras euhedrales tales como la señala P5, en donde se aprecia un triángulo con una base de  $20.3 \mu\text{m}$  y sus lados de  $18.7 \mu\text{m}$ , de igual forma se distinguen hexágonos no uniformes, con lados que van de  $7.8 \mu\text{m}$  a  $17.1 \mu\text{m}$ , señalados como P7 y P8. En el P9 se muestran estructuras anhedrales que van de  $3.1 \mu\text{m}$  a  $17.1 \mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia unas estructuras anhedrales que van de  $1.3 \mu\text{m}$  a  $11.3 \mu\text{m}$ , las cuales se señalan como P10, de igual forma se observan un triángulo con una base de  $4.6 \mu\text{m}$  y sus lados de  $4 \mu\text{m}$  señalado como P11, por otro lado se identifica un prisma triangular, al cual se aprecian unos lados con  $12.6 \mu\text{m}$  y se marca como P12. En el P13 se presenta una estructura subhedral que va de  $8 \mu\text{m}$  a  $11.3 \mu\text{m}$ .

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde podemos observar estructuras anhedrales en su mayoría, que van de  $0.2 \mu\text{m}$  a  $2.7 \mu\text{m}$ , algunas estructuras euhedrales identificadas son un cuadrado con lados de  $0.4$

$\mu\text{m}$ , señalado como P14. En P15 se observa una estructura fibrosa con un largo de  $5.5 \mu\text{m}$  y un ancho de  $2.0 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.11.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-100.

En la muestra XOCH-100, la cual está constituida por O, Si, Al, K y en cantidades menores Ti y Fe, y en las zonas identificadas 2 y 3 se observan que está conformada por O, Si, Al, C y en cantidades menores K, Fe, Ti y Mg. Como se ilustra en la Tabla 4.1.

---

**Tabla 4.1. Muestra XOCH-100**

---

Elementos	Zona 1 (wt %)	Zona 2 (wt %)	Zona 2 (wt %)
C	59.07	2.37	4.04
O	0	57.85	54.63
Mg	0.2	0.06	0.06
Al	4.92	2.82	2.49
Si	33.72	35.52	36.71
K	1.25	0.73	0.65
Ti	0.21	0.1	0.27
Fe	0.62	0.56	1.15

---

#### **4.1.2.2. Muestra XOCH-200**

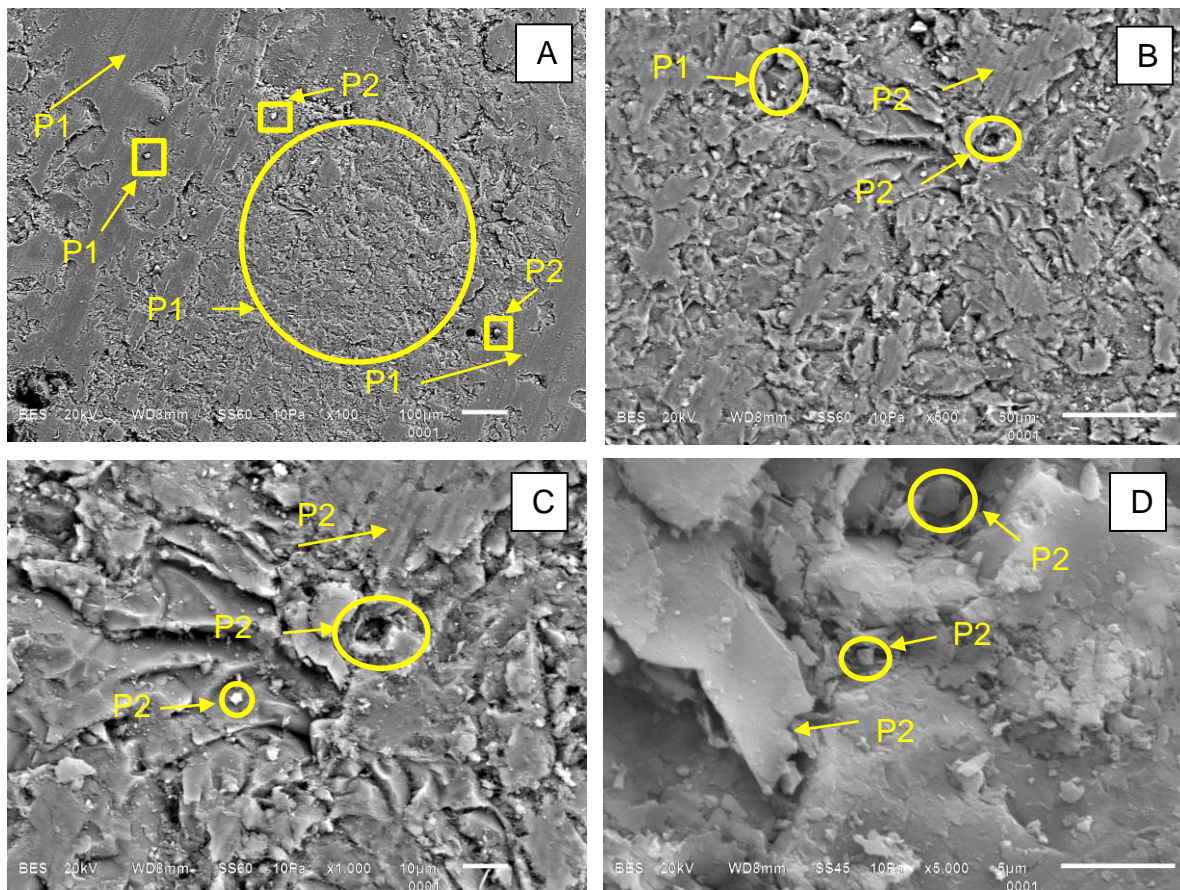
En la Figura 4.12, A) Se aprecia dos tipos de microestructuras una lisa con alineamientos con dirección preferencial, señalado como P16 y P17, y una estructura rugosa aparentemente formada de morfología anhedrales y partículas que tienen un tamaño del orden que va de 7.1  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$ , el cual se identifica como P18. En P19, P20 y P21 se observan claramente partículas redondeadas que sobre salen de la estructura lisa y rugosa, que van de 14.2  $\mu\text{m}$  a 21.4  $\mu\text{m}$ .

Por otra parte en las figuras B, C, y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se alcanza a observar un estructura lisa con líneas con la misma dirección, la cual está siendo señalada como P22, por otra parte, en la estructura rugosa se alcanzan apreciar una cavidad con forma circular bien definida con un diámetro de aproximadamente 6.9  $\mu\text{m}$ , señalado como P23, también sobre sale una forma euhedral marcado como P24, con forma de una pirámide triangular, se observan sus tres lados iguales de 8.3  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia nuevamente la estructura lisa (P22) de la figura A y en la cavida (P23), u mayor acercamiento se permite identificar una estructura euhedral

señalada como P24, en donde se muestra un pentágono con lados de  $1.4 \mu\text{m}$ , por otra parte se distinguen estructuras anhedrales que van de  $7.1 \mu\text{m}$  a  $21 \mu\text{m}$  junto con partículas que van de  $0.7 \mu\text{m}$  a  $3.5 \mu\text{m}$ .

Por ultimo en la figura D) Se observa la presencia de estructuras tanto euhedrales como subhedrales y algunas anhedrales, se señala como P25 a una estructura subhedral con lados que van de  $2.7 \mu\text{m}$  a  $6.2 \mu\text{m}$  y un ancho de  $3.8 \mu\text{m}$ , las estructuras euhedrales identificadas como (P26), se alcanza a apreciar un prisma triangular, con una de las bases de  $0.2 \mu\text{m}$ , al igual que dos P27 es otra de las estructuras euhedrales, esta tiene una forma de un hexágono irregular con lados que van de  $0.6 \mu\text{m}$  a  $1.1 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.12.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-200.

En la Muestra XOCH-200, se identifico O, C, Si en cantidades mayores y en cantidades menores Al, la señalada zona 1 y en las zonas 2 y 3 se observan que está conformada en su mayoría por O, Si, C, Al y en cantidades menores K, Fe, Mg, Como se ilustra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Muestra XOCH-200**

Elementos	Zona 1 (Wt %)	Zona 2 (Wt %)	Zona 3 (Wt %)
C	27.94	5.57	8.59
O	52.57	56.94	61.87
Mg	-	0.1	-
Al	0.67	4.77	0.59
Si	18.82	30.75	28.95
K	-	1.53	-
Ti	-	0.05	-
Fe	-	0.3	-

#### **4.1.2.3. Muestra XOCH-300**

En la Figura 4.13. A) Se aprecia la microestructura de la muestra M03-300 en la cual se observa un superficie casi plana con un poco de sinuosidad, aparenta desprendimientos laminares irregulares, constituida por partículas que van de 3.3  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$ , en donde se distingue una estructura euهدral tal como la P28, un heptágono regular con lados de 13.3  $\mu\text{m}$ . En P29 se observa una cavidad o drusa rellena de algunas partículas con un tamaño de 13  $\mu\text{m}$ , la cual tiene un diámetro de aproximadamente 46  $\mu\text{m}$ , así mismo en P30, así mismo se observa una drusa de mayor tamaño, con 66.6  $\mu\text{m}$  de diámetro, pero con partículas más pequeñas.

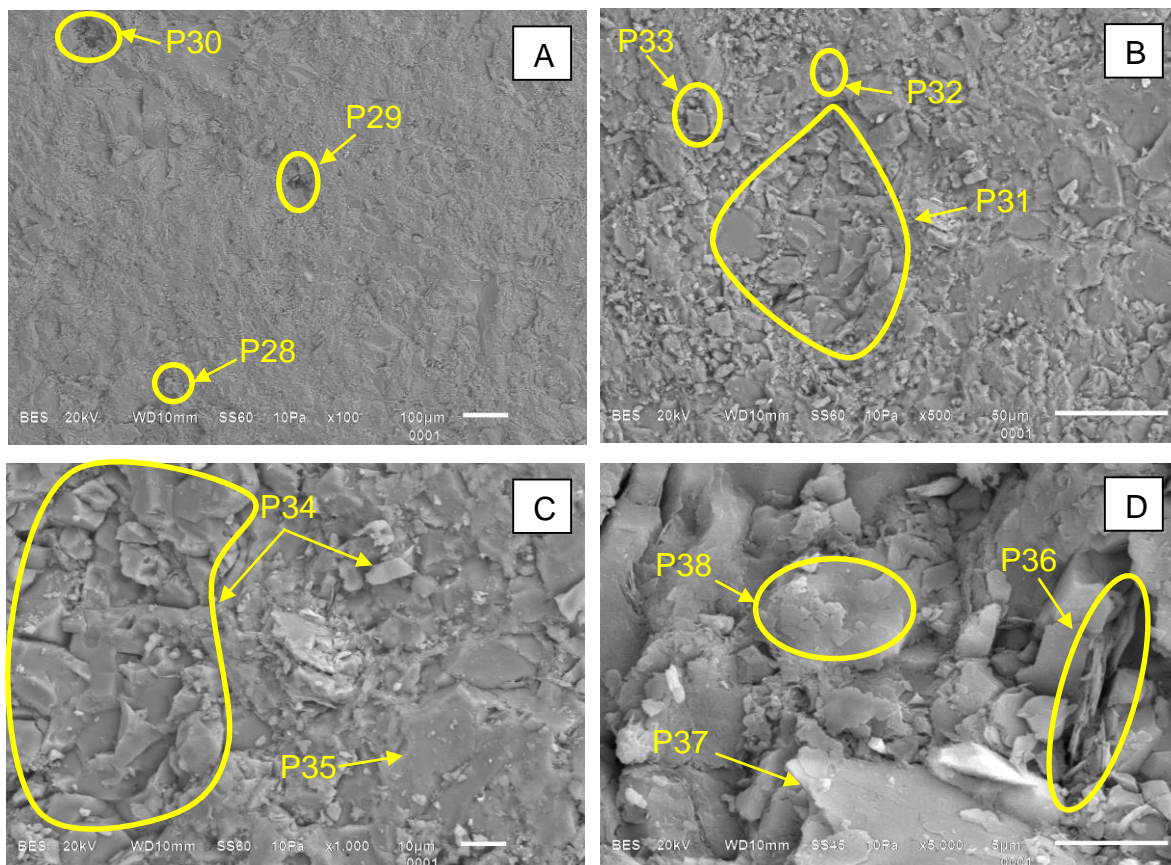
Por otra parte en las figuras B, C y D , se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B), se observan estructuras en su mayoría partículas del orden 1.3  $\mu\text{m}$  a 11.1  $\mu\text{m}$ , por otra parte se distinguen estructuras anhedrales tales como se señala en P31, que van de 12.5  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$ , así mismo se observan algunas estructuras euهدrales, como la señalada P32 , en donde se identifica un triángulo regular con lados de



5.5  $\mu\text{m}$ , otra de las estructuras euhedrales, tal como P33, en donde se muestra un cuadrado con lados de 8.3  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se distinguen dos tipos de estructuras, una rugosa con formas subhedrales, tal como se muestra en P34, con tamaños que van de 6.4  $\mu\text{m}$  a 20.7  $\mu\text{m}$ , por otra parte se distingue una estructura lisa, señalada como P35, con un tamaño aproximado de 57.1  $\mu\text{m}$  y por encima se distinguen pequeñas partículas que van de 0.7  $\mu\text{m}$  a 3.5  $\mu\text{m}$ .

