



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Procedencia de los minerales
titaníferos del yacimiento de placer
en la playa La Ventanilla, Santa
María Tonameca, Oaxaca**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Francisco Navarrete Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Victoria Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

Principalmente quiero agradecer a mis padres Beatriz Martínez Monroy y Francisco Navarrete Garnica, mis pilares. Por darme su apoyo incondicional durante toda mi vida, gracias a su trabajo y esfuerzo he realizado parte de las metas que me he propuesto. Espero algún día poder darles un poco de lo que me han dado, gracias.

A mi hermana Carolina Navarrete que es mi mayor orgullo y siempre me ha brindado su amor y su apoyo sin condición, también a mi cuñado Alejandro que ahora es parte de la familia, gracias por tu apoyo y espero que podamos seguir saliendo adelante todos juntos como una familia. Y no se me vaya a pasar Fátima, la nueva integrante de la familia, todos te esperamos con ansias.

Otro agradecimiento especial a Alfred, gracias por apoyarme gran parte de la carrera, por todas tus enseñanzas, asesorías, por responder todas mis dudas y darme la oportunidad de realizar este trabajo. Sin duda, un gran profesor y amigo.

Quiero agradecer a mis sinodales: Dra. Mayumi, Mtro. Campos, Dr. Schulze y el Ing. Marco Rubio. Que gracias a sus observaciones y asesorías pude realizar este trabajo.

A toda la banda de 400, Emmanuel, Fabián, Orestes, Pedro, David, Elder, Alberto que me han acompañado a lo largo de este camino, hemos sido compañeros de borracheras, viajes y de prácticas.

Al proyecto PAPIME PE 105116, por brindarme la oportunidad y los recursos para realizar este trabajo.

Contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1 Localización y vías de acceso	3
1.2 Antecedentes.....	5
1.3 Objetivo general.....	9
1.3.1 Objetivos particulares:	9
1.4 Planteamiento del problema	10
2. Marco Teórico	11
2.1 Yacimientos de óxidos de Fe-Ti.....	11
2.1.1 Yacimientos de placer de óxidos de Fe-Ti	11
2.2 Yacimientos de óxidos de Fe-Ti asociados a Nelsonitas	16
2.1.2 Hipótesis de la formación de nelsonitas	17
2.3 Corrientes Marinas en el Pacífico Mexicano.....	21
3. Marco Geológico	25
3.1 Complejo Oaxaqueño	26
3.2 Complejo Xolapa	27
4. Hidrografía.....	29
4.1 Región Hidrológica 20. Costa Chica-Río Verde (RH-20)	30
4.2 Subcuenca Río Tonameca (RH21Bc).....	32
4.3 Subcuenca San Pedro Pochutla (RH21Bb)	33
5. Petrografía.....	34

5.1 Nelsonita de Huitzo.....	35
5.2 Mina Tizúr, Pluma Hidalgo Oaxaca.....	39
5.3 Arenas de la playa La Ventanilla.....	43
5.3.1 Horizontes Claros	45
.....	46
5.3.2 Arenas negras	47
6. Geoquímica.....	53
6.1 Metodología para el análisis geoquímico (sedimentos de playa).....	53
6.2 Resultados de los análisis geoquímicos	55
6.2.1 Geoquímica de elementos mayores	55
6.2.2 Otros óxidos medidos.....	59
6.2.3 Geoquímica de elementos traza	60
7. Discusión.....	65
8. Conclusiones y Recomendaciones	69
9. Referencias.....	71
A) Anexo: Descripciones de los afloramientos de arenas negras en la playa La Ventanilla, Oaxaca.....	77

Resumen

Este estudio se realizó en el yacimiento de tipo placer de playa con contenido de óxidos de Fe-Ti-Zr que se encuentra entre las bahías de Huatulco y Puerto Escondido. Se realizó una caracterización químico-mineralógica de las arenas titaníferas localizadas en sedimentos de la playa La Ventanilla, Municipio de Santa María Tonameca, Oaxaca.

Las arenas negras se presentan como delgadas unidades laminadas, lentes y estratos que varían de 1 a 25 cm de espesor. Estos materiales de interés económico están intercalados con horizontes granulares de minerales claros tanto en la zona de supraplaya como en la de mesoplaya. En la parte continental los sedimentos forman parte de una terraza expuesta de aproximadamente 1.2 metros de altura. En la dirección NW-SE, las arenas constituyen una barra que forma una laguna rica en manglares. Los minerales de mena identificados son: ilmenita, ilmenita con exsoluciones de hematita, magnetita, rutilo y zircón.

En este yacimiento tipo placer se reportan valores anómalos de TiO_2 , Fe_2O_3 , ZrO_2 que pueden ser de interés económico. Las fases minerales asociadas son: ilmenita, magnetita y zircón, con un contenido de hasta 35.98% de TiO_2 , un 57.85% de Fe_2O_3 y hasta un 1.22% de ZrO_2 . Según datos de la Secretaría de Economía (2014) en esta área se estiman recursos por 9 millones de toneladas.

Se documentaron relaciones texturales en las ilmenitas y rutilos, tanto de las arenas negras de la playa La Ventanilla como de sus posibles fuentes. Los orígenes de las fuentes primarias de Ti deben corresponder a alguna de las diversas anomalías de óxidos de Fe-Ti pertenecientes a las secuencias de rocas anortosíticas reportadas del Complejo Oaxaqueño: Huitzo, en la parte norte o a aquellas que afloran en Pluma Hidalgo, en la sección sur del complejo.

Este trabajo se realizó gracias a los recursos otorgados al proyecto PAPIME PE 105116, los materiales generados a raíz de este serán agregados a la colección del laboratorio de Yacimientos Minerales y Mineragrafía de la Facultad de Ingeniería.

Abstract

This study was carried out in the placer deposit with Fe-Ti-Zr oxide content that is located between Huatulco and Puerto Escondido. A chemical-mineralogical characterization of titaniferous sands located in sediments of La Ventanilla beach, Santa María Tonameca, Oaxaca, was carried out.

Black sands are represented as thin laminated units, lenses and strata that vary from 1 to 25 cm in thickness. These materials of economic interest are interspersed with granular horizons of felsic minerals on swash zone and backshore zone. In the continental part, sediments are part of an exposed terrace of approximately 1.2 meters high. In the NW-SE direction, sands constitute a bar that forms a lagoon rich in mangroves. Ore minerals identified are ilmenite, ilmenite with ex-solutions of hematite, magnetite, rutile and zircon.

In this placer deposit, anomalous values of TiO_2 , Fe_2O_3 , ZrO_2 are recorded that may be of economic interest. Associated mineral phases are ilmenite, magnetite and zircon with a content of up to 35.98% of TiO_2 , 57.85% of Fe_2O_3 and up to 1.22% of ZrO_2 . According of data from the Secretaría de Economía (2014) in this area resources are estimated by 9 million tons.

Textural relationships were documented in ilmenite and rutile, both from the black sands of La Ventanilla beach and from their possible sources. The origin of the primary sources of Ti must correspond to some of the anomalies of Fe-Ti oxides belonging to the sequences of anorthositic rocks reported from the Oaxaca Complex: Huitzo, in the northern or those that appear in Pluma Hidalgo, in the south section of the complex.

This document was carried out thanks to the resources granted to the project PAPIME PE 105116, materials generated as a result of this will be added to the collection of the Laboratorio Yacimientos Minerales y Mineragrafía at School of Engineering.

1. Introducción

1.1 Localización y vías de acceso

La zona de estudio se localiza en las costas del estado de Oaxaca en la playa La Ventanilla, en el municipio de Santa María Tonameca (figura 1). La ciudad más cercana es San Pedro Pochutla, a una distancia en línea recta de 14 kilómetros dirección NE.

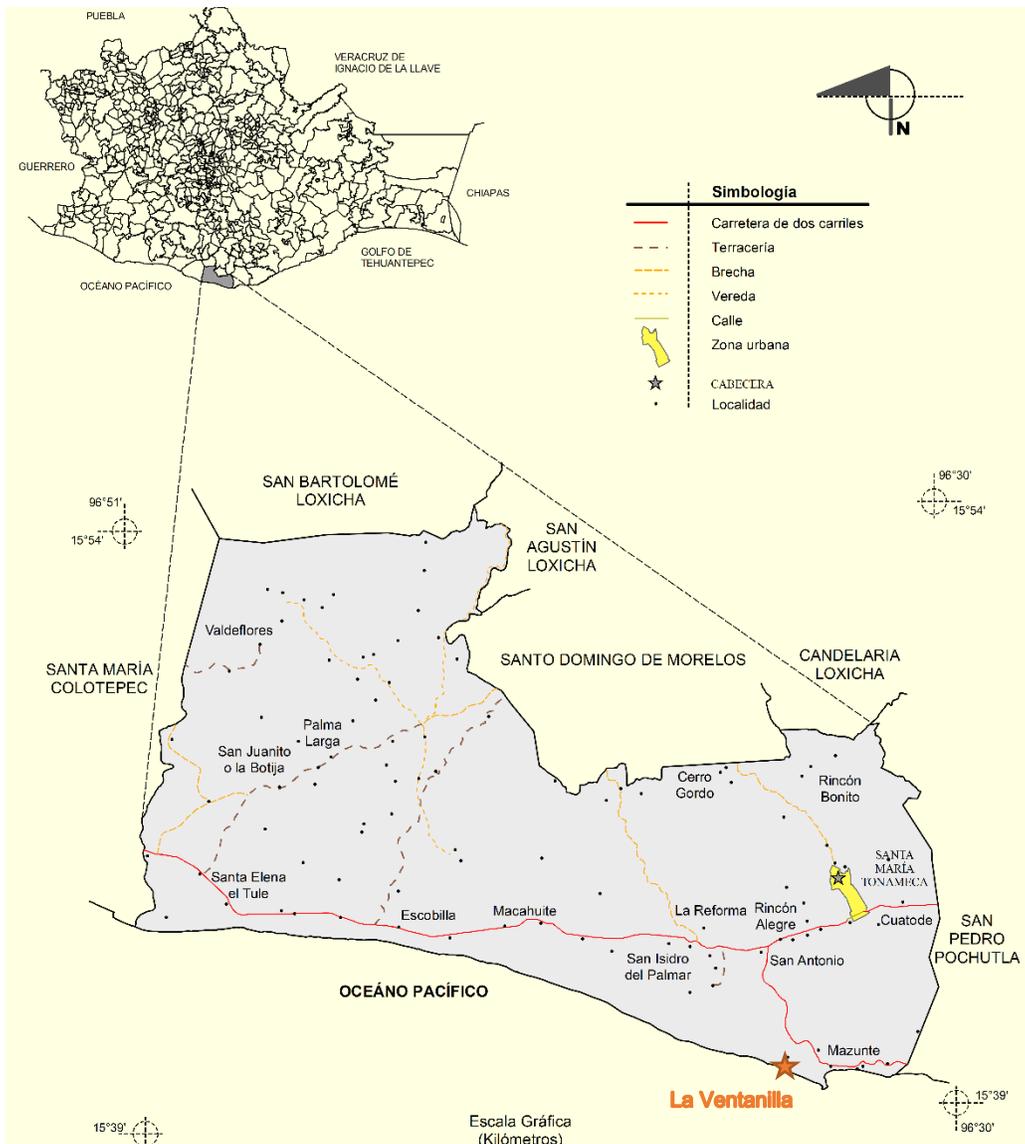


Figura 1. Localización del área de estudio y principales vías de acceso, tomado y modificado de INEGI (2005).

El área de estudio se ubica entre las siguientes coordenadas UTM en la zona 14N (figura 2): A) (759300mE, 1734000mN), B) (760100mE,1734000mN), C) (760100mE, 1733500mN), D) (759300mE, 1733500mN).

El área de interés se incluye en la carta topográfica escala 1:50000 de INEGI: San Pedro Pochutla D14B28. La vía de acceso saliendo de Puerto Escondido es por la carretera México 200 Santiago Pinotepa Nacional - Salina Cruz yendo hacia Salina Cruz, luego se debe tomar la desviación hacia Ventanilla - Zipolite por la carretera México 175, aproximadamente de unos 5 kilómetros adelante sobre la carretera hay una desviación donde se indica la entrada a la playa La Ventanilla. La referencia turística principal en el entorno de la Ventanilla es Puerto Ángel, el cual se encuentra a unos 14 kilómetros de distancia, sobre la carretera Puerto Ángel-Oaxaca.



Figura 2. Vista en Google Earth del área de estudio. Los puntos rojos representan las zonas de muestreo.

1.2 Antecedentes

El titanio fue descubierto en 1791 por el químico inglés W. Gregor. Es titanio es el noveno elemento más abundante en la corteza terrestre (0.86% de Ti, o bien 1.4% de TiO) (Haggerty, 1976). Se caracteriza por tener una temperatura de fundición de 1725 grados mucho más alta que el hierro y el níquel, pero la densidad dos veces menos (4507 kg/m³). El titanio se caracteriza por su alta solidez y estabilidad contra la corrosión.

La explotación industrial de titanio es a partir de la ilmenita (FeTiO₃ 31.6 %) y del rutilo (TiO₂ 60 %). En las ilmenitas y rutilos también se encuentran los siguientes elementos: vanadio, escandio, tantalio y niobio. Otros minerales de titanio son: anatasa, brookita, perovskita, por mencionar algunos (Vassallo, 2008).

El rutilo es un mineral poco común en depósitos de óxidos de Fe-Ti (Morisset et al., 2010) y es más valorado que la ilmenita debido a que en este se encuentran los mayores porcentajes de titanio. El rutilo se presenta en minerales del grupo de los óxidos y silicatos presentes en rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, no obstante, únicamente los óxidos de Ti poseen un valor económico (Force, 1991).

El titanio posee muchas ventajas sobre otros metales, por ejemplo, tiene alta resistencia a la corrosión, insensibilidad magnética, alto punto de fusión, baja conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión, alta resistividad eléctrica y sus compuestos no son tóxicos. Éstos, a su vez, tienen aplicación en el campo de la aeronáutica, la industria química, en la nanotecnología, en el sector salud y en la industria metalúrgica. Según Garnar & Stanaway, (1994) y Dill, (2010) existen dos principales mercados para el titanio:

- 1) En la elaboración de pigmentos.
- 2) Como metal.



Figura 3. Gráfica del precio histórico del titanio. Tomado de Infomine (2017).

En la figura 3 se puede observar el histórico de los precios del titanio. Como se puede observar, en 2005 tiene un precio que ronda los 21 x1000USD/t y, de esa fecha a la actualidad ha ido decayendo el precio con su mayor baja a principios del año de 2009, para finales de ese mismo año 2009 y hasta 2015 logro un alza. Finalmente, entre los años 2015 a 2016 hay una baja y para el 2017 va ligeramente al alza hasta llegar aproximadamente a los 5 x1000USD/t.

Los depósitos de placer tienen una gran importancia económica debido a que en ellos se encuentra una mayor concentración de minerales pesados, este enriquecimiento se debe a una selección de minerales pesados debido a que su alto peso específico permite su acumulación formando los placeres.

En el mundo, los mayores depósitos de titanio se encuentran asociados a los yacimientos de placer localizados en las costas de Australia (Figura 4)

representados en terrazas marinas, donde la concentración de Ilmenita es de hasta un 62% (Force, 1991).

De los yacimientos de titanio de tipo placer más importantes según Force (1991) se encuentran en:

- Depósitos del Distrito de Jacksonville.
- El distrito del Este de Australia.
- Distrito de Bunbury en el oeste de Australia.