Por ultimo en la figura D) se observa en su mayoría estructuras anhedrales, y alcanzan a distinguir algunas diferentes formas como es en P36, en donde se aprecia una estructura laminar con un largo de 9  $\mu\text{m}$  y un ancho de 0.1  $\mu\text{m}$ , con forma de lajas, y se observa una estructura lisa, con un tamaño de 13.6  $\mu\text{m}$ , señalada como P37. En P38 se distingue mejor el desprendimiento tipo lajas, pero en forma anhedral, que va de 0.5  $\mu\text{m}$  a 1.3  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.13.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-300.

En muestra XOCH-300, se identificaron 3 diferentes zonas, en la zona 1 se encontró en mayores cantidades O, C y Si y en menores cantidades Al y K, en las zonas 2 y 3, con ligeras variaciones en los porcentajes pero que siguen siendo los mismo ordenes de los elementos. Como se ilustra en la Tabla 4.3.

**TABLA 4.3. Muestra XOCH-300**

<b>Elementos</b>	<b>Zona 1 (Wt%)</b>	<b>Zona 2 (Wt%)</b>	<b>Zona 3 (Wt%)</b>
<b>C</b>	37.06	24.69	32.62
<b>O</b>	49.18	58.19	55.45
<b>Al</b>	1.02	1.11	0.33
<b>Si</b>	12.52	15.83	11.54
<b>K</b>	0.22	0.18	0.07

#### **4.1.2.4. Muestra XOCH-400**

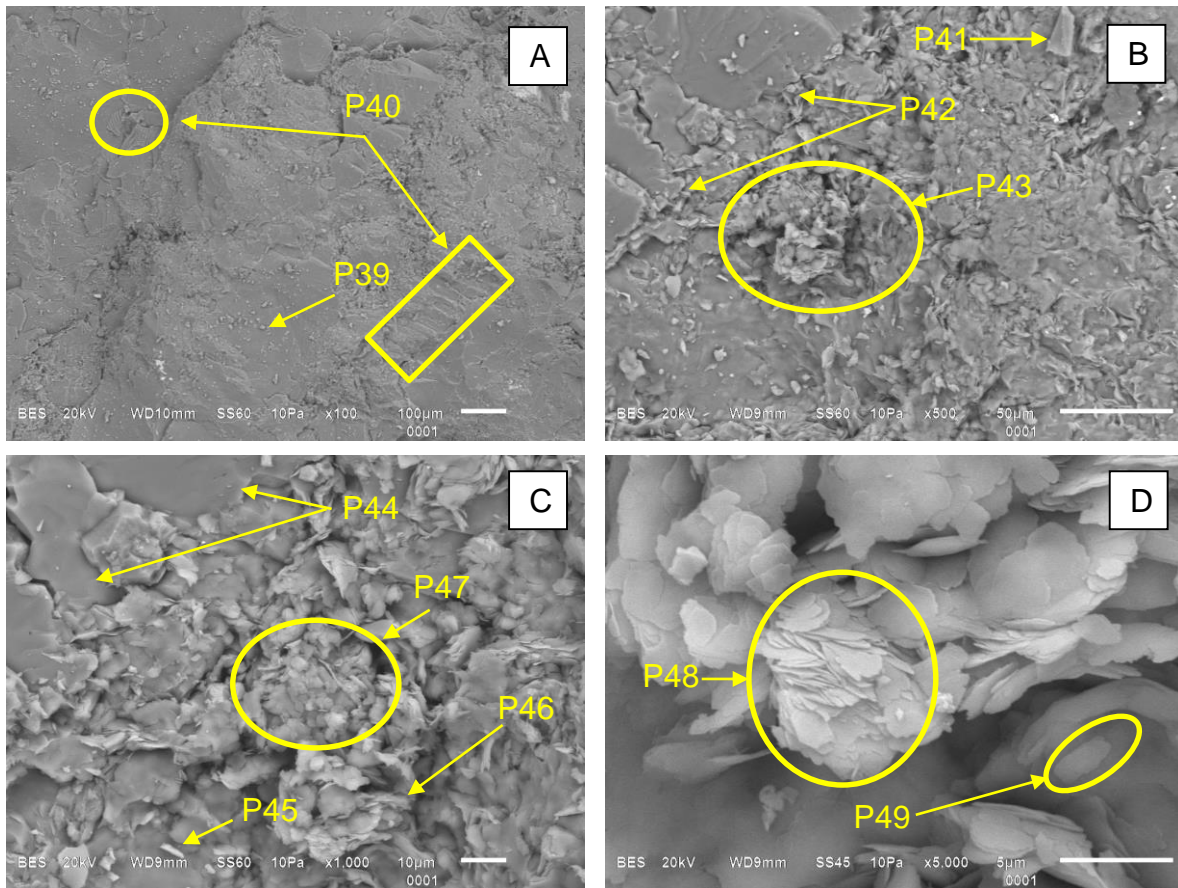
En la Figura 4.14. A) Se aprecia la microestructura de la muestra M04-1400, en donde se observa una superficie casi lisa pero a la vez un poco rugosa, constituida por partículas del orden de 3.5  $\mu\text{m}$  a 28.5  $\mu\text{m}$ , un ejemplo señalado como P39, en donde se distinguen líneas en la misma dirección que pareciera ser escalonada, con tamaños que van de 21.4  $\mu\text{m}$  a 85.7  $\mu\text{m}$  la cuales se señala como P40.

Por otra parte en las figuras B, C, y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A en donde se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se presentan estructuras subhedrales tales como la señala P41, en donde se aprecia un rectángulo irregular con lados de 6.9  $\mu\text{m}$ , 11.4  $\mu\text{m}$ , 19.4  $\mu\text{m}$  y 22.2  $\mu\text{m}$ , así mismo también se distinguen formar anhedrales con una textura lisa, con un tamaño significativo en comparación con los demás de aproximadamente de 83.3  $\mu\text{m}$ , el cual es señalado como P42. En el punto P43 se distingue un conjunto de partículas algo redondeadas que van de 2.7  $\mu\text{m}$  a 11.1  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia unas estructuras anhedrales, tales como las señaladas como P44, de igual forma se distingue una estructura euhedral, señalada como

P45, en donde se observa una forma rectangular con lados laterales de  $5.7 \mu\text{m}$  y un ancho de  $1.4 \mu\text{m}$ , así mismo se aprecia una laminación con un orden y una alineación similar, en cual se muestra en el P46. En P47 se distingue un conjunto de partículas muy bien redondeadas con un tamaño que va de  $1.4 \mu\text{m}$  a  $3.5 \mu\text{m}$ .

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde podemos observar formas ovaladas contadas en láminas con una tamaño aproximado de  $1.3 \mu\text{m}$ , señalado como P48, así mismo se aprecia una estructura euهدral, en donde se distingue un rectángulo con lados laterales de  $2.7 \mu\text{m}$  y un ancho de  $1.25 \mu\text{m}$ , señalado como P49.



**Figura 4.14.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-400.

En muestra XOCH-400, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identifican O, Si, Al, C y en menores cantidades K, Fe, Ti, a diferencia que el Fe solo fue obtenido en la zona uno. Como se ilustra e la Tabla 4.4.

**TABLA 4.4 Muestra XOCH-400**

Elementos	Zona 1 (Wt%)	Zona 2 (Wt%)	Zona 3 (Wt%)
<b>C</b>	1.77	1.46	1.78
<b>O</b>	58.95	59.08	57.58
<b>Al</b>	2.63	2.97	3.35
<b>Si</b>	35.77	35.36	35.7
<b>K</b>	0.76	1.04	1.13
<b>Ti</b>	0.12	0.1	0.16
<b>Fe</b>			0.31

#### 4.1.2.5. Muestra XOCH-500

En la Figura 4.15, A) Se aprecia dos microestructuras de la muestra XOCH-500, en donde se observa una superficie sinuosa, constituida por partículas del orden de 28.5  $\mu\text{m}$  a 35.7  $\mu\text{m}$  como se ilustra en P50 por otro lado se distingue una superficie lisa, en la que se aprecian algunas cavidades o drusas tales como en P51, con un diámetro de 142.8  $\mu\text{m}$ , en donde se observa partículas que van de 3.5  $\mu\text{m}$  a 14.5, así mismo en P52, se distingue otra cavidad, con un diámetro de 185.7  $\mu\text{m}$ , en donde se distinguen las partículas. En P53 se presenta una pequeña cavidad con un diámetro de 35.7  $\mu\text{m}$  y rellena de partículas las cuales no se pueden apreciar en la imagen.

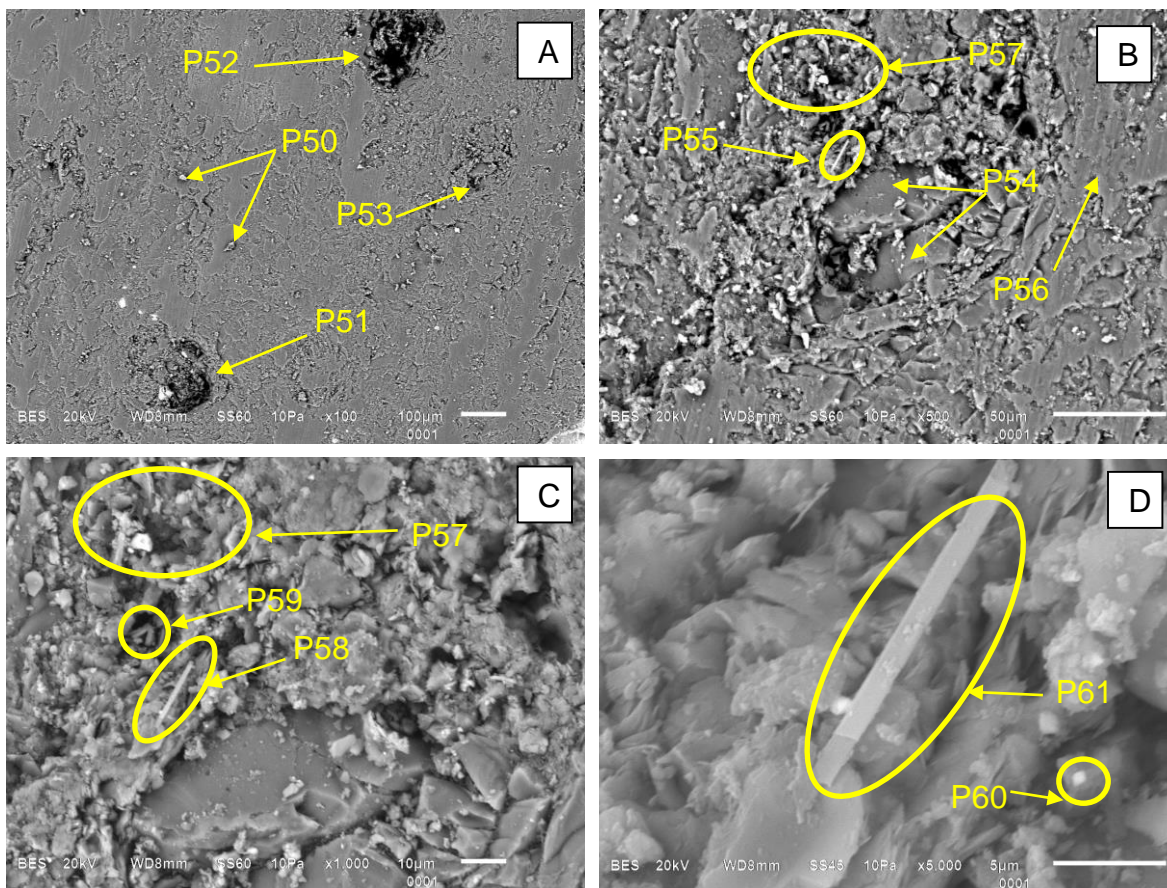
Por otra parte en las figuras A, B, y C, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se observan estructuras anhedrales tales como la señala P54, con un tamaño de 41.6  $\mu\text{m}$  y 62.5  $\mu\text{m}$ , en P55 y una estructura euhedral, en la cual se distingue en forma acicular con un largo de 15.9  $\mu\text{m}$  y un ancho de 1.3  $\mu\text{m}$ , de igual forma se observa

---

una superficie lisa la cual es señalada como P56. En P57 se observa un conjunto de partículas que van de 1.3  $\mu\text{m}$  a 5.5  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia en su mayoría estructuras anhedrales y partículas del orden de que van de 1.3  $\mu\text{m}$  a 11.3  $\mu\text{m}$ , las cuales se señalan como P57, de igual forma se observaron estructuras euhedrales, tales como P58 en donde se identifica una forma acicular con un largo de 17.1  $\mu\text{m}$  y un ancho de 1.4  $\mu\text{m}$ , así mismo en P59, en donde se observan dos formas aciculares con un largo de 5  $\mu\text{m}$  y 4.2  $\mu\text{m}$  y de ancho tienen alrededor de 1.4  $\mu\text{m}$  y 2.1  $\mu\text{m}$ .