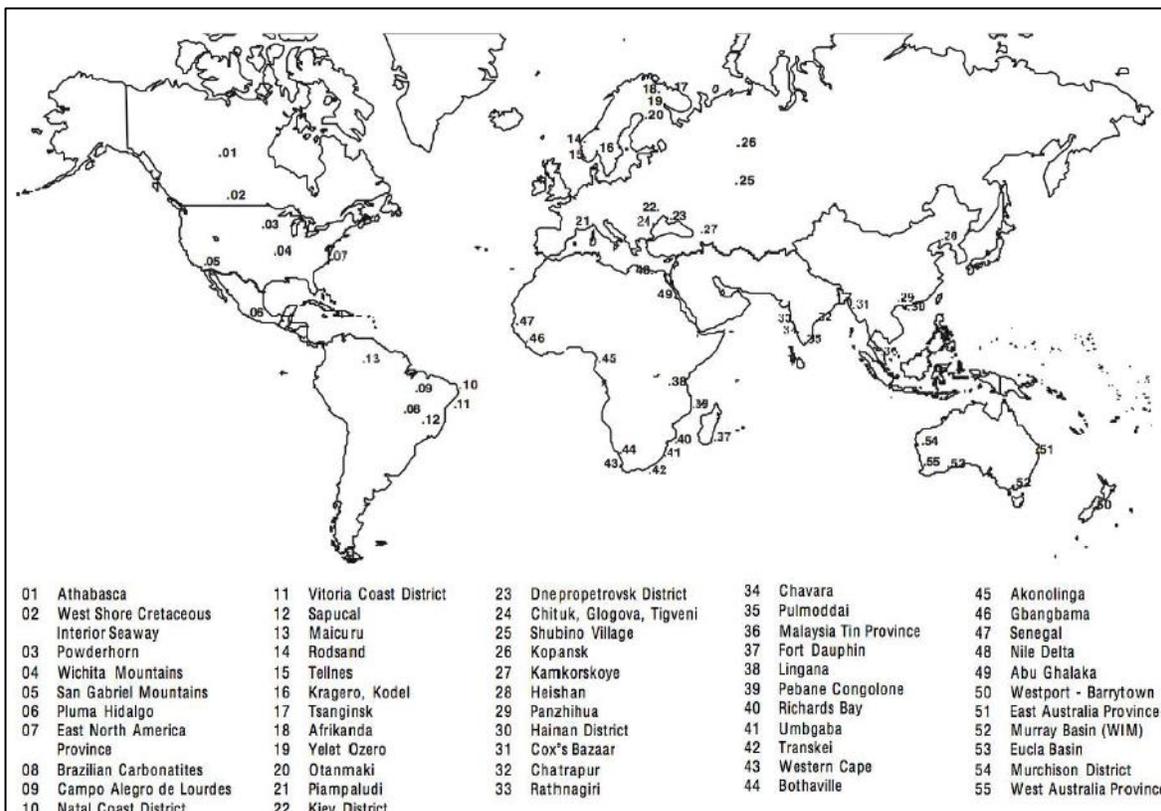


Figura 4. Distribución de los yacimientos de titanio en el mundo. Tomado de Force (1991).

En la figura 5 se pueden observar las principales zonas de interés para la exploración de titanio las cuales se asocian a manifestaciones de minerales de titanio (Ilmenita y rutilo) sobre los litorales de los estados de Baja California, Tamaulipas, Colima, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

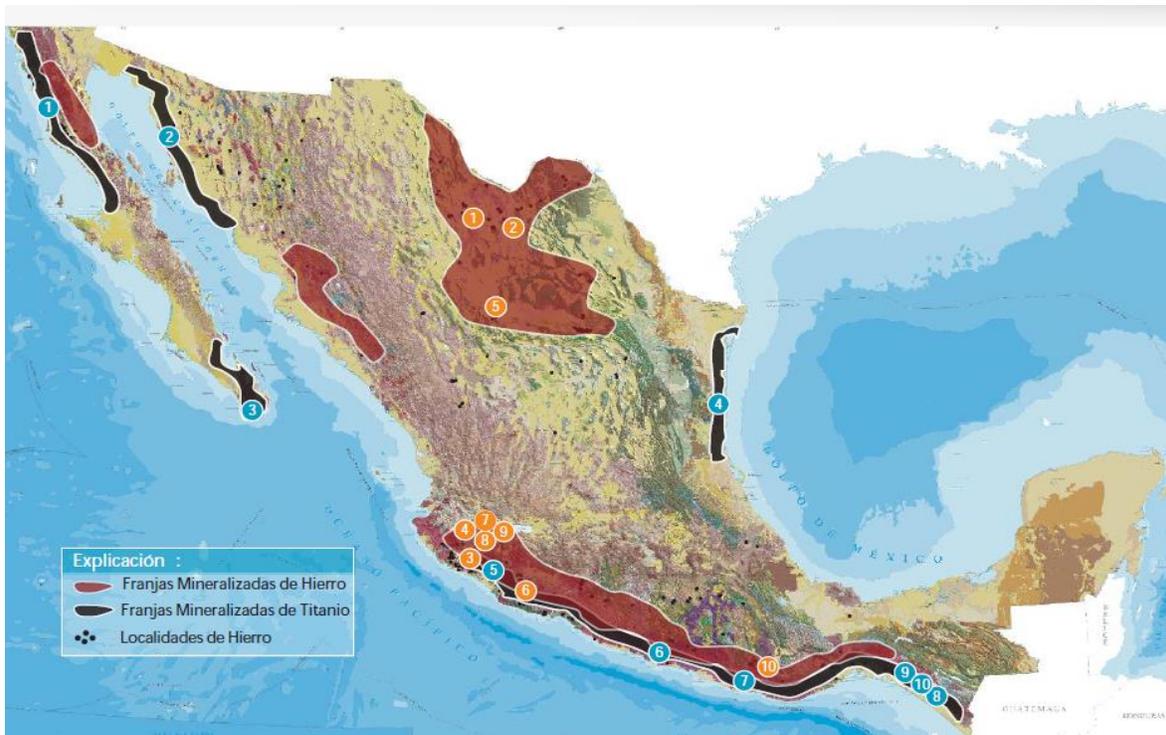


Figura 5. Principales zonas de interés para exploración de titanio. Tomado de Secretaría de Economía (2014).

En las costas de Oaxaca se han reportado arenas que presentan concentraciones de óxidos de Fe-Ti los cuales pueden ser económicamente explotables. Los mayores volúmenes reportados para contenido de óxidos de Fe-Ti se encuentran entre las Bahías de Huatulco y Puerto Escondido. En el 2009 el SGM realizó pruebas de separación gravimétrica para definir una posible concentración de titanio en la zona, la ley reportada de TiO_2 en los concentrados es de 36%. La ley de Fe total en dichos concentrados es de 42%. La asociación de titanio con fierro sugiere la presencia de ilmenita (Morales, 2009).

1.3 Objetivo general

Realizar una caracterización químico-mineralógica de las arenas procedentes de la playa La Ventanilla para determinar su procedencia empleando distintas técnicas analíticas. Además, se determinará la importancia económica del placer como yacimiento sedimentario de donde se puede obtener concentrados de ilmenita y rutilo de gran interés económico.

1.3.1 Objetivos particulares:

1. Determinar las condiciones necesarias que expliquen la formación de placeres, tal como los aportes de minerales y su distribución en las costas del estado de Oaxaca.
2. Determinar las relaciones texturales de los minerales titaníferos del área de estudio para comprobar si existe alguna relación con los yacimientos encontrados en el estado de Oaxaca, a través del análisis de láminas delgadas y superficies pulidas usando el microscopio petrográfico y minerográfico.
3. Con base en los resultados de análisis químicos de las muestras recolectadas en el área de estudio y sus posibles fuentes, determinar las relaciones de los distintos elementos presentes, para reportar su importancia económica como un yacimiento rico en titanio, hierro y zirconio.
4. Este trabajo se realizó gracias a los recursos otorgados por el proyecto PAPIME PE 105116 titulado “Diseño de una página electrónica para desarrollar las técnicas de identificación microscópica de minerales por petrografía y por minerografía”, los materiales generados a raíz de este trabajo serán agregados a la colección del laboratorio de Yacimientos Minerales y Minerografía de la Facultad de Ingeniería.

1.4 Planteamiento del problema

Los minerales de titanio en México se encuentran en tres principales regiones: Al noroeste (Baja California y la costa de Sonora), en el Golfo de México (en las costas de Tamaulipas) y en la parte del Pacífico (en los estados de Colima, Guerrero, Oaxaca y Chiapas). Los minerales más importantes en el sur de México y Baja California son: magnetita, ilmenita, zircón, rutilo, monacita y cromita. En la costa de Tamaulipas y Veracruz: monacita, zircón, rutilo e ilmenita. Y las localidades más importantes para sus reservas en forma de terrazas son: San Antonio del Mar, Baja California y La Ventanilla, Oaxaca. Estos últimos representan un depósito de placer de minerales pesados, los cuales están distribuidos y concentrados en las playas. En el estado de Chiapas la mineralización de titanio se presenta en forma de vetillas, lentes, nódulos y en arenas ferrosas de las playas con contenidos de Fe.

Con este trabajo se caracterizará química y mineralógicamente el yacimiento de tipo placer en La Ventanilla, Oaxaca. Determinando la posible procedencia de los minerales titaníferos con base en relaciones texturales de los minerales de titanio, asimismo se determinará su importancia económica para obtener concentrados de ilmenita y rutilo de gran interés económico.

Este trabajo se realizó gracias a los recursos otorgados por el proyecto PAPIME PE 105116 titulado “Diseño de una página electrónica para desarrollar las técnicas de identificación microscópica de minerales por petrografía y por mineragrafía”, los materiales generados a raíz de este trabajo serán agregados a la colección del laboratorio de Yacimientos Minerales y Mineragrafía de la Facultad de Ingeniería.

2. Marco Teórico

2.1 Yacimientos de óxidos de Fe-Ti

2.1.1 Yacimientos de placer de óxidos de Fe-Ti

En los yacimientos de tipo placer se encuentran minerales pesados con alto peso específico y de gran interés económico. Se producen de forma natural por la separación de las rocas madre que contienen minerales con una alta dureza y peso específico, su concentración se da en sedimentos no consolidados lo que hace más fácil y, por lo tanto, más económica su extracción y aprovechamiento. Los placeres corresponden a una concentración gravitacional de minerales pesados por fluidos en movimiento, principalmente por agua, sin embargo, puede ocurrir con sólidos y vientos.

Las condiciones que deben prevalecer para que ocurra una concentración gravitacional de minerales pesados son:

1. Existencia de la anomalía geoquímica.
2. Liberación de la fuente de roca madre.
3. Mecanismos de transporte (agua, hielo, viento).
4. Alta densidad del mineral.
5. Alta resistencia química a la meteorización (no reactivo).
6. Alta dureza.
7. Zona de acumulación.

En cuanto a los minerales que se suelen encontrar formando este tipo de yacimientos, se menciona en primer lugar a los metales nobles nativos: oro y platino que son los más conocidos. En el caso del oro, pequeños fragmentos son acrecionados para dar origen a las “pepitas”, aumentando su tamaño y pureza con el grado de evolución a lo largo del transporte. Otros minerales comunes de

importancia económica en estos yacimientos son: casiterita, granate, ilmenita, monacita, rutilo, zircón, entre otros. También en este tipo de yacimientos es posible encontrar algunas gemas, como el diamante, el rubí o el zafiro, (Maksaev, 2010)

Los depósitos de placer se han formado a lo largo del tiempo geológico, pero la mayoría son del Cenozoico al Reciente. La mayoría de los depósitos de placer son pequeños y frecuentemente transitorios ya que se producen sobre la superficie terrestre, generalmente en o sobre el nivel de base para la erosión, de manera que muchos de ellos son erosionados y solo algunos son enterrados como para preservarse como paleoplaceres.

Existen numerosas clasificaciones de placeres, una clasificación genética simple realizada por Maksaev, (2010) es:

- Placeres residuales: acumulación in situ durante la meteorización.
- Placeres eluviales: acumulación en un medio sólido en movimiento y cercano a la fuente primaria.
- Placeres aluviales: concentración en un medio líquido (agua) distal a la zona primaria.
- Placeres eólicos: concentración por medio del viento en movimiento.
- Placeres de playa: concentración por efectos del oleaje de playas.

Para este trabajo es necesario enfocarse a la formación de los placeres de playa debido a que la zona de estudio se considera de este tipo. En las costas el efecto del oleaje y de las corrientes marinas puede producir la concentración mecánica de minerales pesados. Las olas lanzan material a la playa y la resaca arrastra los materiales más ligeros, los cuales son transportados por la deriva a lo largo de la costa, de modo que se produce una acumulación de minerales pesados sobre la playa, principalmente durante la acción del oleaje favorecido por tormentas (figura 6). Las variaciones del nivel del mar por las mareas también son notables, porque grandes mareas exponen una faja mayor de playa para la acción de las olas. Los placeres de playa se forman en la actualidad en sectores donde los vientos

dominantes son oblicuos a la costa y existen corrientes marina paralelas a la costa, debido a que ambos factores promueven la deriva a lo largo de la costa (Maksaev, 2010).

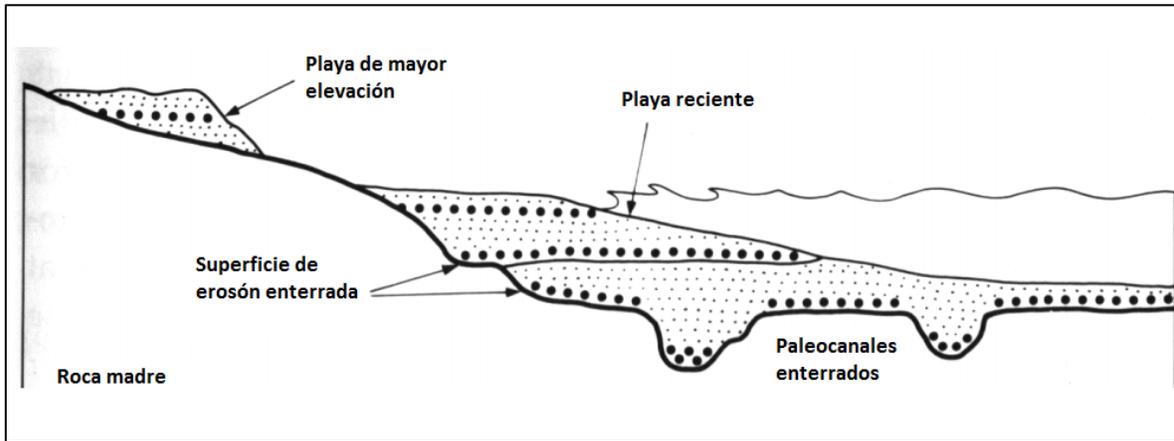


Figura 6. Esquema de formación de un yacimiento de placer, tomado y modificado de (Maksaev V, 2010)

Para que exista un enriquecimiento de minerales pesados es necesario que el efecto del oleaje erosione una y otra vez, ya que como puede verse en la figura 7, en una primera instancia ocurre un efecto que Rittenhouse (1943) llamo "equivalencia hidráulica". donde minerales más grandes y ligeros son depositados junto con minerales más pequeños y densos. Después, un segundo proceso remueve los minerales más grandes y ligeros resultando en un enriquecimiento de pequeños minerales más densos. En el caso de que este proceso de selección no

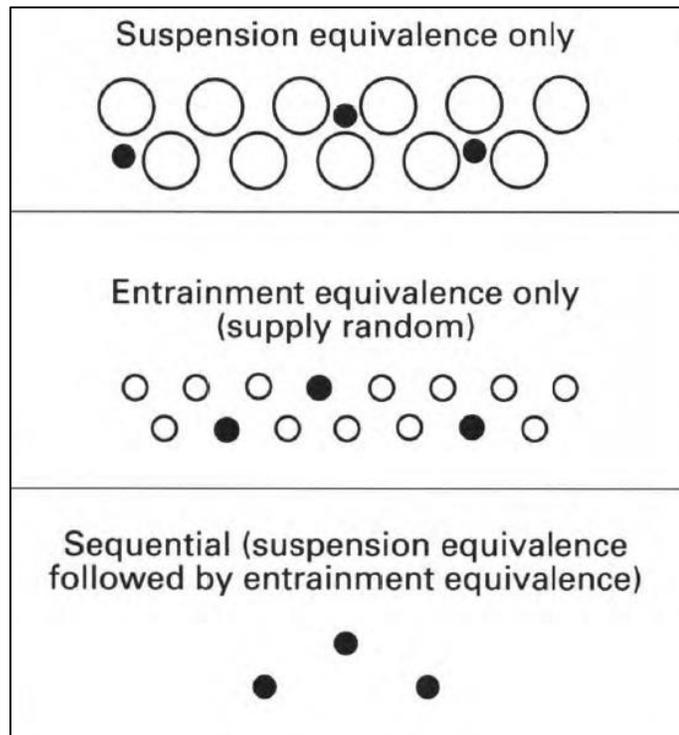


Figura 7. Diagrama de selección de granos de minerales ligeros (en color blanco) y minerales pesados (color negro), resultado de varios regímenes hidráulicos. Tomado de Force (1991).

sea muy eficiente, ocurre el caso que se muestra en el centro de la figura 6 donde solo hay un pequeño enriquecimiento de minerales pesados ya que no todos los minerales ligeros pudieron ser removidos por el segundo proceso.

El transporte equivalente (figura 8) se refiere a una equivalencia que se da entre minerales pesados de grano fino y minerales más ligeros de grano grueso. Donde el enriquecimiento se da cuando los minerales pesados quedan acumulados ya que la velocidad de la resaca de la ola no es la suficiente para arrastrarlos (Slingerland, 1984).

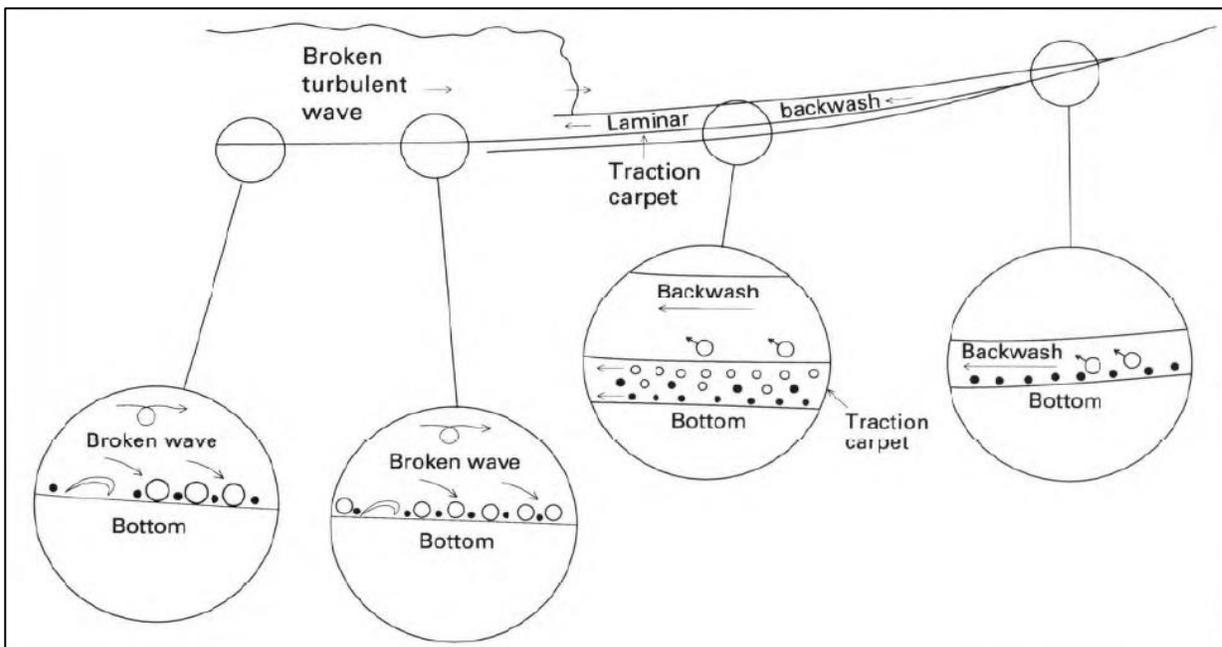


Figura 8. Diagrama donde se muestran las distintas etapas de un enriquecimiento de minerales pesados en la zona de vaivén de una playa. El rompimiento de la ola desacelera una ola de izquierda a derecha, mientras que la resaca se mueve de derecha a izquierda. Aquí se muestran dos etapas de deposición para el rompimiento turbulento de una ola donde en la parte izquierda se muestra la suspensión equivalente y en la parte derecha se muestra el enriquecimiento de minerales pesados por el proceso de transporte equivalente.

Los mayores depósitos de playa se incluyen en el Pleistoceno y Holoceno. Incluso los depósitos del Pleistoceno comúnmente preservan su fisiografía y apariencia original, representando la posición del nivel del mar en el Pleistoceno. Se presentan como terrazas frecuentemente paralelas a la actual línea de costa (Force, 1991).

Estos depósitos en facie de playa consisten esencialmente en alternancias de arenas pobres en minerales pesados y arenas enriquecidas en minerales pesados. En general los intervalos enriquecidos pueden ser de algunos metros de espesor,

en estos casos, el minado se puede enfocar a estas concentraciones individuales. Sin embargo, es más común que estas concentraciones sean de algunos centímetros de espesor, y con una gradación en delgadas concentraciones que son minadas como si el depósito fuera diseminado. (Force, 1991).

Bajo condiciones de tormenta, la lámina individual de minerales pesados sumergidas hacia el mar representan un perfil típico de una zona de mesoplaya. Como en el este de Australia, las bases de los placeres enriquecidos del Holoceno se encuentran actualmente en el nivel medio del mar. Así, el enriquecimiento parece estar limitado por la zona de mesoplaya (swash zone).

Algunos ejemplos de depósitos de placer de playa de minerales titaníferos son:

- Depósitos del Distrito de Jacksonville, donde los depósitos son principalmente del Pleistoceno y consisten en terrazas marinas formadas a lo largo de la línea de costa. También, depósitos modernos fueron minados entre 1916 y 1929. En total este distrito tuvo una producción de unos 5×10^6 de toneladas de TiO_2 y todavía se estima que existe una reserva de unas 14×10^6 toneladas de TiO_2 (Force and Lynd, 1984).
- El distrito del Este de Australia, que consiste en depósitos de placer enriquecido en rutilo, formando un singular distrito de unos 1200 km de longitud. Este distrito es uno de los más grandes y ricos de minerales de titanio en el mundo debido a su gran tamaño y su asociación mineral dominada por rutilo, zircón e ilmenita. Estos son depósitos de playa del Holoceno, depósitos eólicos del Holoceno, depósitos de playa del Pleistoceno y depósitos eólicos del Pleistoceno (Beasley, 1948; McKellar, 1975; Melville, 1984; Thompson and Bowman, 1984).
- Distrito de Bunbury en el oeste de Australia. Este distrito ha sido el productor más importante de ilmenita desde 1956. Los depósitos de minerales pesados se encuentran en tres complejos que representan antiguas líneas de costa representados en terrazas marinas, las edades varían desde el Plioceno (Collins y otros, 1986) al Holoceno (Collins & Hamilton, 1986). La concentración de Ilmenita es de un 62%.

2.2 Yacimientos de óxidos de Fe-Ti asociados a Nelsonitas

Watson (1907) fue el primero en utilizar el término nelsonita a una serie de diques compuestos en una tercera parte de apatito y dos terceras partes de óxidos de Fe-Ti. Estos cuerpos subvolcánicos fueron documentados en los condados de Nelson (localidad tipo) y Amherst en Virginia, Estados Unidos y en asociación directa con lo que más tarde se conocería como la Anortosita Roseland (Herz, 1969). Una característica de las nelsonitas es que presentan texturas equigranulares homogéneas y no presentan porcentajes altos de minerales silicatados (Dymek & Owens, 2001; Tollari et al., 2008).

Luego de realizar estudios más detallados, Watson & Taber (1913) propusieron la siguiente definición: "La nelsonita es una roca ígnea rara compuesta principalmente por apatito y óxidos de Fe-Ti (magnetita, ilmenita o rutilo)". Más tarde la International Union of Geological Sciences o IUGS (por sus siglas en inglés) definió a la nelsonita como una roca de tipo dique con textura granular que consiste esencialmente de ilmenita + apatito ± rutilo (Le Maitre, 1989). Las nelsonitas forman parte de un grupo de rocas ricas en Fe-Ti-P, mejor conocidas como rocas "FTP" (Mirmohammadi et al., 2007). La mayor parte de las nelsonitas se encuentran asociadas a complejos anortosíticos masivos del Proterozoico (Kolker, 1982; Dymek & Owens, 2001).

En México se han reportado tres localidades con afloramientos de nelsonitas: Pluma Hidalgo y Huitzo, en el estado de Oaxaca y Cd. Victoria, en Tamaulipas (Ortega, 1978). Las localidades antes mencionadas corresponden a afloramientos precámbricos. En Pluma Hidalgo se tuvo una actividad minera en la Mina Tizur (Paulson, 1964), de donde se extrajo rutilo (TiO_2), recientemente en 2015 se realizaron trabajos de exploración con el proyecto MIA P "TITANIO" con el cual se busca evaluar las reservas de titanio en la zona.

Los cuerpos de roca tipo FTP se emplazan principalmente en forma de sills, diques, vetillas, lentes, capas y cuerpos concordantes y discordantes (Kolker, 1982; Owens & Dymek, 1992; McLelland et al., 1994; Charlier et al., (2008); Dymek & Owens, 2001; Mirmohammadi et al., 2007). La importancia en el estudio de las rocas tipo

FTP se debe a su potencial como mena de óxidos de Fe-Ti y apatito (Mirmohammadi et al., 2007)

2.1.2 Hipótesis de la formación de nelsonitas

Las hipótesis propuestas para la formación de este tipo de depósitos de óxidos de Fe-Ti se resume en dos modelos principales: Inmiscibilidad y segregación (Morisset et al., 2010).

- 1) Inmiscibilidad líquida (figura 9), donde un magma rico en Fe-Ti-P se separa física y químicamente de un magma silicatado durante su enfriamiento, la fase silicatada del magma forma intrusiones sieníticas y la parte rica en Fe-Ti-P forma gabros estratificados y menas de óxidos masivos (Philpotts, 1967; Kolker, 1982).

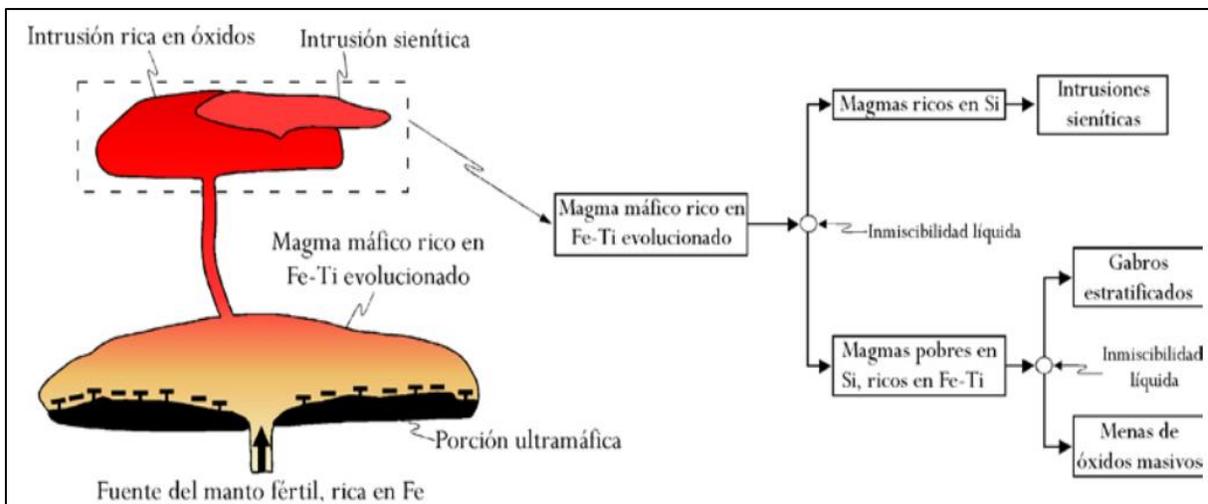


Figura 9. Modelo esquemático que ilustra la formación de nelsonitas por medio de inmiscibilidad líquida. Tomado de Casas (2014).

- 2) Charlier et al. (2008) sugirieron un modelo en el cual un magma parental rico en TiO_2 y P_2O_5 es segregado por densidad, formando inicialmente capas de ilmenita, posteriormente, una temprana saturación atípica de apatito en el magma que, en conjunto, la cristalización de ilmenita y la segregación gravitacional de ilmenita + apatito relativo a la plagioclasa, dio lugar a la formación de nelsonitas. El mecanismo propuesto para el enriquecimiento de

ilmenita es la remoción de plagioclasa cálcica debido a su relativa flotabilidad en el denso magma ferrodiorítico (figura 10).

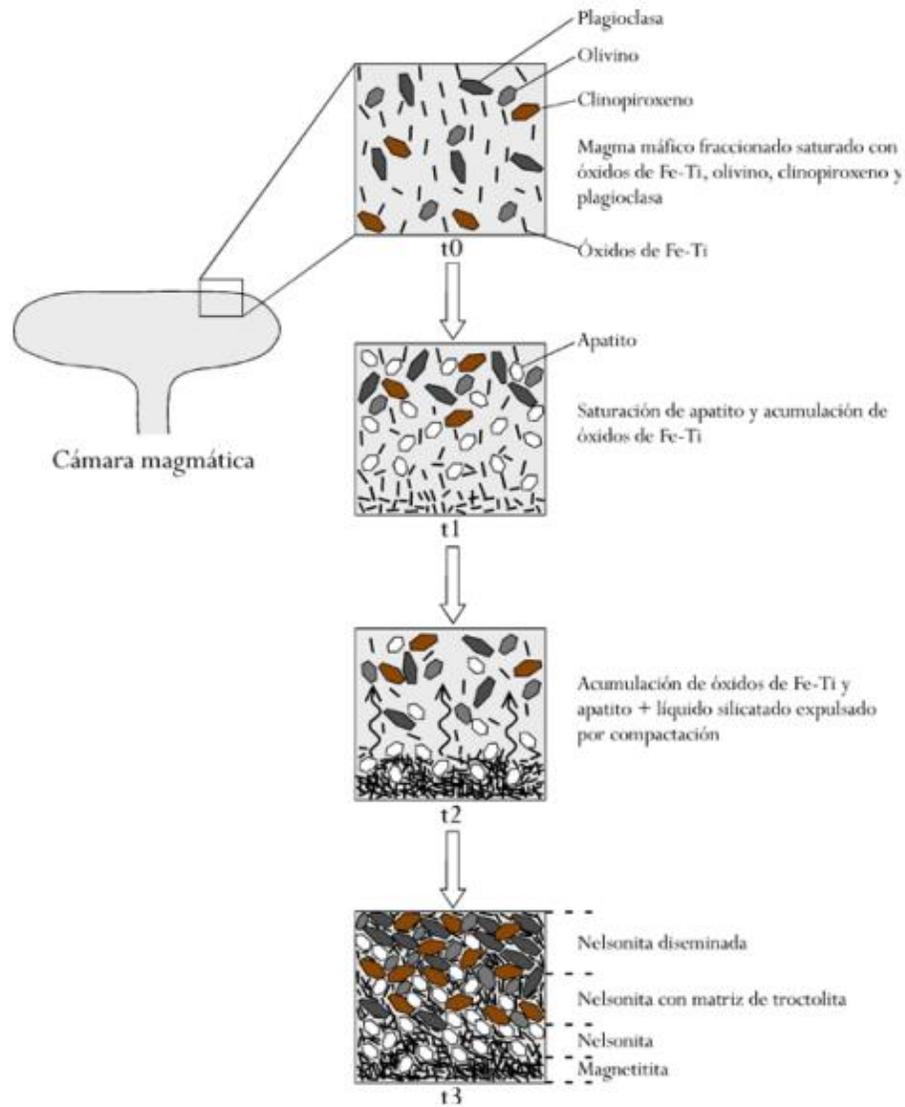


Figura 10. Modelo esquemático para la generación de nelsonitas por medio de procesos de cristalización fraccionada. Tomado de Casas (2014).