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde se observar una superficie rugosa con estructuras anhedrales que van de 1.25  $\mu\text{m}$  a 8.33  $\mu\text{m}$ , y estructuras euhedrales identificadas con formas de rombo con lados de 0.5  $\mu\text{m}$ , señalado como P60. En P61 se aprecia otra estructura euhedral, con forma acicular con un largo de 16.6  $\mu\text{m}$  y un ancho de 1.1  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.15.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-500.

En muestra XOCH-500, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identificaron C, O, Si y en menores cantidades Al y K. Como se ilustra e la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Muestra XOCH-500**

ELEMENTOS	Zona 1 (Wt%)	Zona 2 (Wt%)	Zona 3 (Wt%)
<b>C</b>	65.97	1.42	3.62
<b>O</b>	-	64.52	64.29
<b>Al</b>	0.39	0.13	0.58
<b>Si</b>	33.5	33.89	31.38
<b>K</b>	0.13	0.04	0.13

---

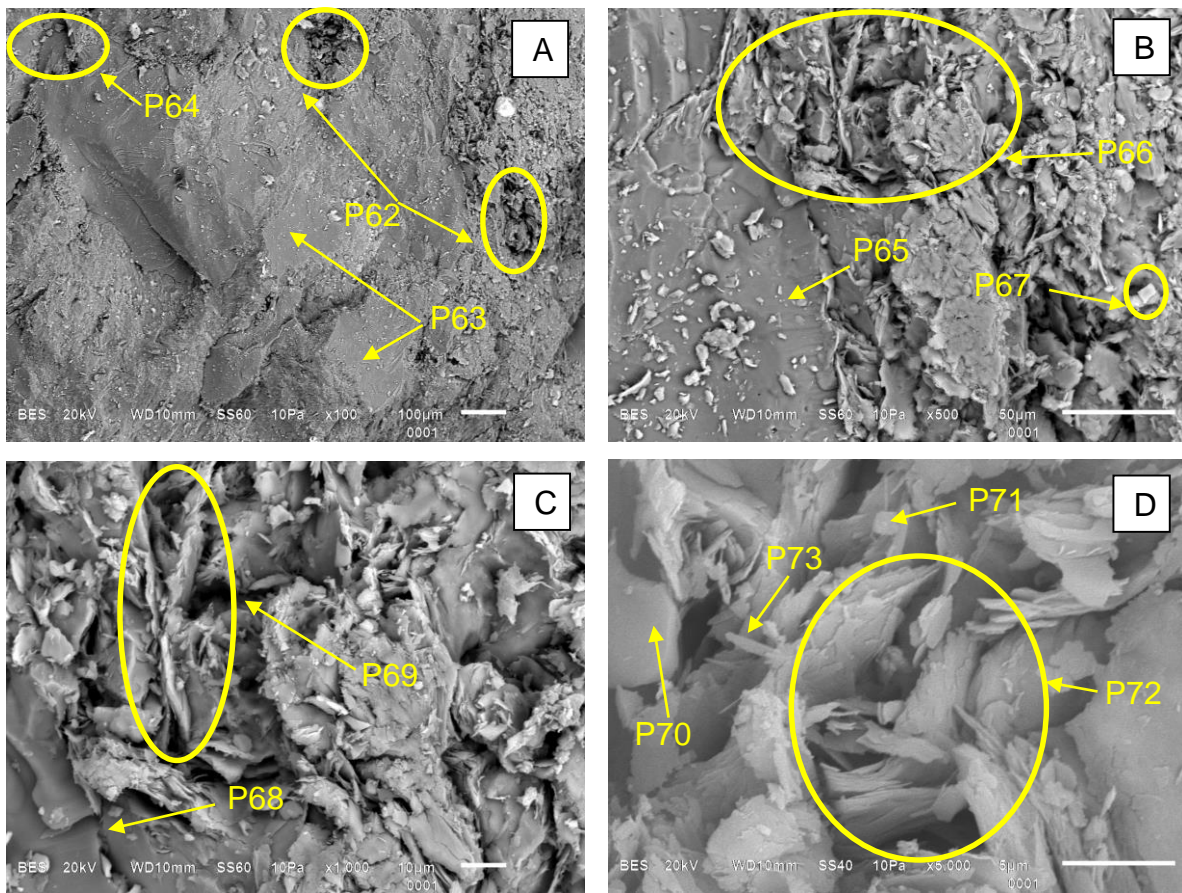
#### **4.1.2.6. Muestra XOCH-600**

En la Figura 4.16, A) Se aprecia la microestructura de la muestra XOCH-600, en donde se observa una superficie sinuosa, constituida por partículas del orden de 3.5  $\mu\text{m}$  a 42.8  $\mu\text{m}$  en la que se distinguen cavidades tales como se señala en P62, la cuales tienen un diámetro que va de 71.4  $\mu\text{m}$  a 107.14  $\mu\text{m}$ , y en donde se aprecia unas estructuras lisas con algo de sinuosidad como se muestra en P63, así mismo en la parte superior izquierda se distinguen unas formar subhedrales que van de 21.4  $\mu\text{m}$  a 35.7  $\mu\text{m}$  señalado como P64

Por otra parte en las figuras B, C, y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se distingue una estructura lisa con algo de sinuosidad señalada como P65, la cual tiene escasas partículas que van de 2.7  $\mu\text{m}$  a 18  $\mu\text{m}$ , por otro lado también se observan formas anhedrales que van en el orden de 5.5  $\mu\text{m}$  a 13.8  $\mu\text{m}$ , pero dentro de las cuales se puede distinguir algunas formas laminares o aciculares que tienen aproximadamente un largo de 25  $\mu\text{m}$  y un ancho 4.1  $\mu\text{m}$ , como se muestra en P66 así mismo se encontró una forma euhedral, en donde se aprecia un rectángulo con lados de 6.9  $\mu\text{m}$ , el cual se señala como P67

En la figura C) se aprecia una estructura lisa en la parte inferior izquierda señalada como P68 y una estructura con formas anhedrales con tamaños que van de 1.4  $\mu\text{m}$  a 14.2  $\mu\text{m}$  y en donde se distinguen dos formas laminares una con un largo de 88  $\mu\text{m}$  y un ancho de 3.5  $\mu\text{m}$ , y otra con el largo de 39.8  $\mu\text{m}$  y un ancho de 3  $\mu\text{m}$ , las cuales se señalan como P69.

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde podemos observar estructuras en forma subhedral como se señala en P70 con lados de 2.0  $\mu\text{m}$ , 2.7  $\mu\text{m}$  y 4.1  $\mu\text{m}$ , también se distingue una estructura euhedrales identificada como un cuadrado con lados de 1.1  $\mu\text{m}$ , señalado como P71, así mismo se observan unas estructuras laminares con un grosor de aproximadamente 0.1  $\mu\text{m}$ , como se muestra en P72, pero también se puede observar unas formas aciculares como se muestra en P73, con un largo de 2.3  $\mu\text{m}$  y un ancho de 0.5  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.16.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-600.

En muestra XOCH-600, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identifican O y Si en mayores cantidades y C, Al, K y Ti en menores cantidades, a diferencia que el Fe solo fue obtenido en la zona uno. Como se ilustra en la Tabla 4.6.



---

---

**TABLA 4.6. Muestra XOCH-600**

---

---

Elementos	Zona 1 (Wt%)	Zona 2 (Wt%)	Zona 3 (Wt%)
C	4.96	2.49	2.15
O	57.07	60.34	60.12
Al	3.49	3.73	4.88
Si	33.32	31.95	30.98
K	1.16	1.11	1.41
Ti	-	0.38	0.24
Fe	-	-	0.23

---

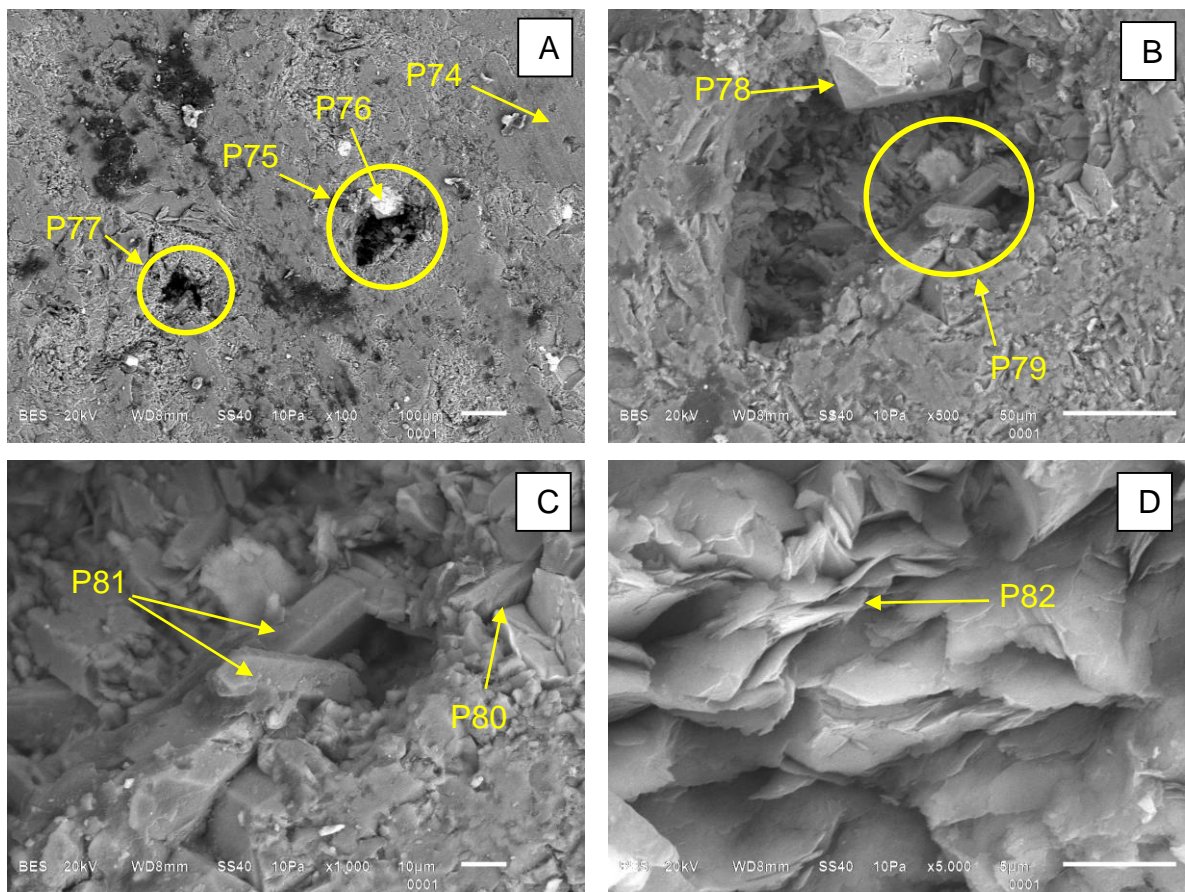
#### **4.1.2.7. Muestra XOCH-700**

En la Figura 4.17. Se aprecia la microestructura de la muestra XOCH-700, en donde se observa una superficie sinuosa, constituida por partículas del orden de 7.1  $\mu\text{m}$  a 57.1  $\mu\text{m}$ , de igual forma también se observa una estructura lisa con líneas en una misma dirección, en forma de láminas con un grosor de 7  $\mu\text{m}$ , como se señala en P74, se distinguen dos cavidades o drusas como se muestra en P75 con un diámetro de 178.5  $\mu\text{m}$  con pequeños cristales, en donde se distinguen estructuras euhedrales tales como en P76, en donde se observa un pentágono no uniforme con tres lados de 50  $\mu\text{m}$ , un lado de 64.2  $\mu\text{m}$  y otro lado de 35.7  $\mu\text{m}$ , también se observa otra cavidad como se señala en P77 con un diámetro de 85.7  $\mu\text{m}$ .