Las nelsonitas se asocian a distintos tipos de roca. Por ello, es necesario definir brevemente las litologías más comunes que se encuentran relacionadas en tiempo y espacio. La serie AMCG (Anortosita-Mangerita-Charnockita-Granito), se asocia temporal y espacialmente a algunas rocas comagmáticas las cuales se relacionan directamente con la formación de las nelsonitas. Las rocas comagmáticas asociadas a nelsonitas son:

- a) **Anortosita.** El termino anortosita fue usado por primera vez por Hunt (1983), el cual se deriva de una división de los feldespatos en las variedades ortosa y anortosa. Streckeisen (1976) define que las anortositas son rocas compuestas por plagioclasa cálcica, en un porcentaje mayor o igual al 90% en volumen.
- b) **Jotunita.** Es una roca en la serie de las charnockitas, es el miembro que equivale composicionalmente a una monzonorita (monzodiorita con ortopiroxeno), (Le Maitre, 2002).
- c) **Mangerita,** es un miembro intermedio de la serie de rocas charnockíticas y equivalente a una monzonita de ortopiroxeno (Le Maitre, 1989). Entre las características geoquímicas importantes se destaca su alto contenido de álcalis y Fe, además de una baja concentración de Si (Hall, 1996).
- d) **Charnockita,** Es un término que se aplica a un granito de ortopiroxeno (Tabla 1), (Le Maitre, 2002).

Tabla 1. Clasificación de Charnockitas. Tomado y modificado de Le Maitre (2002)

<i>QAPF (campo)</i>	<i>Nombre General</i>	<i>Nombre especial</i>
2	Granito feldespato alcalino de ortopiroxeno	Charnockita feldespato alcalina
3	Granito de ortopiroxeno	Charnockita
4	Granodiorita de ortopiroxeno	Opdalita
5	Tonalita de ortopiroxeno	Enderbita

6	Sienita feldespato alcalina de ortopiroxeno	-
7	Sienita de ortopiroxeno	-
8	Monzonita de ortopiroxeno	Mangerita
9	Monzodiorita de ortopiroxeno	Jotunita
10	Diorita de ortopiroxeno, anortosita (M<10)	-

2.3 Corrientes Marinas en el Pacífico Mexicano

Los yacimientos de placer de playa no sólo se forman con el aporte de los ríos a las costas. Para que un yacimiento de placer de playa ocurra es necesario que haya una selección y distribución de estos minerales a través de las costas, este proceso se lleva a cabo principalmente por las corrientes marinas y el oleaje es el encargado de hacer la clasificación de minerales pesados. A continuación, se describen las corrientes marinas que cruzan por las costas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero.

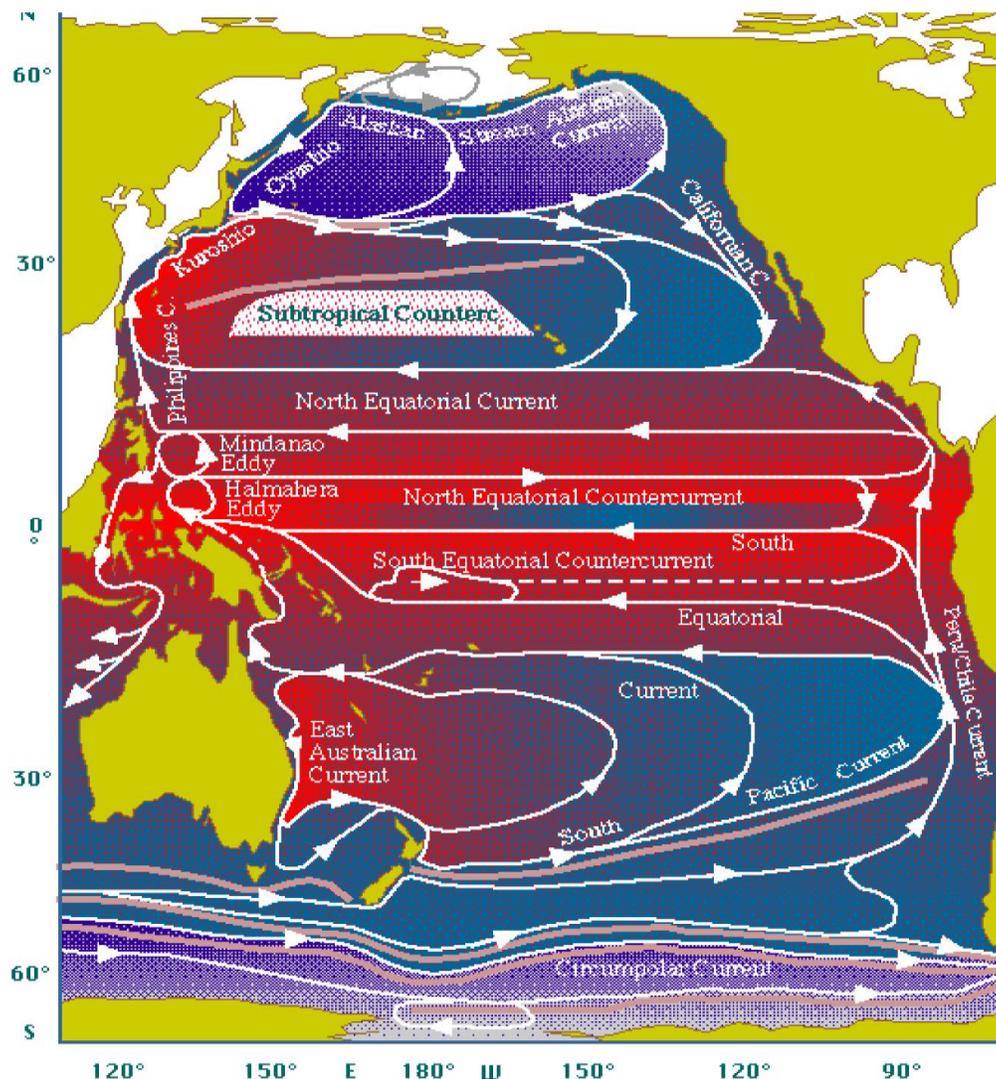


Figura 11. Corrientes marinas predominantes en el Océano Pacífico, tomado de (Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015)

La mayor parte de las corrientes oceánicas son empujadas por los vientos, sin embargo, debido al efecto Coriolis, las corrientes oceánicas se desvían a la derecha de la dirección del viento, hacia el NW en el hemisferio norte y al SE en el hemisferio sur. Las corrientes oceánicas (figura 11) adquieren agua más caliente en los trópicos distribuyéndola por las latitudes altas, regresando con aguas más frías. Con este proceso, las temperaturas se moderan en las regiones costeras provocando que algunos lugares sean más cálidos que otros. La sal aumenta la densidad del agua provocando que flote menos y que la temperatura del agua superficial descienda. El agua salada desciende con temperaturas más altas hundiéndose hasta alcanzar el fondo para esparcirse horizontalmente. Con el descenso de agua se provoca una surgencia de otra para así completar ciclos (Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015).

El Pacífico Mexicano abarca desde el norte, en la entrada del Golfo de California hasta la frontera sur de México, donde comienza el Pacífico Tropical Oriental Centroamericano. En la parte norte, el límite son aguas de tipo subártico de la Corriente de California y aguas ecuatoriales de alta salinidad del Golfo de California que se encuentran con las aguas tropicales y cálidas que provienen del sur.

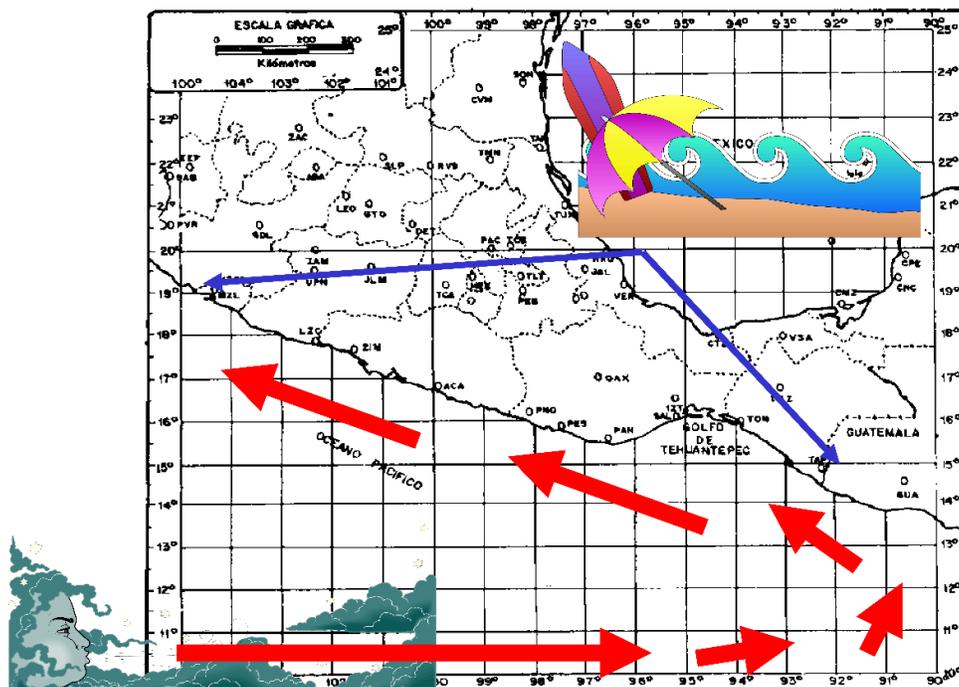


Figura 12. Recorrido de la Contracorriente Marina Ecuatorial. En el Pacífico Mexicano (tomado de Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015).

La contracorriente marina ecuatorial (figura 11) se divide en dos corrientes ecuatoriales de superficie, se denominan Norecuatorial y Surecuatorial respectivamente. Estas corrientes marinas transportan grandes volúmenes de agua caliente, provocando un descenso en el nivel del mar en la parte este del Pacífico acumulando enormes volúmenes de agua cálida en las regiones ecuatoriales y tropicales del lado oeste. La velocidad promedio de desplazamiento de la contracorriente ecuatorial es de entre 15 a 20 K.p.h., por lo que, en aproximadamente tres meses después de iniciar su recorrido, arriban a las costas de América Central y de la República Mexicana antes de cambiar de dirección hacia el noroeste para volver a integrarse a la Corriente Norecuatorial. La Contracorriente

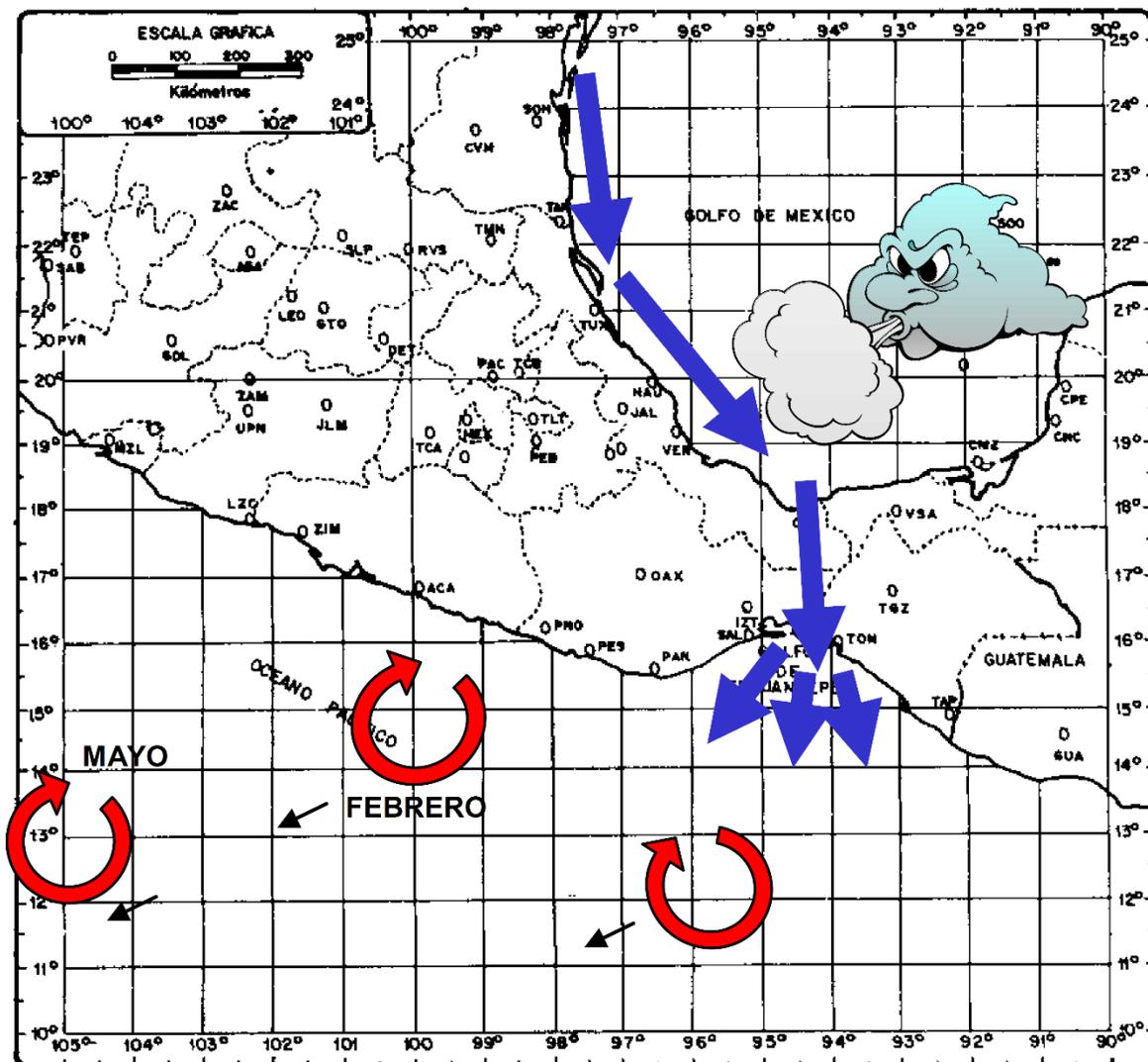


Figura 13. Recorrido de los remolinos y efecto de los "nortes" (tomado de Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015).

Marina Ecuatorial (figura 12) se encuentra desplazada aproximadamente 5° de latitud hacia el norte (Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015).

Ayala Mata y Ayala Ruiz (2015) identificaron tres grandes remolinos que giran en sentido de las manecillas del reloj (figura 13). Estos remolinos son originados localmente por el efecto de los llamados "nortes" que no son más que masas de aire frío que entran en el Golfo y se desplazan hacia el sur generalmente a partir de los meses de octubre hasta mayo afectando los estados de Guerrero y Oaxaca. Presentan un desplazamiento hacia el oeste-noroeste. En diciembre se identifica un remolino al sur del Golfo de Tehuantepec, al sur de Acapulco se presenta otro en el mes de febrero y por último en el mes de mayo se presenta uno muy distante al suroeste, luego de estos periodos se debilitan y desaparecen.