Por otra parte en las figuras B, C y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se distingue estructuras subhedrales tales como la señala P78, en donde se aprecia solo dos lados de 62.5  $\mu\text{m}$  y 48.6  $\mu\text{m}$  esto dentro de la cavidad con un diámetro de 125  $\mu\text{m}$ , en donde también se observan partículas del orden de 2.7  $\mu\text{m}$  a 20.8  $\mu\text{m}$ , de igual forma se distinguen otras formas subhedrales como se señala en P79, en donde observan algunas de las caras de lo que pudiera ser prismas pentagonales con un largo de 33.3  $\mu\text{m}$  y un ancho en sus lados laterales de 9.7  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia unas estructuras anhedrales que van de 4.2  $\mu\text{m}$  a 21.4  $\mu\text{m}$ , las cuales se señalan como P80, de igual forma se observan partículas que van de 0.7  $\mu\text{m}$  a 14.2  $\mu\text{m}$ , en donde se distinguen unas formas subhedrales que pudiera ser un prisma pentagonal con un largo de 37.1  $\mu\text{m}$  y un ancho en sus lados laterales de 7.1  $\mu\text{m}$ , señalado como P81.

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde por completo podemos observar una estructura lisa con láminas con un grosor de 0.7  $\mu\text{m}$ , como se ha señalado en P82.



**Figura 4.17.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-700.

En muestra XOCH-700, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identifican O y Si en mayores cantidades y Al en menores cantidades, en la zona 2. Como se ilustra e la Tabla 4.7.

<b>Elementos</b>	<b>Zona 1 (Wt%)</b>	<b>Zona 2 (Wt%)</b>
<b>O</b>	56.07	58.39
<b>Al</b>	0	0.39
<b>Si</b>	43.93	41.23

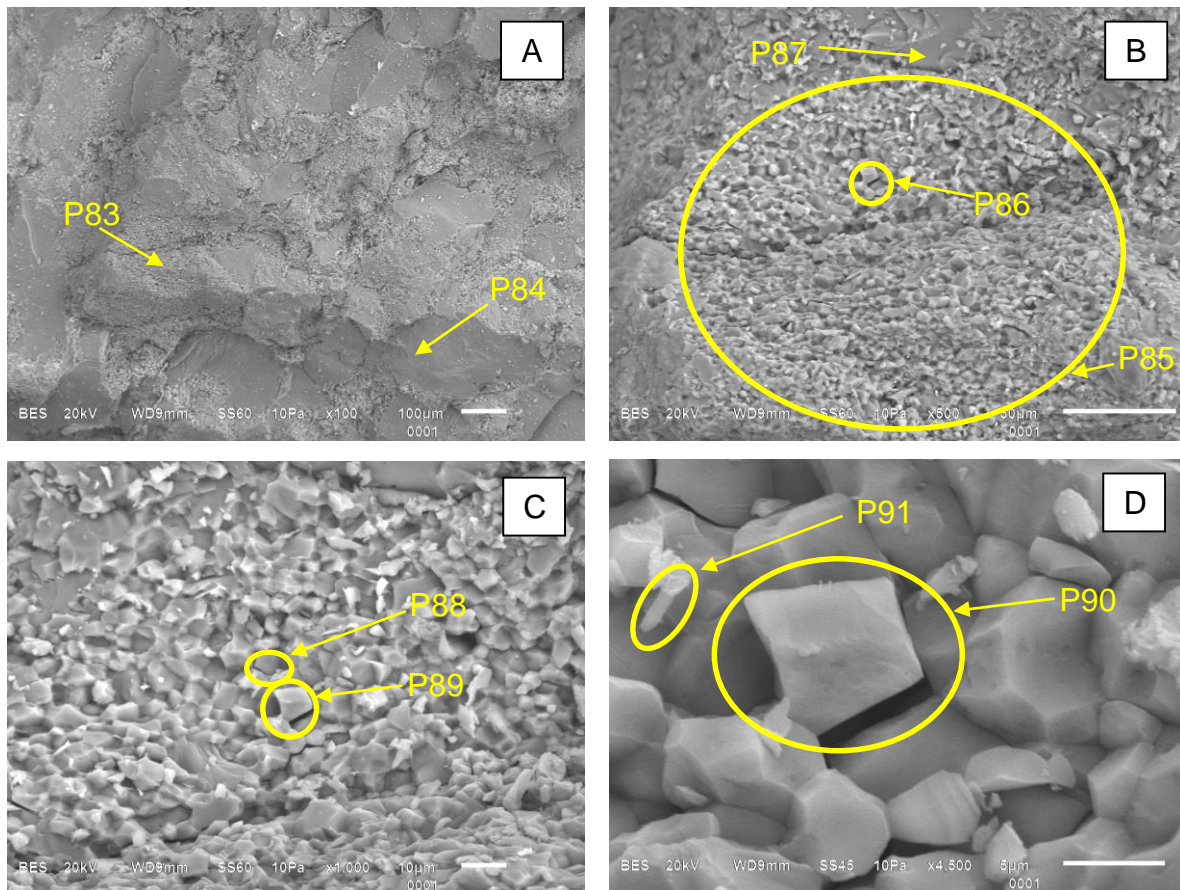
#### **4.1.2.8. Muestra XOCH-800**

En la Figura 4.18. A) Se aprecia la microestructura de la muestra XOCH-800, en donde se observa una superficie sinuosa, con partes fibrosas y lisas, en la textura fibrosa se distinguen partículas de un tamaño que va de 3.5  $\mu\text{m}$  a 21.4  $\mu\text{m}$ , como se muestra en P83, así mismo también se señala en P84 una de las texturas lisas con poco contenido de partículas.

Por otra parte en las figuras B, C y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B) se distingue en su mayoría estructuras subhedrales concentradas en el centro de la imagen, tal como se señala P85, en donde se aprecia algunas estructuras euhedrales como un trapecio con una base mayor de 9.72  $\mu\text{m}$ , una base menor de 5.5  $\mu\text{m}$  y dos de lados de 6.9  $\mu\text{m}$ , como se muestra en P86. En P87 se muestra una de las pequeñas estructuras lisas que se observaron con una forma anhedral de un tamaño aproximado de 59.7  $\mu\text{m}$ .

En la figura C) se aprecia en su mayoría estructuras subhedrales que van de 1.4  $\mu\text{m}$  a 14.2  $\mu\text{m}$ , dentro de las que se observan algunas formas euhedrales, como se muestra en P88, en donde se distingue un pentágono con lados de 5  $\mu\text{m}$ , 4.2  $\mu\text{m}$ , dos lados de 3.5  $\mu\text{m}$  y 2.8  $\mu\text{m}$ , al igual que también se observa un trapecio con una base mayor de 9.2  $\mu\text{m}$  y una base menor 6.4  $\mu\text{m}$  y ambos lados de 7.8  $\mu\text{m}$ , como se muestra en P89.

Por ultimo en la figura D), se muestra el mayor acercamiento en donde podemos observar estructuras subhedrales en su mayoría, que van de 1.8  $\mu\text{m}$  a 9.2  $\mu\text{m}$ , algunas estructuras euhedrales identificadas como un trapecio con bases de 13.1  $\mu\text{m}$  y 8.6  $\mu\text{m}$  y con ambos lados de 12.3  $\mu\text{m}$ , señalado como P90, así mismo también se observa una forma acicular con un largo de 6.2  $\mu\text{m}$  y un ancho de 1.3  $\mu\text{m}$ , tal como P91.



**Figura 4.18.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-800.

En muestra XOCH-800, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identifican O y Si en mayores cantidades y Al en menores cantidades, a diferencia de el O que se encuentra solo en la Zona 2. Como se ilustra e la Tabla 4.8.

---

---

**TABLA 4.8. Muestra XOCH-800**

---

---

<b>Elementos</b>	<b>Zona 1 (Wt%)</b>	<b>Zona 2 (Wt%)</b>	<b>Zona 3 (Wt%)</b>
<b>C</b>	-	6.8	
<b>O</b>	57.26	50.38	57.42
<b>Al</b>	4.2	2.05	7.84
<b>Si</b>	36.64	40.12	32.8
<b>K</b>	1.12	0.65	1.94
<b>Fe</b>	0.78	-	-

---

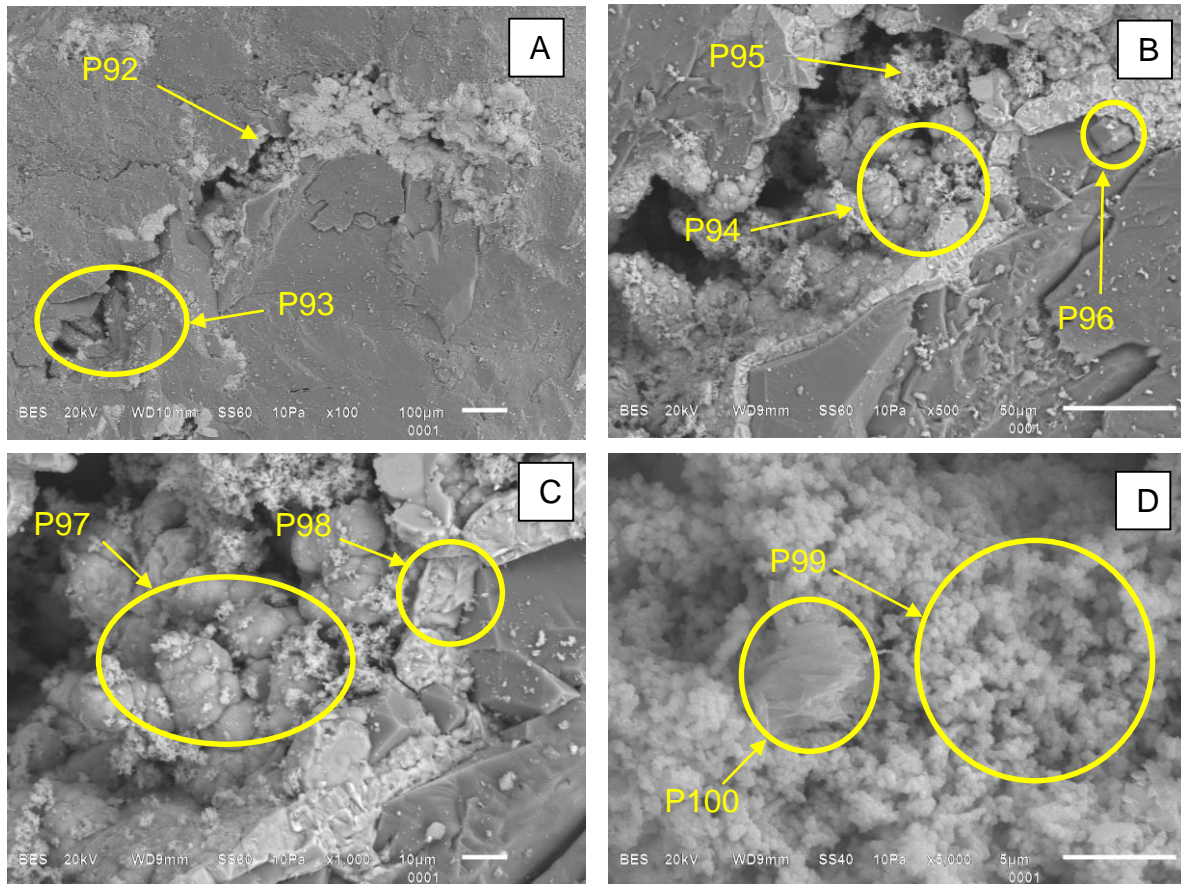
#### **4.1.2.9. Muestra XOCH-900**

En la Figura 4.19, A) Se aprecia la microestructura de la muestra XOCH-900, en donde se observa una superficie lisa con poca sinuosa, constituida por partículas del orden de 7.1  $\mu\text{m}$  a 28.5  $\mu\text{m}$ , en donde también se observa una fractura con un largo aproximado de 1.2 mm, la cual se señala como P92, así mismo se distinguen algunas estructuras subhedrales con un orden de 35  $\mu\text{m}$  a 142.8  $\mu\text{m}$ , como se señala en P93.