3. Marco Geológico

En el área de estudio los aportes de sedimentos provienen principalmente de lo que se conoce como Terreno Oaxaqueño y el Terreno Xolapa (figura 14), debido a esto es necesario conocer los tipos de roca que constituyen dichos complejos y así, tener un adecuado conocimiento sobre las fases minerales que se pueden encontrar en la zona ya que de esta forma se puede tener una noción de los minerales que se pudieran encontrar en las costas del estado de Oaxaca.

El sur de México se constituye por un mosaico de terrenos tectonoestratigráficos acrecionados (Campa y Coney, 1983), donde los límites son estructuras tectónicas

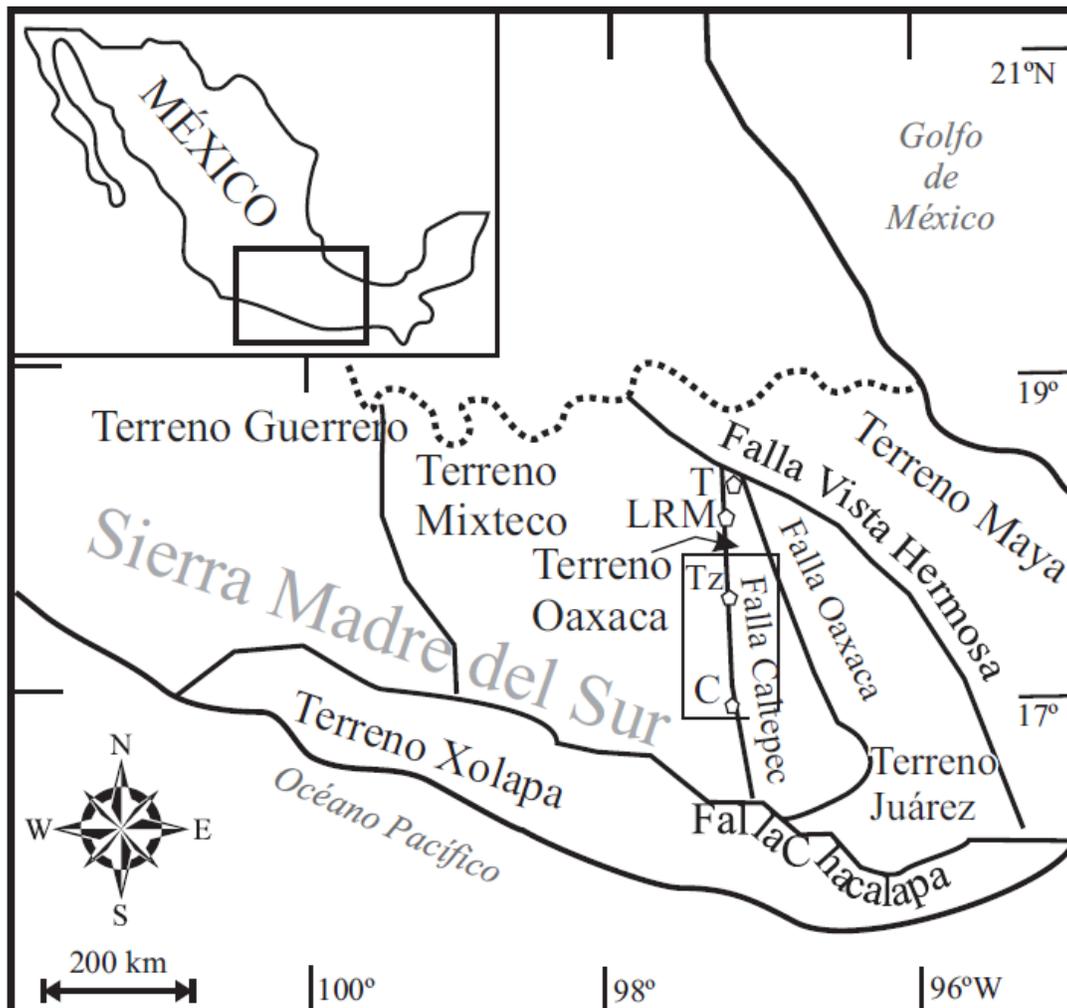


Figura 14. Terrenos tectonoestratigráficos del sur de México. Tomado de Santamaría-Díaz et al. (2008).

mayores (figura 14). Los basamentos de los Terrenos Oaxaqueño y Xolapa son el Complejo Oaxaqueño y Complejo Xolapa respectivamente.

3.1 Complejo Oaxaqueño

El Complejo Oaxaqueño tiene una distribución N-S y se compone por una secuencia de rocas metasedimentarias y ortogneises en facies de granulita cuya edad de metamorfismo va de 900 a 1100 Ma (Solari et al., 2003, Keppie et al., 2003).

Fries (1962) propone el nombre de Complejo Oaxaqueño para distinguir a una secuencia de rocas metamórficas gnéicas, conformada por ortogneis cuarzo-feldespático, paragneis con grafito y mármoles cipolino, anortosita, anfibolita, charnockita, y pegmatita, rocas características de un metamorfismo en facies de granulita.

En esta secuencia se pueden encontrar múltiples diques pegmatíticos que son concordantes y discordantes con respecto a la foliación de la roca encajonante. Algunas de estas pegmatitas no se encuentran deformadas mientras que otras muestran características de deformación sintectónica (Schaaf y Schulze, 1998; Solari et al., 1998).

La anortosita fue descrita en la sección Nochixtlán - Oaxaca por Ortega (1981), precisando que es una metanortositas masiva con relictos de megacristales de plagioclasa y piroxeno, alojando bandas concordantes de nelsonita hacia la parte del contacto con el ortogneis.

Paulson (1962), reportó cerca de Pluma Hidalgo una roca con alto contenido de rutilo, ilmenita, augita y apatito, donde la principal litología presente en una anortosita alcalina.

En el sur del Complejo Oaxaqueño se encuentra una secuencia de rocas de composición predominantemente máfica, con franjas de anfibolita, metagabro y piroxenita. en general presentan una foliación con rumbo E-W con echados hacia el S, esta orientación varía localmente y exhibe pliegues de escala variable con asimetría hacia el norte. Esta secuencia es cortada por una serie de diques máficos

a intermedios con textura afanítica y porfídica, la secuencia no presenta deformación en el régimen cristal-plástico (Tolson, 2005).

El Complejo Oaxaqueño está cubierto discordantemente por un paquete de andesita basáltica, por encima una cubierta de conglomerado (lechos rojos) seguido de una arenisca con intercalaciones de conglomerado. La arenisca es cubierta concordantemente por una brecha calcárea que le sobreyace una caliza masiva. Estas rocas son afectadas por el sistema de falla Chacalapa y presentan un metamorfismo en facies de esquistos verde (Tolson, 2005).

3.2 Complejo Xolapa

Ortega (1981) reporta que el Complejo Xolapa se conforma por rocas metamórficas y numerosos batolitos. Las rocas se han interpretado como un arco continental alóctono del Jurásico-Cretácico, el cual es acrecionado a la margen pacífica de Norteamérica (Campa et al., 1983; Ortega et al., 1995; Dickinson et al., 2001; Corona et al., 2006), que experimentó una rápida exhumación durante el Paleoceno.

El Complejo Xolapa representa el basamento del Terreno Xolapa que fue descrito en por primera vez en 1965 por De Cerna que lo describe como una secuencia de rocas metasedimentarias y metaígneas de alto grado de metamorfismo, las cuales, están intrusionadas por distintos cuerpos plutónicos deformados en el área de Tierra Colorada - Acapulco. Ortega (1981), reportó rocas de carácter migmatítico en la región desde Puerto Escondido a Pinotepa Nacional, interpretando al Complejo Xolapa como una porción mesocortical de un arco magmático.

En las rocas del Complejo Xolapa en la región comprendida entre Puerto Escondido y Puerto Ángel se llevaron a cabo distintos estudios petrológicos, estableciéndose las condiciones del proceso metamórfico-migmatítico, los cuales se llevaron a cabo a temperaturas entre 830 °C y 900°C con presiones entre 6 y 9 Kbar (Corona-Chávez et al. 2006).

Recientemente, Talavera et al. (2013) en Gutiérrez Aguilar, (2015), proponen un modelo de evolución tectónica para el Complejo Xolapa (figura 15) indicando que la parte Este evoluciona a partir de una cuenca delimitada por terrenos del sur de México y el Bloque Chortis. La yuxtaposición y posterior acrecimiento del arco del Terreno Guerrero durante el Cretácico Tardío, provocó un engrosamiento, metamorfismo y migmatización a niveles de corteza media. La exhumación parcial del Complejo Xolapa inició durante el Paleoceno fue provocada por el despegue y migración del Bloque Chortis.

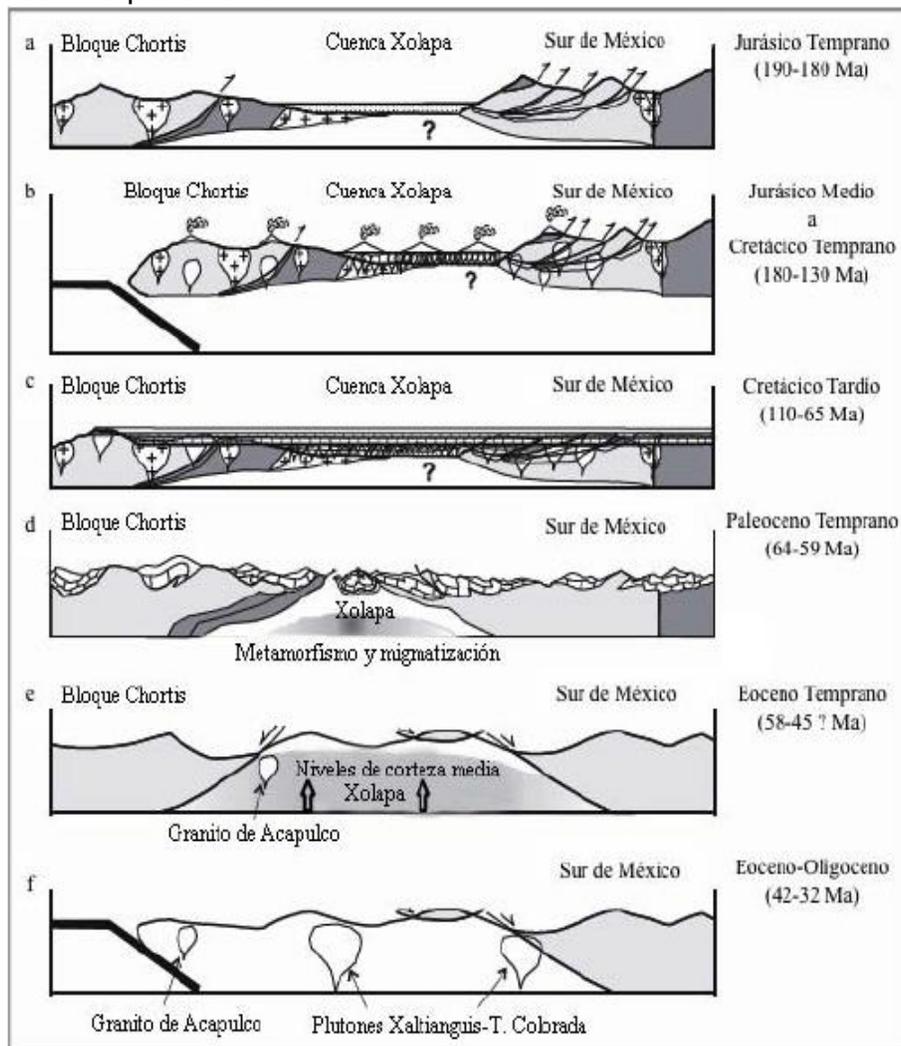


Figura 15. Evolución tectónica del Terreno Xolapa. a) Acumulación de sedimentos en la cuenca Xolapa, delimitada por terrenos del sur de México y el Bloque chortis. b) Magmatismo de arco intrusando sedimentos y plutonismo registrado en el Sur de México y Bloque Chortis. c) Depósito de plataformas carbonatadas y turbiditas. d) Interacción del Bloque Chortis con Xolapa produciendo metamorfismo de alto grado y migmatización. e) Exhumación parcial de Xolapa causada por el despegue y migración del Bloque Chortis. f) Inicio de subducción detrás del Bloque Chortis durante su migración y translación hacia la Placa del Caribe. Modificado de Talavera et al. (2013) (en Gutiérrez-Aguilar, 2015).

La vertiente que drena hacia el Océano Pacífico en general, está integrada por una extensa y complicada red hidrográfica, generalmente del tipo dendrítico que en ocasiones cambia a tipo de enrejado. Esta vertiente incluye dos regiones hidrológicas completas (Costa de Oaxaca y Tehuantepec); tres parciales (Balsas, Costa Chica-Río Verde y Costa de Chiapas).

4.1 Región Hidrológica 20. Costa Chica-Río Verde (RH-20)

La región hidrológica Costa Chica-Río Verde comprende una extensa área en la porción suroeste del estado de Oaxaca cubriendo cerca del 24.14% del territorio estatal, dividiéndose en tres cuencas: Río Atoyac, Río La Arena y otros y Río Ometepe o Grande. Esta región limita al norte con distintas regiones hidrológicas como Balsas (RH-18) y Papaloapan (RH-28); en la parte este con la Región Hidrológica Tehuantepec (RH-22); al oeste con la Región Hidrológica costa Grande (RH-19); al sur con la de Costa de Oaxaca (Puerto Ángel, RH-21) y con el Océano Pacífico.

La Cuenca Río Atoyac es una de las más extensas ocupando un 19.24% del territorio estatal. La red principal de drenaje es de tipo dendrítico, en general con una orientación NW-SE, sin embargo, los ríos presentes como El Atoyaquillo, Río Grande, El Campanario, Sola de Vega y algunos tramos del Atoyac no tienen un cauce con una orientación bien definida.