Por otra parte en las figuras B, C y D, se muestra un mayor acercamiento a las diferentes zonas observadas en la figura A, en las cuales se aprecia con mayor detalle las diferentes estructuras identificadas de la siguiente manera en B), se distingue una cavidad con partículas redondeadas con un orden que va de 4.1  $\mu\text{m}$  a 9.72 $\mu\text{m}$ , como se señala en P94, además también se observan estructuras fibrosas dentro de la cavidad, como se muestra en P95. De igual forma también se aprecia una estructura lisa un poco sinuosa alrededor de la cavidad, en donde también se observan partículas de un tamaño que va de 1.3  $\mu\text{m}$  a 9.7 $\mu\text{m}$ , también se aprecia una forma subhedral como se muestra en P96, con un tamaño de 20.8.

En la figura C) se aprecian unas partículas redondeadas, con un tamaño que va de 7.1  $\mu\text{m}$  a 10.7  $\mu\text{m}$ , las cuales están cubiertas de un textura fibrosa, como se señala en P97, además también se observa una forma cortada con un textura radial, como se muestra en P98. Alrededor de la cavidad se aprecia una textura lisa.

Por ultimo en la figura D) se muestra el mayor acercamiento en donde podemos observar partículas redondeadas muy pequeñas con un tamaño entre  $0.27\ \mu\text{m}$  a  $0.69\ \mu\text{m}$  como se muestra en P99, por otro lado también se observa una estructura anhdral con un tamaño de  $6.2\ \mu\text{m}$ , señalado como P100.



**Figura 4.19.** Se muestra la microfotografía de la muestra XOCH-900.

En muestra XOCH-900, se identificaron 3 diferentes zonas, en donde se identifican O, Si y Fe en mayores cantidades y Al y K en menores cantidades, a diferencia de el Mg que se encuentra solo en la Zona 2. Como se ilustra e la Tabla 4.9.

---

**TABLA 4.9. Muestra XOCH-900**

---

Elementos	Zona 1 (Wt%)	Zona 2 (Wt%)	Zona 2 (Wt%)
<b>C</b>	2.34	6.53	4.83
<b>O</b>	52.76	53.66	38.08
<b>Mg</b>	-	0.59	-
<b>Al</b>	0.91	10.39	1.55
<b>Si</b>	35.9	22.01	5.15
<b>K</b>	0.29	3.77	0.26
<b>Fe</b>	7.8	-	50.13

---

Por otro lado los análisis realizados por EDS muestran una asociación entre los diferentes elementos encontrados como son el silicio (Si) y el oxígeno (O) con una amplia distribución en casi toda la columna, marcando las zonas más oxidantes, en tanto el potasio (K) y el aluminio (Al) tienen una relación a 1m, 4m, 6m y 8 m de profundidad, la cual corresponden a una fase de muscovita.

Por otro lado, también se observa una relación entre el hierro (Fe) y el titanio (Ti), a 1 m, 4 m y 6 m de profundidad, dentro de la columna, formando una fase de ilmenita. Pero su vez también el hierro (Fe) mantiene una relación con el magnesio (Mg).

Y finalmente la relación que existe entre el silicio (Si) y el aluminio (Al) a 1 m, 4 m, y a 6 m de profundidad, formando así una fase de albita que son zonas de pH neutro. Figura 4.20.

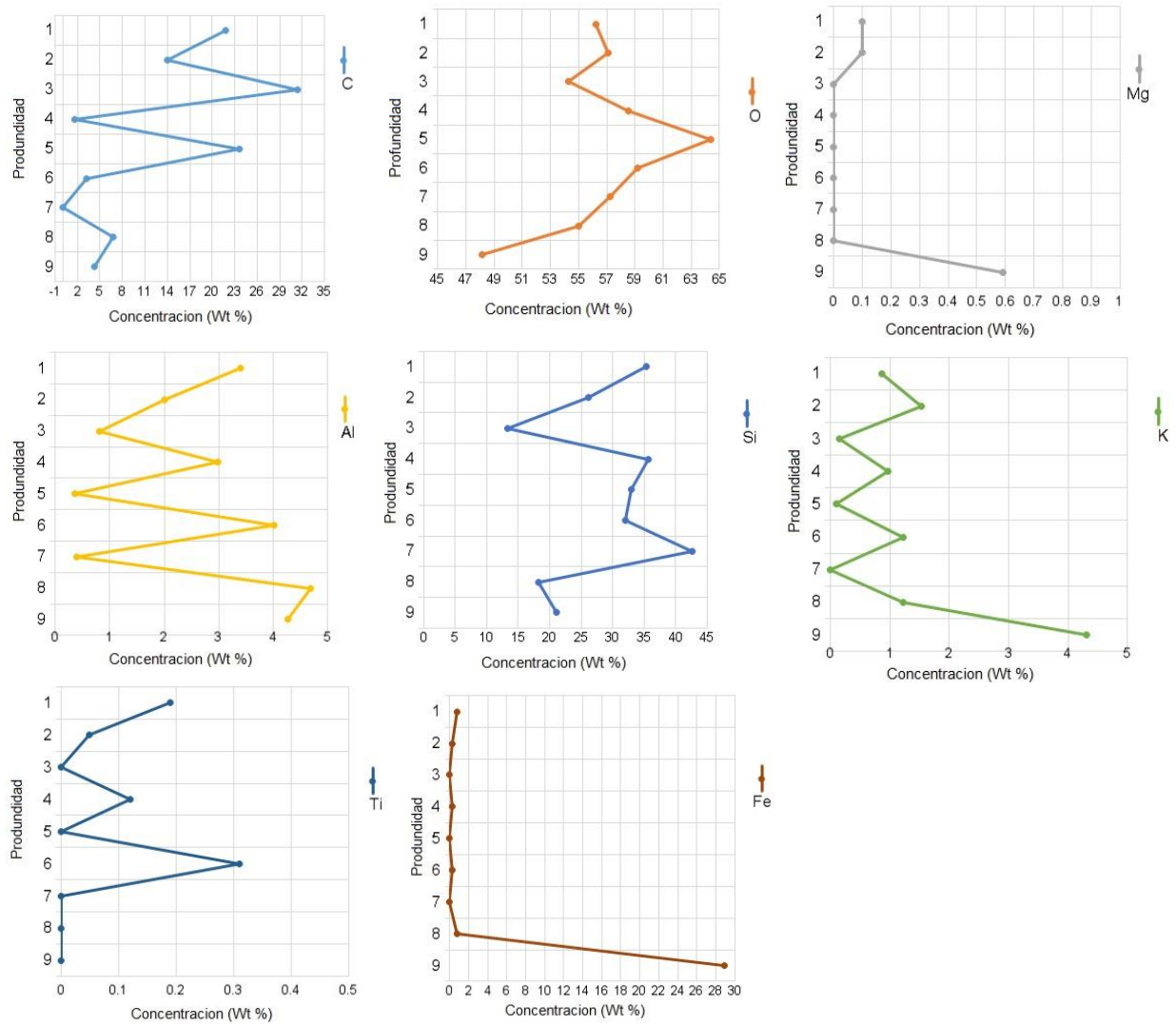


Figura 4.20. Perfiles de concentración a profundidad por medio de EDS



---

#### **4.1.3. Caracterización Por Plasma De Acoplamiento Inductivo (ICP)**

La geoquímica de rocas sedimentarias muestra el ambiente tectónico de la cuenca e información sobre el ambiente de depósito. La composición de los sedimentos clásticos también se ve influenciada por aspectos como la roca fuente, la naturaleza de los procesos sedimentarios de la cuenca de depósito, y el tipo de dispersión que vincula la procedencia, como diagénesis, clasificación física, clima o transporte.

También se ha comprobado que la composición química de las lutitas, además de ser un índice de correlación estratigráfica ayuda a la identificación de ambientes tectónicos y de procedencia, cabe mencionar que estos sedimentos son los más abundantes en las cuencas sedimentarias a nivel mundial, y representan el promedio en composición de la corteza terrestre de manera más exacta que cualquier otra roca sedimentarias (Pettijohn, 1975).

En la actualidad la discriminación tectónica con base en elementos mayores ha sido severamente criticada, (Armstrong-Altrin & Verma, 2005) y otros autores quienes consideran más fiables los resultados que dependen de esquemas en función de elementos traza (Pe-Piper et al., 2008) por lo que en este trabajo se considera su uso.

Los mejores indicadores en la determinación de la procedencia y ambiente tectónico debido a su relativa abaja movilidad son los siguientes:

***La, Y, Cs, Cr, Th, Zr, Hf, Nb, Ti***

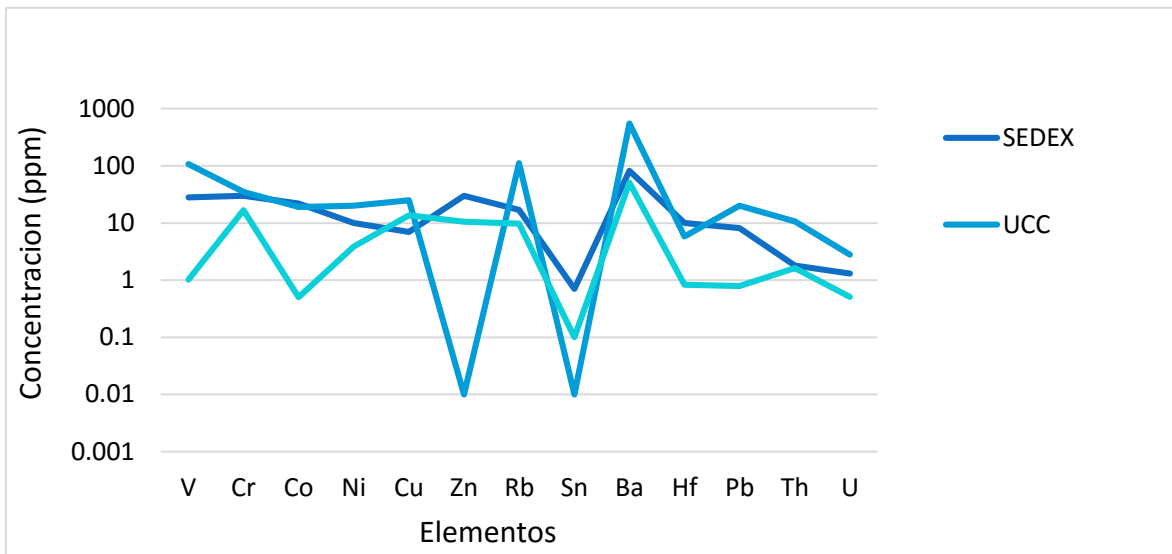
Que en la actualidad son más empleados como indicadores de ambientes tectónicos y de la composición de la roca fuente, que de los elementos mayores. En cuanto a la distribución relativa de la concentración de elementos inmóviles en rocas félsicas y maficas, se considera que las rocas silíceas se encuentran enriquecidas de La y Th, mientras que las rocas que tienden a la basicidad,

prevalece la concentración elevada de Sr, Cr y Co. Por otro lado las rocas siliciclasticas presentan un elevado contenido del cociente La/Lu, en tanto las rocas básicas tienen un índice bajo.

En la tabla 4.10 se muestran las concentraciones de elementos traza, obtenidos en este trabajo en comparación con los elementos de la corteza continental superior (Taylor & McLennan, 1985) y los elementos de la Formación Huayacocotla. (Armstrong-Altrin & Avila-Ramirez, 2009)

<b>Tabla 4.10. Concentración de elementos traza en diferentes zonas.</b>			
<b>Elementos</b>	<b>SEDEX (ppm)</b>	<b>UCC (ppm)</b>	<b>Formación Huayacocotla (ppm)</b>
<b>V</b>	28	107	1.02
<b>Cr</b>	30	35	16.68
<b>Co</b>	22	19	0.5
<b>Ni</b>	10	20	3.87
<b>Cu</b>	7	25	13.56
<b>Zn</b>	30	0.01	10.57
<b>Rb</b>	17	112	9.71
<b>Sn</b>	0.7	0.01	0.1
<b>Ba</b>	82	550	50.91
<b>Hf</b>	10	5.8	0.83
<b>Pb</b>	8.1	20	0.79
<b>Th</b>	1.8	10.7	1.63
<b>U</b>	1.3	2.8	0.51

En el análisis geoquímico de elementos traza los elementos químicos como son Cr, y Th debido a su baja movilidad se consideran aptos para la determinación de procedencia y ambiente tectónico McLennan et. al 1983, por lo que lo que se observa en el diagrama es un enriquecimiento de elementos geoquímicos de ion grande de Cr=30, y Th=1.8; todos mayores de la media para la muestra del yacimiento sedex comparado con los valores de la corteza continental y desde luego, de la lutita Huayacocotla estéril, por lo que se infiere que la roca que origino la formación litológica está cerca del área fuente.



**Figura 4.21**, Diagrama de multielementos, utilizado para comparar el valor de UCC (Taylor & McLennan, 1985) con una muestra de la zona mineralizada, y una muestra estéril de la lutita de la Formación Huayacocotla. (Armstrong-Altrin & Avila-Ramirez, 2009)

Por otra parte de acuerdo a Garver *et. al* 1996, los contenidos mayores de 150 ppm de Cr y 100 ppm de Ni indican una fuente ultramáfica, puesto que los valores máximos obtenidos en el sedex son de 30 ppm de Cr y 10 ppm de Ni se podría considerar una fuente félsica para el yacimiento SEDEX.

Para establecer la relativa proporción de rocas ultramáficas en la región de origen muestra que la relación Cr/V es el índice de enriquecimiento de cromo sobre los elementos traza ferro magnesianos. Entre tanto, la relación Y/Ni controla el nivel general de elementos traza ferros magnesianos (Ni) comparados con un sustituyente de tierras raras pesadas.

Por otro lado, los contenidos de elementos traza de transición V=28, Cr=30, Co=2.2, Cu=7, Ni=10, son bajos, esto es debido a que la afinidad del yacimiento sedex es félsica o ácida.

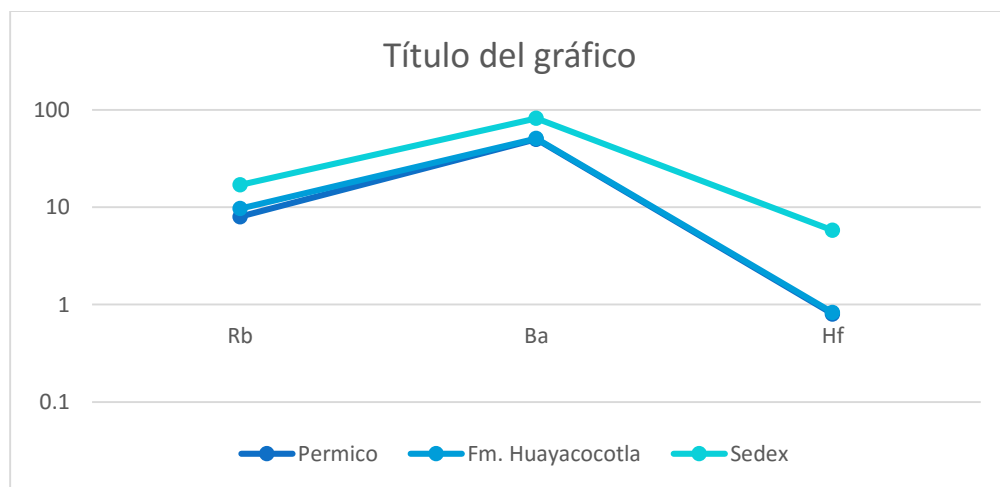
En efecto, aunque el contenido de Cr y Ni son en general bajos, lo que es indicativo de fuente félsica, pero nótese la anomalía con valor alto de V=28, Co= 2.2, y Cu= 7. Tal anomalía de V se puede asociar a contenidos de metales del grupo del platino.

---

Por otro lado el yacimiento SEDEX tiene mayor contenido en concentración de tierras raras ligeras (LREE) que la UCC, porque los valores de Tierras raras pesadas del Ytrio (HREE) son bajos de  $Y= 8.8$ , y  $Ga=2.5$ . Por lo que se infiere la presencia de minerales asociados de tierras raras ligeras del tipo monacita  $[(Ce,La,Nd, Th, (PO)_4]$ , mineral que producen el 95 % de la producción de tierras raras en la actualidad.

Cabe señalar que la anomalía negativa de las tierras raras pesadas de Eu y Hf con respecto a la UCC, confirman el empobrecimiento de tierras raras pesadas y reafirman la afinidad félsica del yacimiento sedex.

Comparando este trabajo con el de Rosales-Lagarde et.,al 1997, se infiere que el origen sea a partir de un protolito gnéisico y de clastos de vulcanismo pérmico como se muestra en la figura 4.22, en la que se observa la coincidencia de valores con la Formación Huayacocotla.



**Figura 4.22.** Comparacion de elementos del pérmico, Fm. Huayacocotla y del área de estudio.

Por otro lado en el diagrama Cr/V vs. Y/Ni figura 4.23 puede observarse una amplia diferencia entre diferentes muestras de lutita Huayacocotla, el yacimiento estudiado sedex, y condrita.

Se puede identificar dos regiones divididas por la línea diagonal que corresponden a la zona de las rocas félsicas (granito) y máficas (basalto) respectivamente, los valores de Cr/V son bajos en el yacimiento sedex por lo que se ubican en el área félsica.

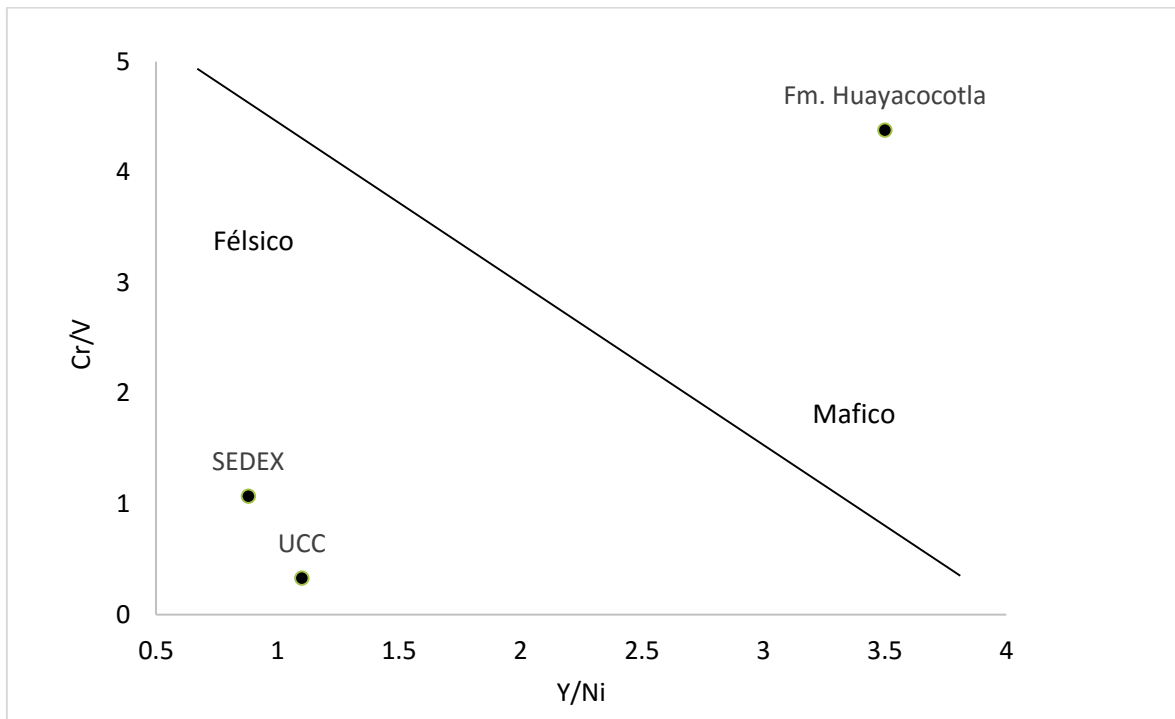


Figura 4.23, Diagrama Cr/V vs Y/Ni

**Tabla 4.11. Resultados del analisis de ICP**

Elementos	Unidades	Muestras	
		XOCH-1	XOCH-2
Au	<i>g/mt</i>	0.02	0.02
Pd	<i>g/mt</i>	0.05	0.05
Pt	<i>g/mt</i>	0.05	0.05
Al	%	0.9	0.81
As	<i>ppm</i>	28	119
B	<i>ppm</i>	70	70
Ba	<i>ppm</i>	82	67
Be	<i>ppm</i>	3	3
Bi	<i>ppm</i>	2	2
Ca	%	0.17	0.13
Cd	<i>ppm</i>	2	2
Ce	<i>ppm</i>	19.5	14.9
Co	<i>ppm</i>	1.4	2.2
Cr	<i>ppm</i>	30	30
Cs	<i>ppm</i>	2.3	2.7
Cu	<i>ppm</i>	7	7
Dy	<i>ppm</i>	1.5	1.4
Er	<i>ppm</i>	0.9	0.9
Eu	<i>ppm</i>	0.4	0.3
Fe	%	0.92	1.64
Ga	<i>ppm</i>	2.5	2.2
Gd	<i>ppm</i>	1.6	1.4
Ge	<i>ppm</i>	1.3	1.5
Hf	<i>ppm</i>	10	10
Ho	<i>ppm</i>	0.3	0.3
In	<i>ppm</i>	0.02	0.02
K	%	0.2	0.2
La	<i>ppm</i>	9	7
Li	<i>ppm</i>	49	71
Mg	%	0.08	0.05
Mn	<i>ppm</i>	85	104
Mo	<i>ppm</i>	2	1
Nb	<i>ppm</i>	2.4	2.4

**Tabla 4.11. Resultados del analisis de ICP (continuacion)**

Elementos	Unidades	Muestras	
		XOCH-1	XOCH-2
Nd	<i>ppm</i>	9.5	7.6
Ni	<i>ppm</i>	10	10
P	%	0.005	0.005
Pb	<i>ppm</i>	8.1	7.5
Pr	<i>ppm</i>	2.5	1.9
Rb	<i>ppm</i>	17.1	15.8
S	%	0.75	1.46
Sb	<i>ppm</i>	2	2
Se	<i>ppm</i>	0.8	1.9
Sm	<i>ppm</i>	1.9	1.6
Sn	<i>ppm</i>	0.7	0.5
Sr	<i>ppm</i>	8	9
Ta	<i>ppm</i>	10.1	5.8
Tb	<i>ppm</i>	0.3	0.2
Te	<i>ppm</i>	6	6
Th	<i>ppm</i>	1.8	1.4
Ti	%	0.08	0.07
Tl	<i>ppm</i>	0.6	0.4
Tm	<i>ppm</i>	0.1	0.1
U	<i>ppm</i>	1.3	1
V	<i>ppm</i>	17	28
W	<i>ppm</i>	0.7	0.7
Y	<i>ppm</i>	8.8	7.7
Yb	<i>ppm</i>	0.7	0.7
Zn	<i>ppm</i>	30	30
Si	%	39.4	40.8

---

### 4.3. DISCUSION

De acuerdo a los resultados encontrados y en comparación a otros autores como son (Okita, 1992) (Maynard & Klein, 1995) (Ochoa-Camarillo H. , 1996) (Melgarejo, 1997) (Ochoa-Camarillo, Buitron, & Silva-Pineda, 1998) (Cantu-Chapa, 2001) (Rosales-Lagarde, 2002) (Cerecedo-Sáenz, 2002).

La geología del área de estudio se muestra en el capítulo 2. Cabe mencionar por su importancia en este trabajo, la presencia de una formación de litología siliciclastica y de edad pleisbaquiano, correspondiente a la Formación Huayacocotla que también ha sido identificada por los autores anteriormente mencionados y que en este trabajo es de importancia estratégica para la prospección por métodos indirectos de exploración por su relación estructural, tectónica, morfológica y fosilífera de la secuencia estudiada en este trabajo, se concluyó como el área de estudio adecuado para la extracción del núcleo de barrenacion.

No obstante, es necesario precisar la edad del yacimiento por medio de otros métodos de datación absolutos de tipo radiométrico como son isotopía de S por la abundancia de pirita en la secuencia y de K-Ar como segunda opción por la presencia de micas de muscovita identificadas. Y también con esto se podría saber si tuvo diferentes etapas el yacimiento de acuerdo a la edad, ya que no se han realizado estudios radiométricos en el área de estudio.

Sin embargo, existe una discusión acerca del origen de litologías de diferente edad debido a que no se ha realizado análisis precisos siguiendo los elementos trazas de tierras raras en rocas más antiguas, entre tanto , solo se conocen algunos estudios parciales del precámbrico y paleozoico pero en elementos mayores. (Rosales-Lagarde, 2002)

Aquí se realizaron análisis de ICP en un laboratorio de Canadá, resultados que fueron normalizados, estos resultados fueron comparados con análisis de condrita normalizada (UCC) (Taylor & McLeannan, 1985) y con una secuencia sedimentaria de edad del pérmico (Rosales-Lagarde, 2002) al comparar algunos



---

de los elementos, los cuales se infiere que algunos elementos químicos provienen de la formación tuzancoa.