Dentro de la Cuenca del Río Atoyac (figura 17) se localiza la mina Alfonso en el poblado de San Pablo Huitzo. En este sitio fue donde se recolectaron muestras de nelsonita las cuales se definen por la paragénesis Ilmenita (FeTiO_3) + Apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$). La localidad se encuentra dentro de la cuenca que pertenece la región hidrológica RH18A- Río Atoyac, esta cuenca tiene un patrón de drenaje de tipo dendrítico. El río de mayor orden dentro de la cuenca es de orden 7 y corresponde al Río Atoyac el cual nace a 2270 msnm al NW de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, pasando por la capital del estado atravesando de norte a sur con una pendiente suave, cruza longitudinalmente los valles de Etna, Zaachila-Zimatlán y Santa María Ayoquezcó, rodeando el cerro Piedra de Lumbre para después aumentar su pendiente hasta llegar a Santa Catarina Coatlán donde cambia de dirección hacia el suroeste hasta llegar a la confluencia con el Río Verde, el cual desemboca en el Océano Pacífico cerca de la Laguna de Chacahua a unos 90 km al Oeste de Puerto Escondido. Por otro lado, en la confluencia del Río Grande con el Río Atoyac existe una vertiente que se desprende hacia el este la cual

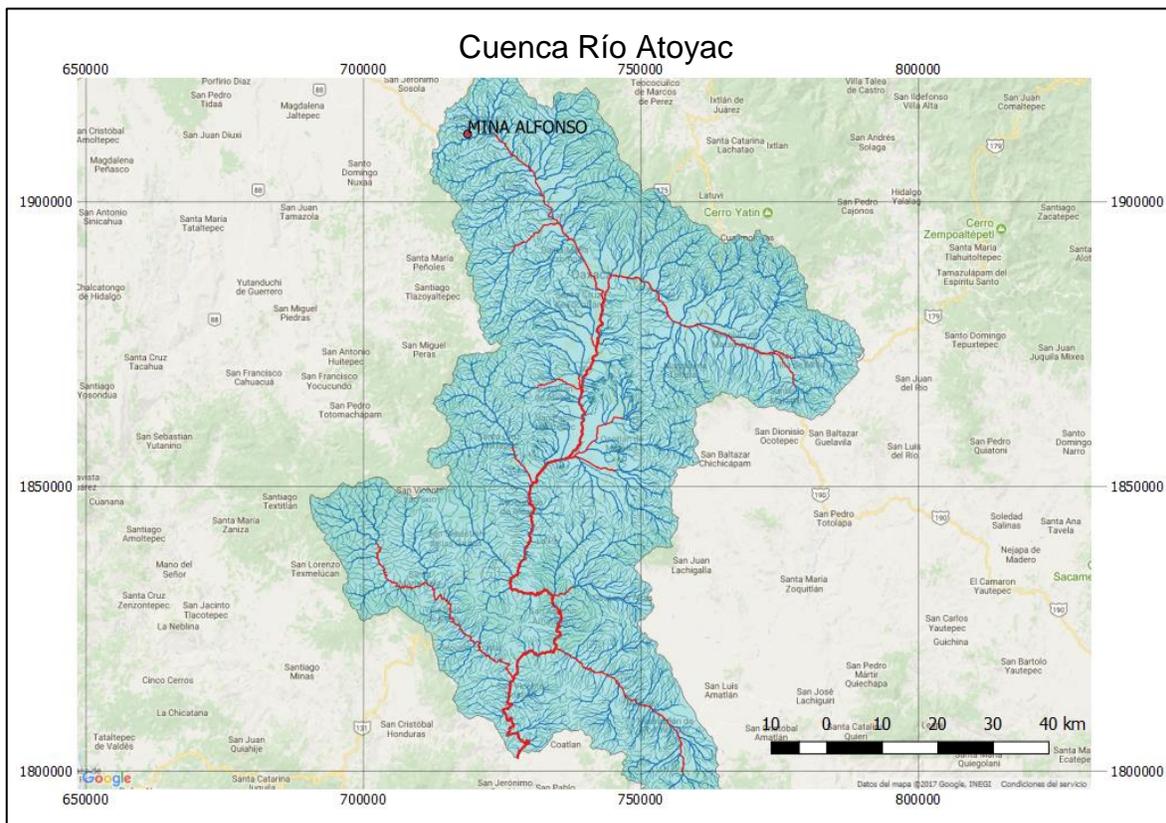


Figura 17. Cuenca Río Atoyac.

subcuenca nace cerca de unos 8 km al SW de San Pedro el Alto recibiendo aportes en la parte este de la subcuenca del poblado de Pluma Hidalgo.

4.3 Subcuenca San Pedro Pochutla (RH21Bb)

Uno de los yacimientos de hierro más cercanos a la zona de estudio se encuentra en Santa María Huatulco, donde se recolectaron muestras pertenecientes a la mina La Esperanza que actualmente se encuentra abandonada. En este yacimiento los minerales de hierro presentes son magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) altamente limonitizados.

La mina La Esperanza pertenece a la Subcuenca San Pedro Pochutla RH21Bb (figura 19). La red de drenaje de esta subcuenca es de tipo dendrítico. El río principal de la zona es el Copalita que es de orden 5 y desemboca cerca de las Bahías de Huatulco a 30 km al NE de la zona de estudio.



Figura 19. Subcuenca San Pedro Pochutla.

5. Petrografía

En este capítulo se presentan los resultados del análisis petrográfico y mineragráfico de 24 muestras representativas obtenidas de la nelsonita de Huitzo, los yacimientos de óxidos de Fe-Ti asociados a las anortositas de Pluma Hidalgo y las arenas titaníferas de la playa La Ventanilla en el Estado de Oaxaca.

Para el análisis petrográfico con microscopio de luz transmitida se usaron 9 láminas delgadas que corresponden a la nelsonita de Huitzo y a los yacimientos de Ti asociados a las anortositas de Pluma Hidalgo. En el análisis de arenas de la playa La Ventanilla se utilizaron 10 láminas delgadas para identificar los minerales transparentes que se encuentran en dicho yacimiento.

En los análisis mineragráficos utilizando luz reflejada se utilizaron 11 superficies pulidas que corresponden a la nelsonita del poblado de Huitzo y los yacimientos de Ti en Pluma Hidalgo. Para las muestras de arena se analizaron 9 superficies pulidas para determinar la composición de las arenas titaníferas.

El estudio petrográfico y mineragráfico se basó en una descripción de secciones delgadas y superficies pulidas por su contenido mineral, texturas y la clasificación de las rocas se hizo a partir de comparaciones visuales de porcentajes. Las microfotografías presentadas en este capítulo fueron tomadas con una cámara Moticam acoplada al microscopio de marca Carl Zeiss modelo Axion Vision. Las abreviaciones utilizadas para las descripciones son las recomendadas por la Subcomisión de Sistemática para Rocas Metamórficas (SCMR; por sus siglas en inglés) en Fettes & Desmons (2007).

Apatito = Ap, Albita = Ab, Clorita = Chl, Clinoanfíbol = Cam, Clinopiroxeno = Cpx, Cuarzo = Qz, Epidota = Ep, Granate = Grt, Ilmenita = Ilm, Magnetita = Mag, Opacos = Op, Plagioclasa = Pl, Rutilo = Rt, Zircón = Zrn.

5.1 Nelsonita de Huitzo

El acceso al afloramiento es a la altura del kilómetro 154 de la carretera Panamericana del estado de Oaxaca, a través del camino antiguo de terracería de la mina Alfonso. En este afloramiento se puede observar un cuerpo tabular de una roca cuya composición es Apatito e Ilmenita (Apatito 40%, Ilmenita 60%, porcentajes visuales). El cuerpo de roca tiene un espesor de 130 centímetros con una dirección de la capa de S40°W, es concordante con las litologías que lo limitan. Se encuentra limitado en la parte superior por una metaanortosita (Figura 21 B) y en la parte inferior por un metagabro foliado (Figura 20) el cual muestra un alto grado de intemperización que persiste mayormente en los piroxenos puesto que estos se encuentran altamente cloritizados.

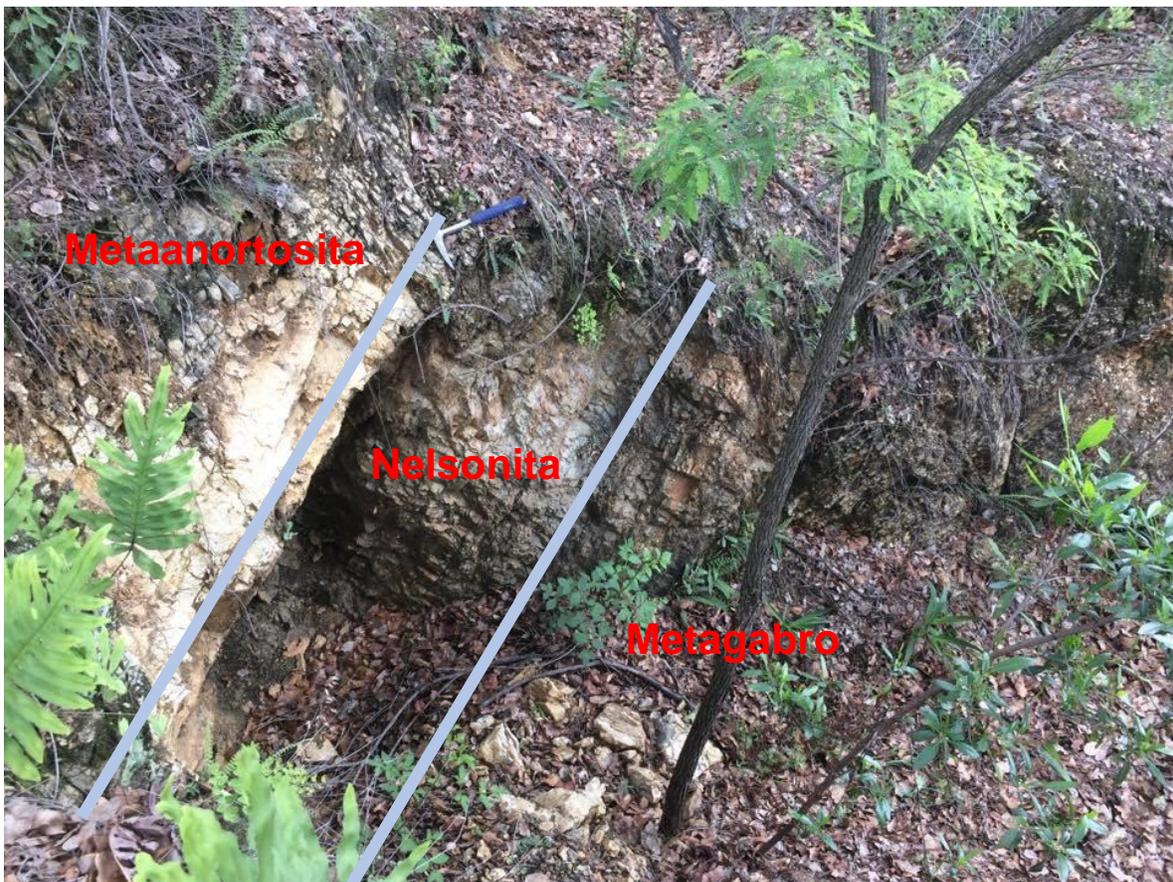


Figura 20. Cuerpo concordante de nelsonita de Huitzo limitado por un metagabro y una metaanortosita.

En la figura 21 se puede observar una muestra de roca cuya composición es esencialmente apatito + ilmenita siendo esta la paragénesis en equilibrio para la roca. Como lo define Le Maitre (1989), a las rocas formadas esencialmente por apatito e ilmenita reciben el nombre de Nelsonita.



Figura 21. Muestras de roca recolectadas en la Mina Alfonso en el poblado de Huitzo, Oaxaca. A) Muestra de Nelsonita, en color blanco Apatito, en color negro metálico Ilmenita. B) Muestra de Metaanortosita.

La paragénesis en equilibrio encontrada en la Nelsonita se define como: Ilmenita + Apatito \pm Piroxeno (figura 22). Los cristales de Apatito son equidimensionales, anhedrales y se les encuentra formando agregados los cuales pueden llegar a ser mayores a 1 centímetro y, otros se encuentran como inclusiones en cristales anhedrales de ilmenita. Los porcentajes basados en una estimación visual son: Ilmenita (59%), Apatito (40%) y Piroxeno (<1%). La textura de la roca en general es una textura Xenomórfica debido a que la mayoría de los cristales son anhedrales.

En los bordes de las Ilmenitas hay vestigios de oxidación debido a la presencia de limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) la cual persiste en el contacto Ilmenita-Apatito. Además, es posible observar algo de clorita asociándose a un proceso de cloritización que afecta a los piroxenos que llegan a estar presentes como mineral accesorio debido a la presencia de un metagabro aledaño al cuerpo de nelsonita.

Los cristales de Ilmenita se caracterizan por tener un tinte rosa pálido y su baja anisotropía, son anhedrales de tamaños equidimensionales los cuales forman agregados que están en contacto con apatito, además, cristales de ilmenita se encuentran como inclusiones dentro de apatito. Otra característica peculiar de estas Ilmenitas son sus lamelas de exsolución, ya que es posible observar lamelas de Hematita en una dirección que corresponde a la del crucero de la Ilmenita. Estas lamelas de les puede observar dispersas en todo el cristal de ilmenita, sin embargo, es apreciable que en el centro se concentran aún más y las lamelas pueden ser producto de una sobresaturación de Fe_2O_3 el cual se exsuelve en forma de hematita.

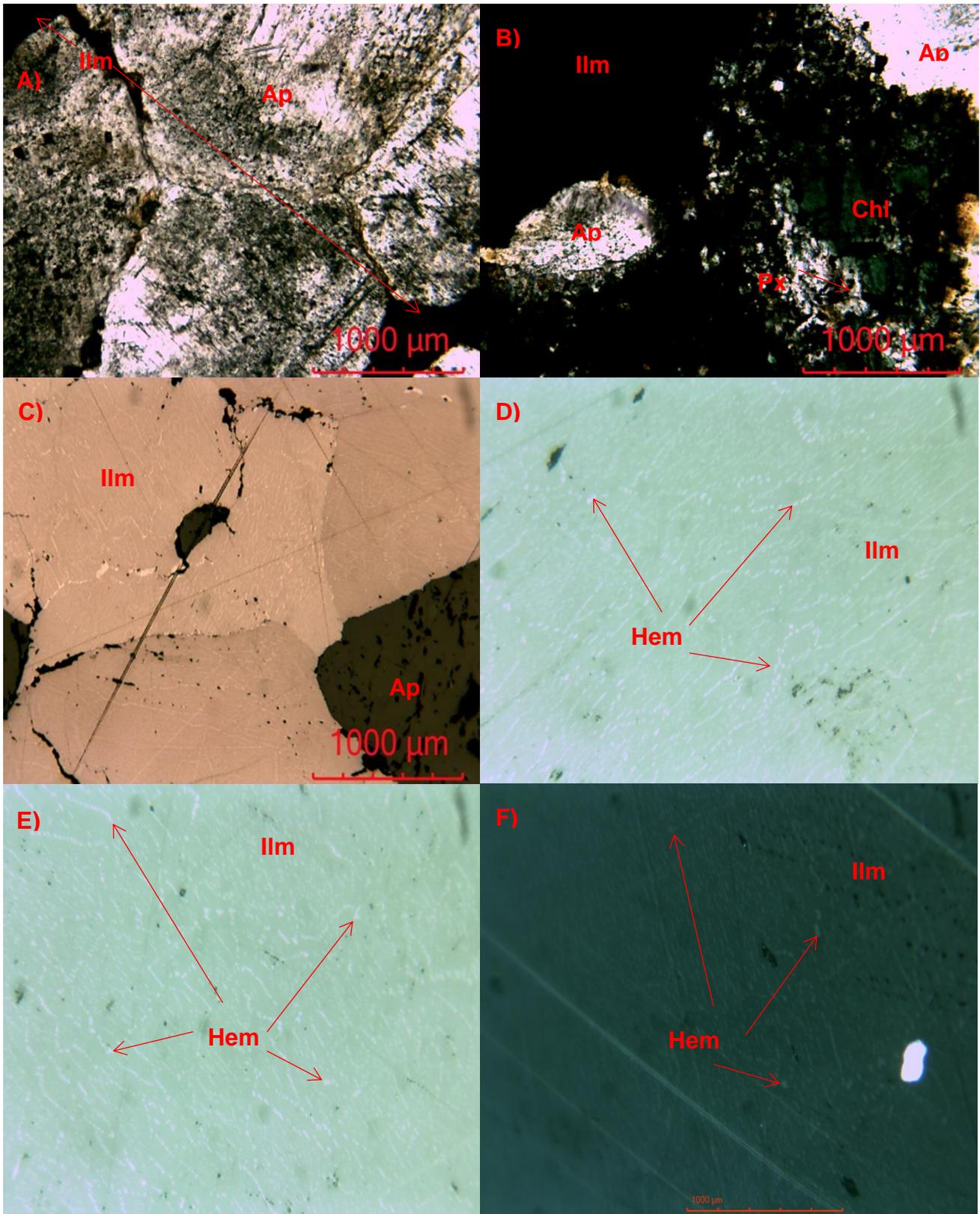


Figura 22. A) Agregado de cristales anhedrales de Ap equidimensionales en contacto con ilmenita. B) Paragénesis en equilibrio: *Ilm* + *Ap* + *Px* clotizado. C) Agregado de cristales de Ilmenitas, además, es posible observar una inclusión de apatito dentro de una ilmenita. D); E); F) Ilmenitas con exsoluciones de hematita.