No obstante, es necesario realizar análisis geoquímicos de edades más antiguas por que posiblemente muchos dentritos provienen del grenviliano , derivado posiblemente del Gneis Huiznopala, dada que esta formación es de carácter félsico y podría guardar mucha relación con los minerales félsicos de la Formación Huayacocotla aquí estudiada.

Finalmente en lo que concierne a la geoquímica y en base a las técnicas de caracterización como son Microscopia Electrónica de Barrido para la obtención de formas y texturas, Espectrometría de Dispersión de Energías para conocer una distribución a profundidad de los elementos, Difracción de Rayos X para la identificación de minerales, que dieron como resultado la presencia de minerales derivados de exhalaciones de edad Pleisbaquiano en su primera etapa. De acuerdo con Crib la presencia de algunos minerales como son calcopirita, Wurzita y Cuarzo, indica una removilizacion hidrotermal, por lo que se cree que existió una segunda etapa que fue producto de la cabalgadura presente en el área de estudio.

Sin embargo, se necesitan más análisis geoquímicos como son la difracción de neutrones que ayudara a conocer si existe una alineación preferencial de los minerales a conocer si existió más de una etapa de removilizacion hidrotermal.

---

## **CONCLUSIONES**

### **Geología Regional**

Las rocas que afloran en las inmediaciones del área de estudio van de edades del precámbrico al reciente. En el noroeste del área de estudio aflora el Gneis Huiznopala del Neoproterozoico, en tanto al noreste aflora una secuencia del Permico, el cual corresponde a la formación Otlamalacatla y formación Tuzancoa, el Jurásico Inferior se encuentra distribuido en la porción central representado por lutitas y areniscas de la Formación Huayacocotla de edad Sinemuriano – Pliensbaquiano, cabe mencionar que el Triásico está ausente en esta área. El Jurásico Medio representado por la Formación Cahuwasas aflora al sureste y hacia el sur oeste aflora la secuencia del jurásico superior.

Corona la secuencia sedimentaria de derrames de basalto de edad terciaria de la Formación Tlanchinol y rocas ígneas bimodales de plioceno de la formación Atotonilco El Grande. El cretácico se encuentra ubicado en dirección oeste alejado del área de estudio.

### **Geología Local**

Las rocas que afloran en el área de estudio corresponden a una secuencia de edad del plioceno de la formación Atotonilco el grande, en tanto esta formación también aflora en la porción noreste pero le infrayace rocas sedimentarias de edad Jurásico Superior formación santiago y Jurasico Medio Formacion Tepexic

Por otro lado en la región sureste afloran rocas de edad jurásico inferior de la formación huayacocotla, en la región suroeste, las formaciones que afloran son del Jurásico Inferior también y Jurásico Medio como son Formación Huayacocotla y Formación tepexic.

### **Métodos Geoquímicos de Exploración y Técnicas de Caracterización**

- Difracción de Rayos X

En este trabajo se logró identificar mediante el análisis de Difracción de Rayos X (DRX), Cuarzo PDF [00-033-1161], Albita PDF [01-083-1605], Mogonita PDF [99-

---

100-2734], Monacita PDF [00-004-0612], Wurzita PDF [01-072-0162], Pirita PDF [00-042-1340], Calcopirita PDF [00-037-0471], Argentopirita PDF [00-007-0347], Ilmenita PDF [00-003-0778] y Muscovita PDF [00-019-0814].

El cuarzo se distribuye a través de la columna de 1 m a 4.75 m y de 6 m a 9 m con una ausencia de 4.75 m a 6 m, con una densidad de  $3.83 \text{ g/cm}^3$ , lo cual indica que tenemos un cuarzo alfa con una temperatura de  $597^\circ \text{ K}$ , también se encuentra en forma de mogonita a un 1 m, 4 m y 5 m de profundidad, con una densidad de  $2.55 \text{ g/cm}^3$  y una temperatura alta de  $1354^\circ \text{ K}$ .

La albita se encuentra de 1 m a 1.75 m y de 4 m a 6.75 m, con ausencia a los 2 m, 3 m, 7 m, 8 m y 9 m, se distribuye más al centro de la columna, con una densidad de  $2.61 \text{ g/cm}^3$  y una temperatura alta de  $1473^\circ \text{ K}$ . Mantiene una relación con la presencia de la mogonita.

Por otro lado la monacita se encuentra presente a los 3 m, de 5 m a 7 m y a los 8 m dentro de la columna con una densidad de  $5.17 \text{ g/cm}^3$  y una temperatura de  $1400^\circ \text{ K}$ , posiblemente asociada a zonas reductoras de pirita. La calcopirita se encuentra distribuida de 4 a 5 m, apareciendo de una manera muy puntual en la columna con una densidad de  $4.17 \text{ g/cm}^3$  y una temperatura de  $1073^\circ \text{ K}$

- Microscopia Electrónica de Barrido

Los análisis realizados por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), las microfotografías muestran unas microestructuras casi similares en los 9 metros de la columna, con una variación en los tipos de formas, se lograron identificar formas eudrales, anhedrales y subhedrales, con microestructuras superficies lisas, fibrosas y sinuosas y una amplia distribución de tamaños no mayor a milímetros. Las microfotografías van de x100 aumentos con una vista general a los x5000 aumentos más a detalle.

Por otro lado, en las imágenes a detalles se logró identificar maclados característicos de albita, y minerales de muscovita.

---

- Espectrometría de Energía Dispersiva

Los análisis realizados por EDS muestran una asociación entre el silicio (Si) y el oxígeno (O) con una amplia distribución en casi toda la columna, marcando las zonas más oxidantes, en tanto el potasio (K) y el aluminio (Al) tienen una relación a 1m, 4m, 6m y 8 m de profundidad, la cual corresponden a una fase de muscovita.

Por otro lado, también se observa una relación entre el hierro (Fe) y el titanio (Ti), a 1 m, 4 m y 6 m de profundidad, dentro de la columna, formando una fase de ilmenita. Pero su vez también el hierro (Fe) mantiene una relación con el magnesio (Mg).

Y finalmente la relación que existe entre el silicio (Si) y el aluminio (Al) a 1 m, 4 m, y a 6 m de profundidad, formando así una fase de albita que son zonas de pH neutro.

- Plasma De Inducción Acoplada

Los resultados obtenidos en las muestras analizadas por icp muestran anomalías Enriquecimiento de ion grande de  $Cr = 30$  y  $Ti = 1.8$  todos son mayores a la media para la muestra del yacimiento sedemx comparado con los valores UCC y desde luego de la lutita huayacocotla esteril, por lo que aquí se infiere que la roca que origino la formación litológica es cercana al área fuente.

Por otro lado, los contenidos de elementos traza de transición  $V = 28$ ,  $Cr = 30$  Cobalto  $= 2.2$   $Cu = 7$   $Ni = 10$ , son bajos, esto se debe a que la afinidad del yacimiento sedex es de tipo félsico.

Entre tanto, nótese la anomalía de valor alto de  $V = 28$   $Co = 2.2$  y  $Cu = 7$ , tal anomalía de vanadio está asociada a contenido de metales del grupo del platino (PGE).

Así mismo, tiene mayor contenido de tierras raras ligeras (LREE) que la Condrita normalizada (UCC) por que los valores de tierras raras pesadas (HREE) de ytrio son bajos  $Y = 8:8$  Galio  $= 2.5$  por lo anterior se infiere la presencia de minerales

---

asociados de tierras raras ligeras (LREE) de tipo monacita ( ) que produce el 95% de tierras raras en la actualizada.

Cabe señalar que la anomalía negativa observada de uropio y hafnio que son tierras raras pesadas respecto a la condrita normalizada confirman el empobrecimiento de tierras raras pesadas y reafirma la afinidad félsica del yacimiento sedex y posiblemente su origen a partir de un protolito gnésico por la concentración de tierras ligeras.

El diagrama Cr/V Vs Ni/Y se logró identificar dos regiones divididas por una línea diagonal que corresponde a la zona de rocas félsicas y maficas respectivamente los valores aquí encontrados del cociente cr/v son bajos en el yacimiento sedex por lo que se ubican en el área félsica.