5.2 Mina Tizúr, Pluma Hidalgo Oaxaca.

El acceso a la mina Tizúr es a través de una brecha que se encuentra a un costado de la carretera Oaxaca el Zapote- Copalita aproximadamente a 400 metros antes de la entrada al poblado de Pluma Hidalgo, yendo de Santa María Huatulco hacia Pluma Hidalgo. Debido a la temporada de lluvias, la alta vegetación y la alta alteración de las rocas de la zona, se encuentran varios derrumbes a lo largo del camino cubriendo los afloramientos donde se podía observar la roca y la mineralización de rutilo. Sin embargo, bajando a la planta de beneficio es posible observar material de mena que usaban antiguamente en la mina.

En las cercanías de la planta de beneficio abandonada (figura 23), es posible observar las siguientes litologías: Anortosita, Anortosita con rutilo e ilmenita y un Metagabro. Además, en algunas partes de la anortosita se puede observar una alteración donde la paragénesis es: Cuarzo + Clorita + Rutilo.



Figura 23. A) Acceso a la planta de beneficio de la Mina Tizúr. B) Planta de beneficio abandonada de la Mina Tizúr.

El material de mena en la mina Tizúr consiste en una mineralización de Rutilo la cual se encuentra emplazada en anortosita, metagabro y en brechas (figura 24 A, D). Existen partes en las rocas donde se presenta una alteración cuya paragénesis se define como: Cuarzo + Clorita + Rutilo. En la figura 24 se puede observar la mineralización de Rutilo e Ilmenita asociada a distintos tipos de roca donde se encuentra la alteración antes mencionada, también, se observa la roca encajonante sana (anortosita) en figura 24 B.



Figura 24. A) Rutilo emplazado en metagabro con algo de cloritización. B) Anortosita con Ilmenita. C) Rutilo en brecha. D) Rutilo emplazado en anortosita con piroxenos cloritizados, la roca presenta algo de silicificación.

Los cristales de Rutilo se presentan de formas euhedrales y subeuhedrales, vistos con luz transmitida son característicos por su alto relieve y por presentar maclas polisintéticas, mientras que vistos con luz transmitida tienen una baja anisotropía y además, presenta reflexiones internas en colores rojizos. El Rutilo representa el 15% de los componentes de la roca, se encuentra incluido en una matriz de plagioclasa o en contacto con cristales de ilmenita (10%) formando agregados los cuales se incluyen en una matriz de plagioclasa que ocasionalmente presenta una textura antipertítica (75%).

Los cristales de Ilmenita son de formas variables, se les encuentra subhedrales y anhedrales, en conjunto con el rutilo forma un mosaico de cristales los cuales se encuentran incluidos en una matriz de plagioclasa. Una característica peculiar de estas ilmenitas es que presentan maclas polisintéticas y, en algunos casos inclusive se puede ver una macla de enrejado.

La matriz de la roca está formada por un mosaico equigranular de plagioclasas antipertíticas, sin embargo, es posible observar algunos fenocristales de la misma plagioclasa que en algunos casos los cristales presentan deformación. Para esta roca la paragénesis en equilibrio consiste en: plagioclasa + rutilo + ilmenita, (figura 25).

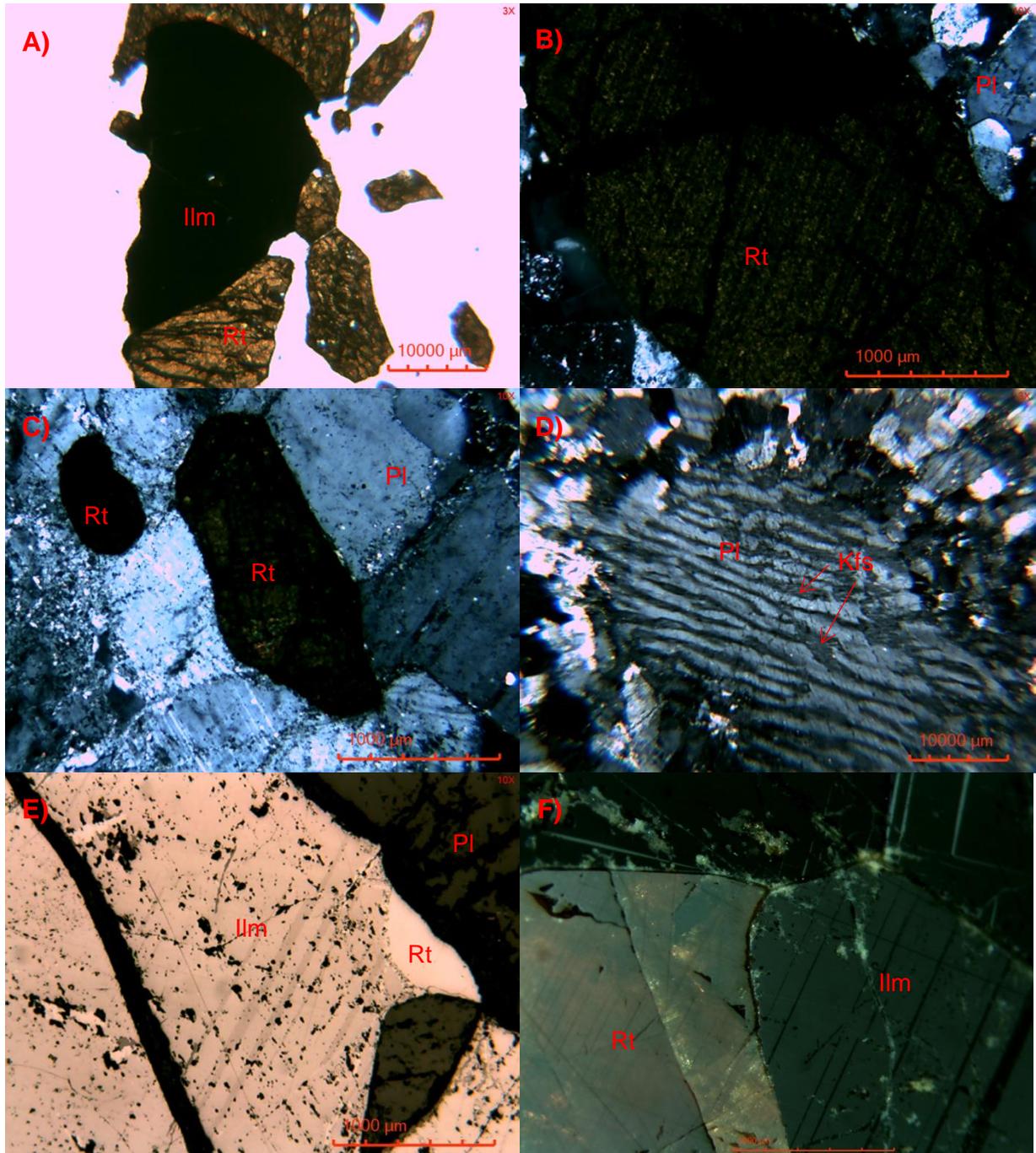


Figura 25. A) Agregado de Rt e Ilm dentro de una matriz de plagioclasa. B) Rutilo con macla polisintética. C) Rutilos incluidos en una matriz de plagioclasa. D) Fenocristal de plagioclasa con textura antipertítica. E) Ilmenitas y rutilos con maclas polisintéticas. F) Agregado de ilmenitas y rutilo donde es posible observar maclas polisintéticas.

5.3 Arenas de la playa La Ventanilla

Las arenas negras en la playa La Ventanilla se presentan como láminas, lentes y estratos que varían de 1 a 25 cm de espesor, los cuales se intercalan con horizontes de minerales claros. Estas arenas se encuentran tanto en la zona de supraplaya como en la de mesoplaya (figura 26 y 28), que hacia el continente forman parte de una terraza la cual tiene 1.2 m de exposición donde se pueden observar claramente las secuencias de arenas negras con horizontes de arena clara (figura 27). En dirección NW-SE constituyen una barra que forma una laguna rica en manglares.

Las arenas negras son de grano fino, se presentan en granos angulosos a subredondeados bien seleccionados. Los minerales de mena identificados son: ilmenita, ilmenita con exsoluciones de hematita, magnetita, rutilo y zircón. Los horizontes de minerales claros están formados por cuarzo, feldespatos, epidota, clinoanfíbol, con escaso granate, magnetita, ilmenita y rutilo.



Espesor (centímetros)	Contenido
9	Arenas negras.
3	Horizonte claro
6	Arenas negras.
12	Horizonte claro
10	Arenas negras.
7	Horizonte claro
18	Arenas negras.
2	Horizonte claro
13	Alternancia de Arenas negras y Horizontes claro con espesores variables con 2-3 y 1 a >1 centímetros respectivamente.

Figura 26. Perfil de playa donde se puede observar los horizontes de arenas negras intercalados con horizontes claros.



Figura 28. Terraza formada en la parte continental de la zona de estudio. Aquí es posible observar las intercalaciones de arenas negras con horizontes claros



Figura 27. Zanja cavada en la parte de la supraplaya donde puede observarse los horizontes de arenas negras intercalados con horizontes de arenas claras.

5.3.1 Horizontes Claros

El estudio sedimentológico de las arenas recolectadas en los horizontes claros muestra que son arenas de grano fino bien clasificadas, las formas son variadas, se encuentran granos angulosos, subangulosos y subredondeados. Los porcentajes de contenido mineral son en base a una estimación visual. A continuación, se describen los minerales presentes en los horizontes claros:

1. Feldespatos: Los fragmentos de plagioclasa son de grano fino a medio, son granos angulosos y en algunos casos se les puede observar tabulares, presentan la característica macla polisintética, además, algunos presentan una textura antipertítica (figura 29 B). Además de la plagioclasa es posible observar Feldespato-K: Los cristales de feldespato son de grano fino a medio, son angulosos a subangulosos, representan el 30% de la composición de las arenas.
2. Cuarzo: Los fragmentos de cuarzo son de grano fino a medio, se les encuentra angulosos a subangulosos, representan el 42% de la composición de las arenas.
3. Granate: Los granates son de grano fino, subredondeados de formas esferoidales, se caracterizan por su alto relieve, representan el 2% de la composición de las arenas.
4. Clinoanfíbol: Los fragmentos de anfíbol son de grano medio a grueso, la mayor parte de estos cristales se les encuentra en formas tabulares angulosos, aunque se llegan a presentar subredondeados (figura 29 A), algunos de los clinoanfíboles presentan cierto grado de cloritización, representan el 13% de la composición de las arenas.
5. Epidota: Los fragmentos de epidota son de grano fino, son de relieve alto (figura 29 F), subangulosos, representan el 5% de la composición de las arenas.
6. Opacos: Consisten en fragmentos de minerales de grano fino, angulosos a subredondeados. El porcentaje de minerales opacos basado en estimación visual es de 8%.

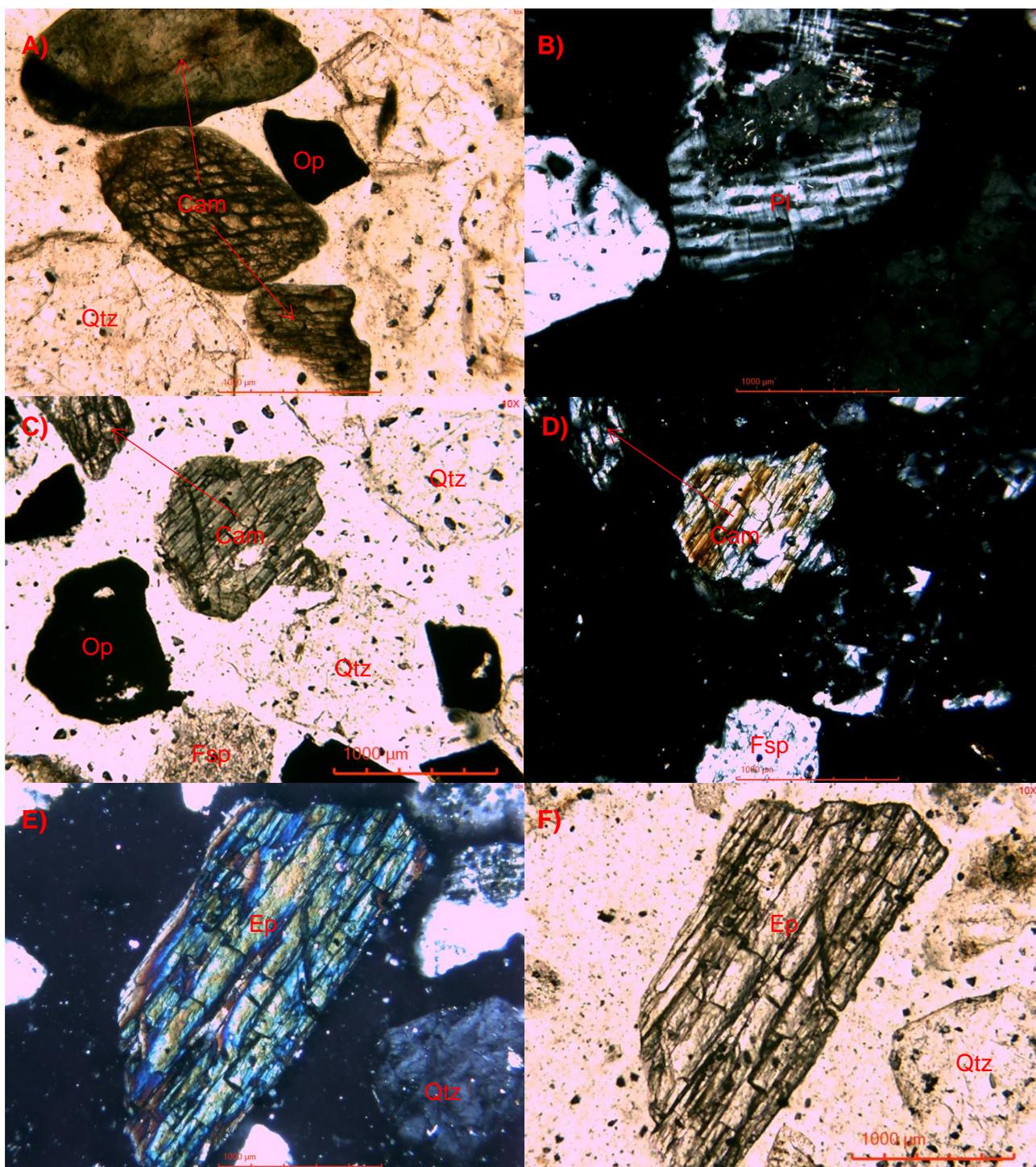


Figura 29. A) Fragmentos de Cam y Qtz. B) Fragmento de Pl con antiperitita visto con nicoles cruzados. C) Fragmento de Cam. D) Fragmento de Cam visto con nicoles cruzados. E) Fragmento de Ep visto con nicoles cruzados. F) Fragmento de Ep.