---

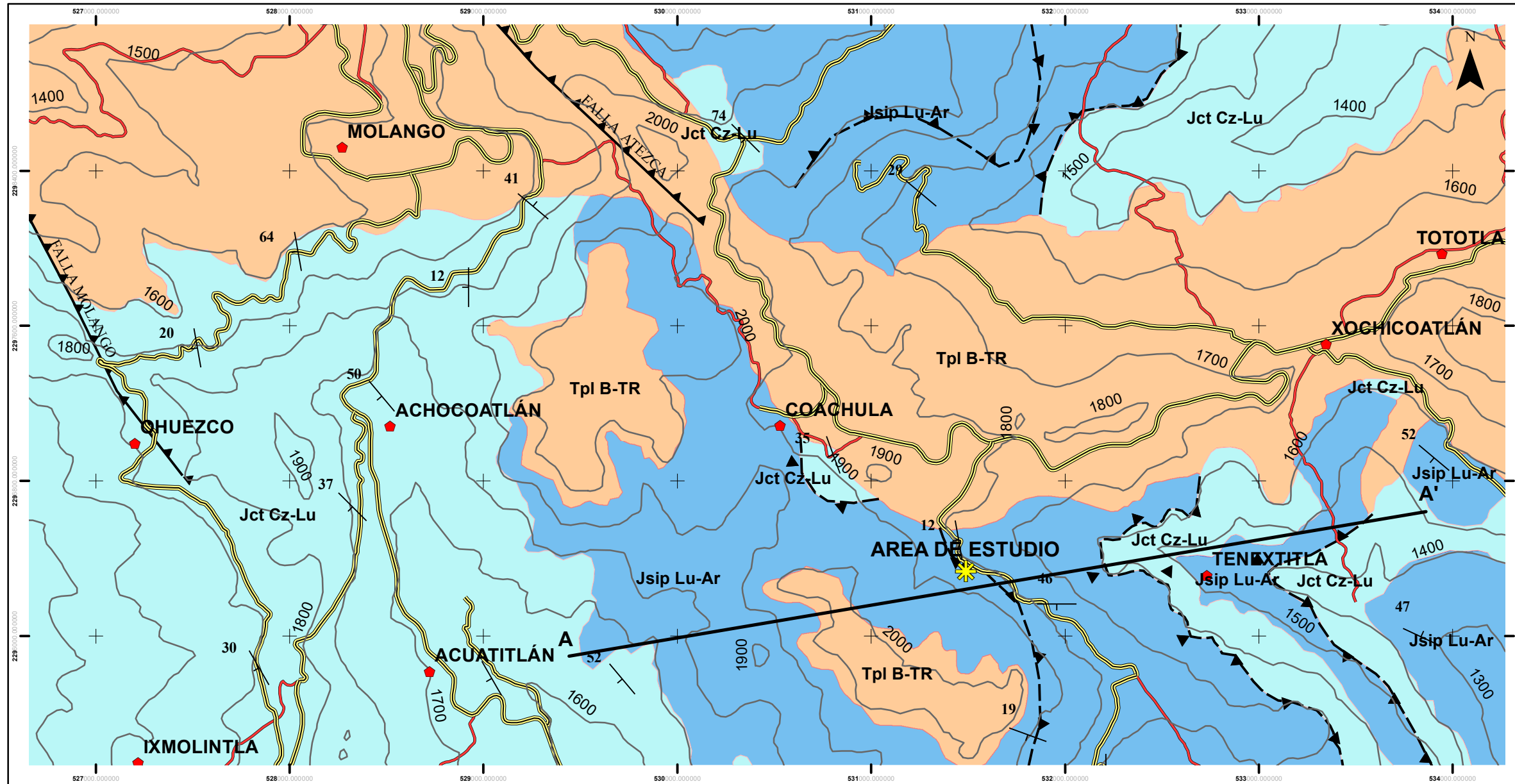
# ANEXOS

---

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	(Ma)	Erben (1956) Rio Chichimeca, Hgo.	Carrillo-Bravo (1965) Cahuasas	Cantu-Chapa (1971) Chapulhuacan, Hgo.	Ochoa-Camarillo (1997) Zacualtipan, Hgo.	Cerecedo Saenz (2002) Molango, Hgo.	Area de Estudio Xochicoatlán, Hgo.
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	CALABRIANO	0.01						
			GELASIANO	1.8					Formación Atotonilco El Grande	Formación Atotonilco El Grande
	TERCIARIO	PLIOCENO	PIACENZIANO	2.6				Formación Atotonilco El Grande		
			ZANCLEANO	3.6						
	NEOGENO	MIOCENO	MESSINIANO	5.3				Formación Tlanchinol	Formación Tlanchinol	Formación Tlanchinol
			TORTONIANO	7.2						
			SERRAVALLIANO	13.8						
			BURDIGALIANO	16						
			AQUITANIANO	20.4						
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	MAASTRICTIANO	65.5				Formación Mendez	Formación Mendez	
			CAMPANIANO	70.6						
			SANTONIANO	83.5						
			CONIACIANO	85.8				Formación San Felipe	Formación San Felipe	
			TURONIANO	89.3				Formación Agua Nueva	Formación Agua Nueva	
			CENOMANIANO	93.5	Formación Tamaulipas Superior	Formación Tamaulipas Superior	Formación Tamaulipas Superior	Formación Tamaulipas Superior	Formación Tamaulipas Superior	
		INFERIOR	ALBIANO	99.6	H.Otates	H.Otates	H.Otates	H.Otates	H.Otates	
			APTIANO	112	Formación Tamaulipas Inferior	Formación Tamaulipas Inferior	Formación Tamaulipas Inferior	Formación Tamaulipas Inferior	Formación Tamaulipas Inferior	
			BARREMIANO	125						
			HAUTERIVIANO	130						
			VALANGINIANO	136						
	BERRIASIANO	140								
	JURASICO	SUPERIOR	TITONIANO	145.5	Formación Pimienta	Formación Pimienta	Formación Pimienta	Formación Pimienta	Formación Pimienta	
			KIMMERDIANO	151	Formación Taman	Formación Taman	Formación Taman	Formación Chipoco	Formación Chipoco	
			OXFORDIANO	156			Formación Santiago	Formación Santiago	Formación Santiago	
		MEDIO	CALLOVIANO	165	Formación Tepexic	Formación Tepexic	Formación Tepexic	Formación Tepexic	Formación Tepexic	Formación Tepexic
			BATONIANO	168	Formación Huizachal	Formación Cahuasas	Formación Cahuasas	Formación Cahuasas	Formación Cahuasas	
			BAJONIANO	172						
			AALENIANO	176						
		INFERIOR	TOARCIANO	183						
			PLIENSBACHIANO	190	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla
			SINEMURIANO	197						
	HETANGIANO	201.6								
TRIASICO	SUPERIOR	RHAETIANO	204							
		NORIANO	228		Formación Huizachal					
		CARNIANO	235							
PALEOZOICO	PERMICO		299					Formación Tuzancoa		
PRECAMBRIANO	NEOPROTEROZOICO		1000					Formación Huiznopala		

Anexo 1. Tabla de Cronoestratigrafica del NE del estado de Hidalgo y del area de estudio

# XOCHICOATLÁN



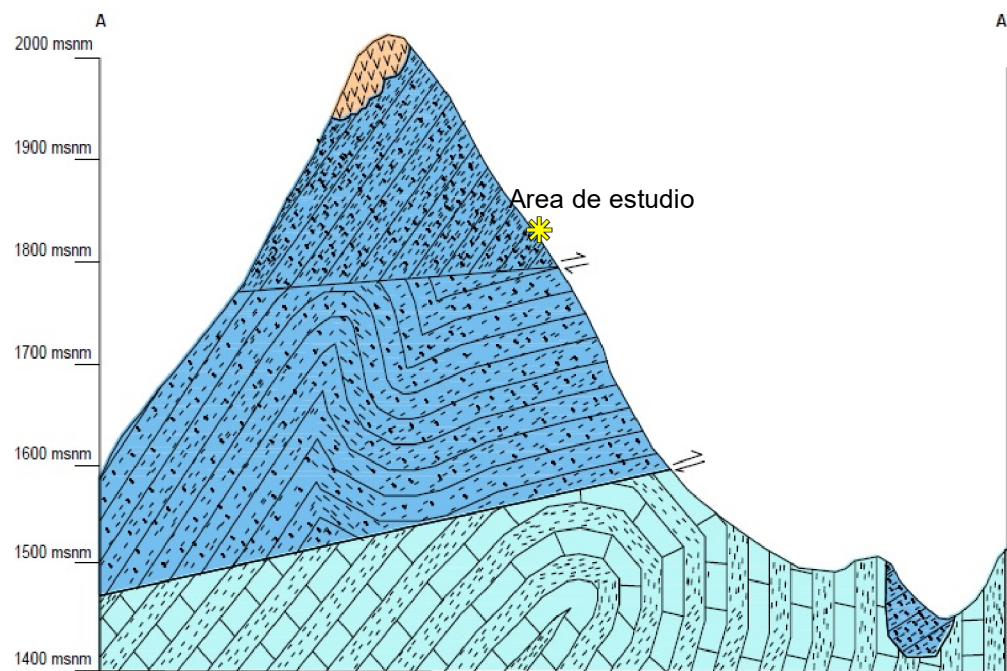
## SIMBOLOGIA

- ◆ Localidades
- ✦ Area de estudio
- Rumbo y Echado
- SECCION
- Carreteras
- Caminos
- Falla normal
- Cabalgaduras
- Formación Tepexic
- Formación Atotonilco El Grande
- Formación Huayacocotla

Datum..... WGS 1984  
 Proyeccion..... Transversal de Mercator  
 Referencia de Cotas..... Metros sobre el nivel del mar  
 Equidistancias entre curvas de nivel.... 100 metros

0 0.1750.35 0.7 1.05 1.4 Km

1:25,000



**Carta Geológica**  
**1:25,000**

Autor: Diana Maleni Morales Rendón

DATOS TOMADOS DE LA CARTA GEOLOGICO-MINERA  
 MOLANGO F14-D51 ESCALA 1:50,000 DEL SERVICIO  
 GEOLOGICO MEXICANO Y DE LA CARTA TOPOGRAFICA  
 F14-D51 ESCALA 1:50,000 DEL INEGI



---

## REFERENCIAS

Armstrong-Altrin, J., & Verma, S. (2005) *Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic setting*. *Sedimentary Geology*, 177, 115-129.

Armstrong-Altri, J., & Avila-Ramirez, G. M. (2009). *Geoquímica de elementos traza y tierras raras de rocas clásticas del Anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, estado de Hidalgo, México*. Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Aguayo-Camargo, J. E. (1977). *Sedimentación y diagenesis de la Formación Chipoco (Jurásico Superior) en afloramientos, Estados de Hidalgo y San Luis Potosí*. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 11-37.

Ballester, A. (2000). *Metalurgia Extractiva: Fundamentos* (Vol. 1)

Cantú-Chapa, A. (1969). *Estratigrafía del Jurásico Medio-Superior del Subsuelo de Poza Rica; Ver.* *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, v. 1, 3-9.

Cantú-Chapa, A. (2001). *Mexico as the Western Margin of Pangea based on Biogeographic evidence from the Permian to the Lower Jurassic*. *AAPG*, 1-27.

Carrillo-Bravo, J. (1965). *Estudio geológico de una parte del anticlinorio de Huayacocotla*. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 17, 73-96.

Centeno-García, E., & Rosales-Lagarde, L. (1997). En *Itinerario de la excursión al anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, estado de Hidalgo, México-Tercer Día* (págs. 41-43). Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, y la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.

Cerecedo Sáenz, E. (2003). *La mineralización de Cu y Ag del Rift Triásico-Jurásico del oriente de México*.

Cerecedo Sáenz, E., Salinas R., E., Cantú C., A., Patiño C, F., Ramírez C., M., Hernández A., J., y otros. (2009). *La Formación Chipoco y su relación estratigráfica con el posible yacimiento manganesífero de Chichapala; Veracruz*. *Revista de investigación científica del CIMMMYSH*, 40-52.

Cerecedo Sáenz, E., & Salinas Rodríguez, E. (2013). *Guía Rápida de Exploración Geológica y Minera*. Academia Española.

---

E. Cerecedo Sáenz, V. Rodríguez Lugo, P. D. Andrade Tafoya, E. Salinas Rodríguez, D.M. Morales Rendón, & J. Hernández Ávila. (2015). Chemistry And Characterization Of A Mineral Deposit Mineralogical Economic Interest. MRS Online Proceedings Library, vol. 1766, Cambridge University Press.

Erben, H. (1956). El Jurásico Inferior de México y sus amonitas. Congreso Geológico Internacional (pág. 393). México, D.F: Monografía.

Hermoso-de la Torre, C., & Martínez-Pérez, J. (1972). Medición detallada de formaciones del Jurásico Superior en el Frente de la Sierra Madre Oriental. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 45-64.

Guilbert, J.M.; Park, Ch.F. (1986). The geology of ore deposits. Freeman. 985 pg.

Goodfellow, W., Lydon, J., & Tuner, R. (1993). Geology and Genesis of Stratiform Sediment-Hosted (SEDEX) Zn-Pb-Ag Sulphide Deposits. *Geological Association of Canada*, 201-251.

Imlay, R. W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula. Part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin, v. 47, p. 1091–1152.

Imlay, R.W., 1937, Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 48, 567-630.

Imlay, W.R., 1940. Neocomian faunas of northern Mexico. – GSA Bulletin, 51: 117- 190.

Imlay, R.W., 1953, Las formaciones jurásicas de México: Boletín de la Sociedad Geológica de México, 16, 1-65.

Imlay, R. (1980). Jurassic paleobiogeography of the conterminous United States in its continental setting. *U.S Geological Survey*, 134.

Lutz, R. (2003). Amamece en el abismo. National Geographic en español, 96-106.

Maynard, J., & Klein, G. (1995). Tectonic subsidence analysis in the characterization of sedimentary ore deposits-examples the Witwatersrand (Au), White Pine (Cu), and Molango (Mn). *Economy Geology*, 37-50.

Melgarejo, J.-C. (1997). Atlas de Asociaciones Minerales en Lamina Delgada. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Ochoa-Camarillo, H. (1996). Geología del anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, Estado de Hidalgo. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría.

Ochoa-Camarillo, H.R., 1997, Aspectos bioestratigráficos, paleoecológicos y tectónicos del Jurásico (anticlinorio de Huayacocotla) en la región de Molango, Hidalgo, en Gómez-

---

Caballero, A., Alcayde-Orraca, M. (eds.), *II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados*, Pachuca, Hidalgo, México: México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UAEH, Instituto de Geología, UNAM, Simposio y Coloquio, sin paginación.

Ochoa-Camarillo, H. (1997). Geología del anticlinorio Huayacocotla en la region de Molango, Hgo., Mexico. En *Libro-guia de las excursiones geologicas* (págs. 1-17). Pachuca.

Ochoa-Camarillo, H. R., Buitron, B. E., & Silva-Pineda, A. (1998). Contribucion al conocimiento de la bioestratigrafia , paleoecologia y tectonica del jurasico (Anticlinorio de Huayacocotla) en la Region de Molango, Hidalgo, Mexico. (I. d. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ed.) *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 15(1), 57-63.

Okita, P. (1992). Manganese Carbonate mineralization in the Molango district, Mexico. *Economic Geology*, 87, 1345-1366.

Robert, B., & James, M. (1972). *Photographic Atlas of the Mid-Atlantic Ridge Rift Valley*. New York: Springer-Verlag.

Rosales-Lagarde, L. (2002). Estartigrafia y geoquimica de la secuencia volcanosedimentaria Permica del Noreste del estado de Hidalgo . *Tesis de Maestria en Ciencias: Mexico DF. Universidad Nacional Autonoma de Mexico*.

Schmidt, E. R. (1980). *The Huayacocotla Aulacogen in Mexico ( Lower Jurassic) and the origin of the gulf of México*. Baton Rouge, Louisiana: Louisiana State University.

Segerstrom, K. (1961). Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y del noreste del estado de Mexico. *Asociacion Mexicana Geologos Petroleros*, 13, 147-168.

Suter, M. (1987). Structural traverse across the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in east central Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 239-264.

Suter, M. (1990). Hoja Tamazuchale 14Q-E(5), Con geología de la Hoja Tamazunchale, estados de Hidalgo, Queretaro y San Luis Potosi. Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Instituto de Geología, Carta Geologica de Mexico.

Taylor, S., & McLennan, S. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publications, 312.

Volker, Z. (2013). *Rare Earth Elements*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-35458-8

Xuexiang, G. (2007). Rare earth elements geochemistry of Woxi W-Sb-Au deposit, Hunan Province, South China. *Ore Geology Review*, 319-336.