5.3.2 Arenas negras

El estudio sedimentológico de las arenas negras recolectadas en la playa La Ventanilla permite observar que corresponden a arenas de grano fino bien clasificadas. Las formas son variadas, se encuentran granos angulosos, subangulosos y subredondeados. Los porcentajes de contenido mineral son en base a una estimación visual. A continuación, se describen los minerales presentes en las arenas negras:

1. Ilmenita: Los fragmentos de ilmenita son de grano fino se presentan de formas variadas, van de muy angulosos hasta algunos que llegan a presentarse subredondeados. Los fragmentos varían en tamaño, va de 450 hasta las 1000 micras, mientras que los fragmentos de magnetita van de 300 hasta 600 micras. Algunas de las ilmenitas presentan lamelas de exsolución de hematita (figura 30), estas lamelas miden de 5 a 50 micras de su lado más largo y de 1 a 10 micras de ancho. Por otro lado, se tiene Ilmenitas con maclas polisintéticas (figura 31), la Ilmenita representa el 50% de la composición de las arenas.
2. Magnetita: Son fragmentos de grano fino, se presentan granos redondeados hasta algunos subangulosos (figura 31), tienen una abundancia del 36%.
3. Rutilo: Es de grano fino, son granos muy angulosos a angulosos, característicos por su alto relieve, color pardo fuerte y presentar maclas polisintéticas, representan el 3% de la composición de las arenas.
4. Clinoanfíbol: Son de grano fino a medio, se les encuentran tabulares, angulosos, aunque se llegan a presentar subredondeados, representan el 3% de la composición de la roca.
7. Cuarzo: Los fragmentos de cuarzo son de grano fino, se les encuentra angulosos a subangulosos y representan el 1% de la composición de las arenas.
5. Granate: Son fragmentos de grano fino, son granos muy angulosos a angulosos, son característicos por su alto relieve, representan el 4% de la composición de las arenas.

6. Zircón: Se encuentra en granos finos, los tamaños varían de 500 a 800 micras, las formas varían algunos se presentan redondeados y otros angulosos, en algunos casos se les puede observar subhedrales (figura 33). Característicos por su alto relieve y alta birrefringencia, representan el 3% de la composición de las arenas.

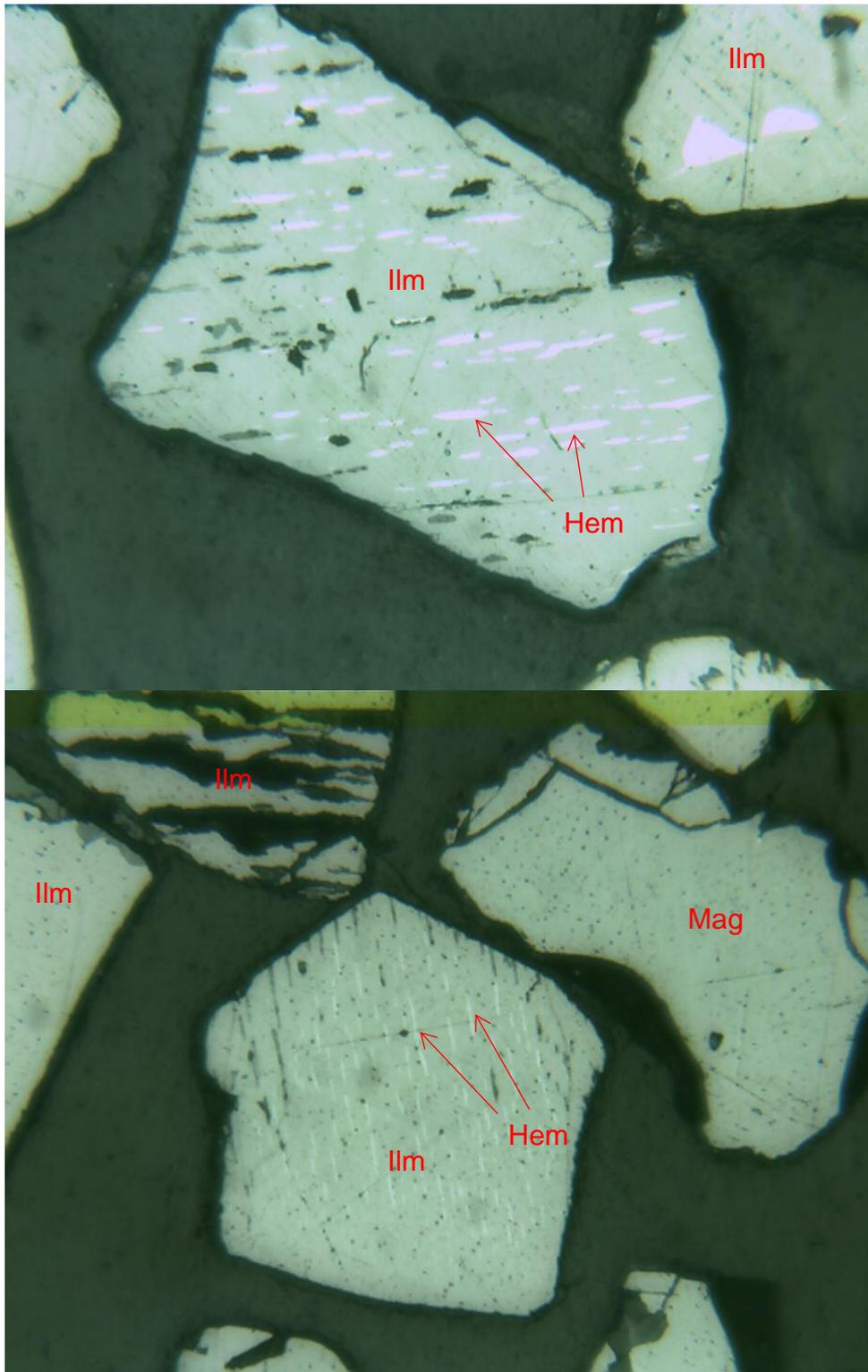


Figura 30. Ilmenitas con exsoluciones de hematita vistas con el aumento de 20x.

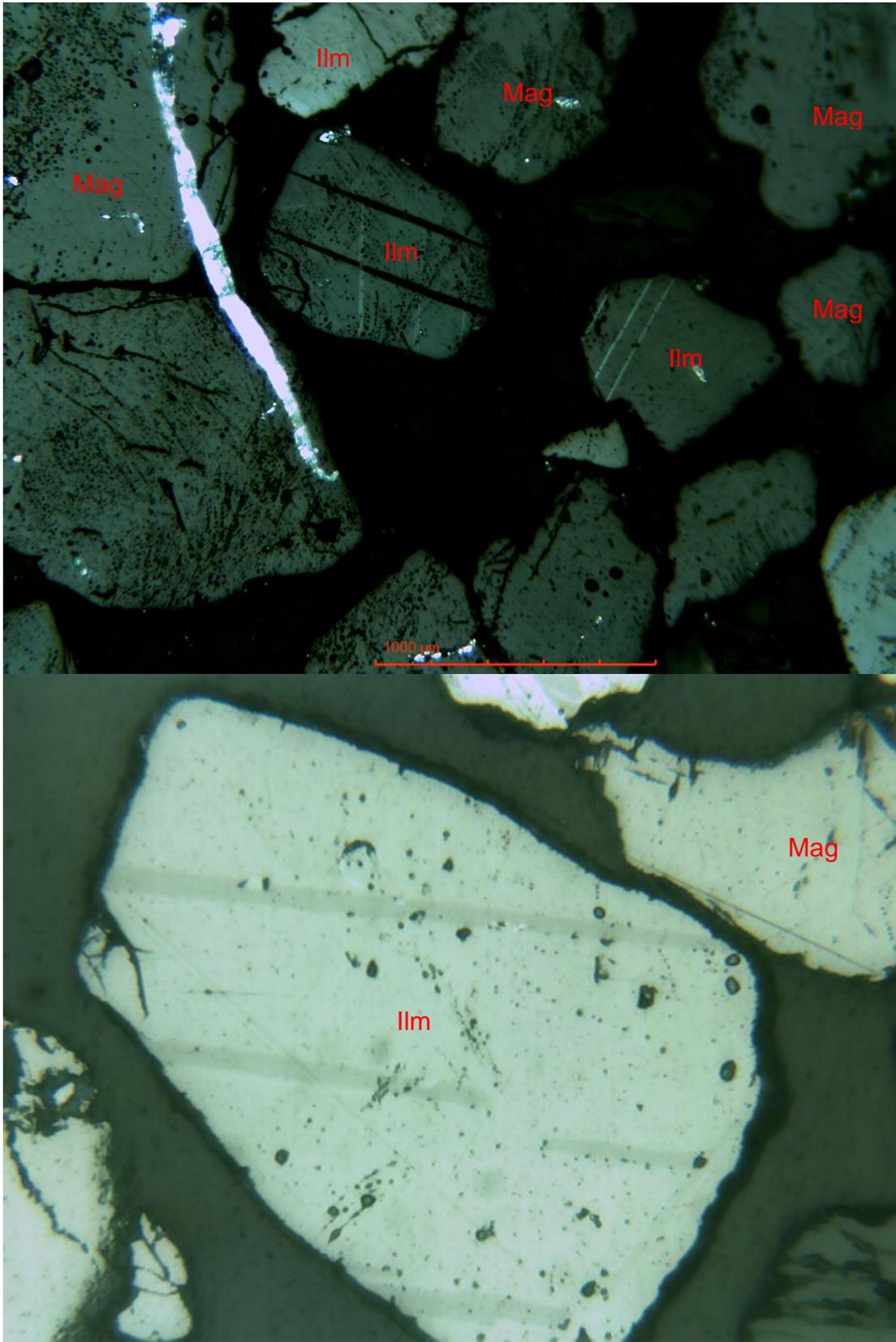


Figura 31. Ilmenitas con macla polisintética e ilmenitas sin exsoluciones de hematita.

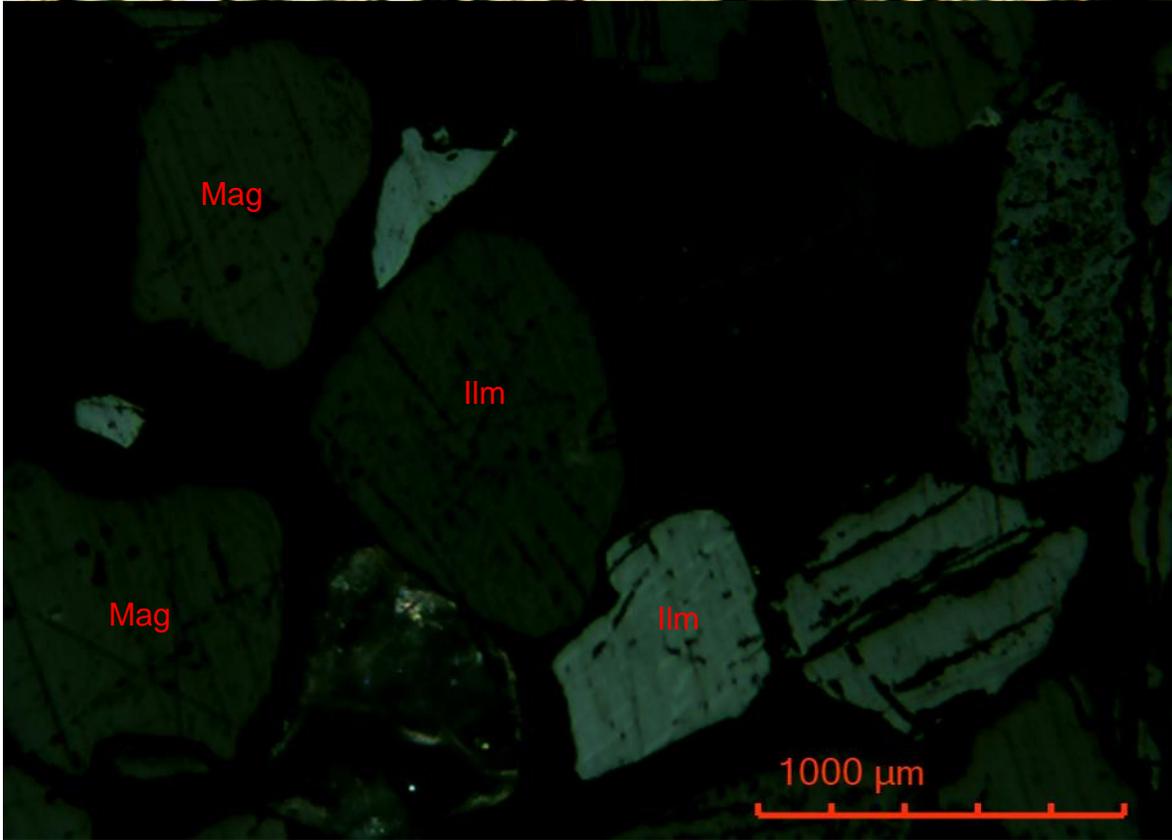
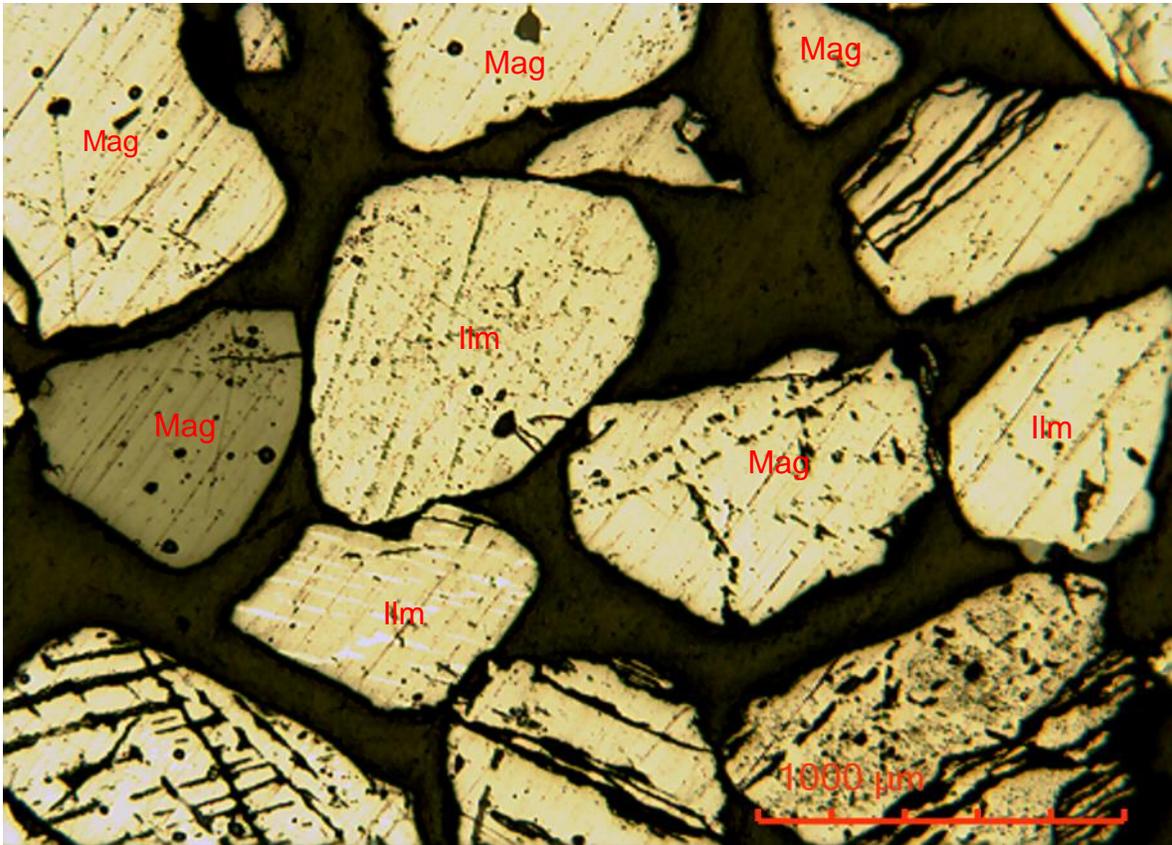


Figura 32. Ilmenitas con macla polisintética y con lamelas de exsolución. También se puede apreciar granos de magnetita.

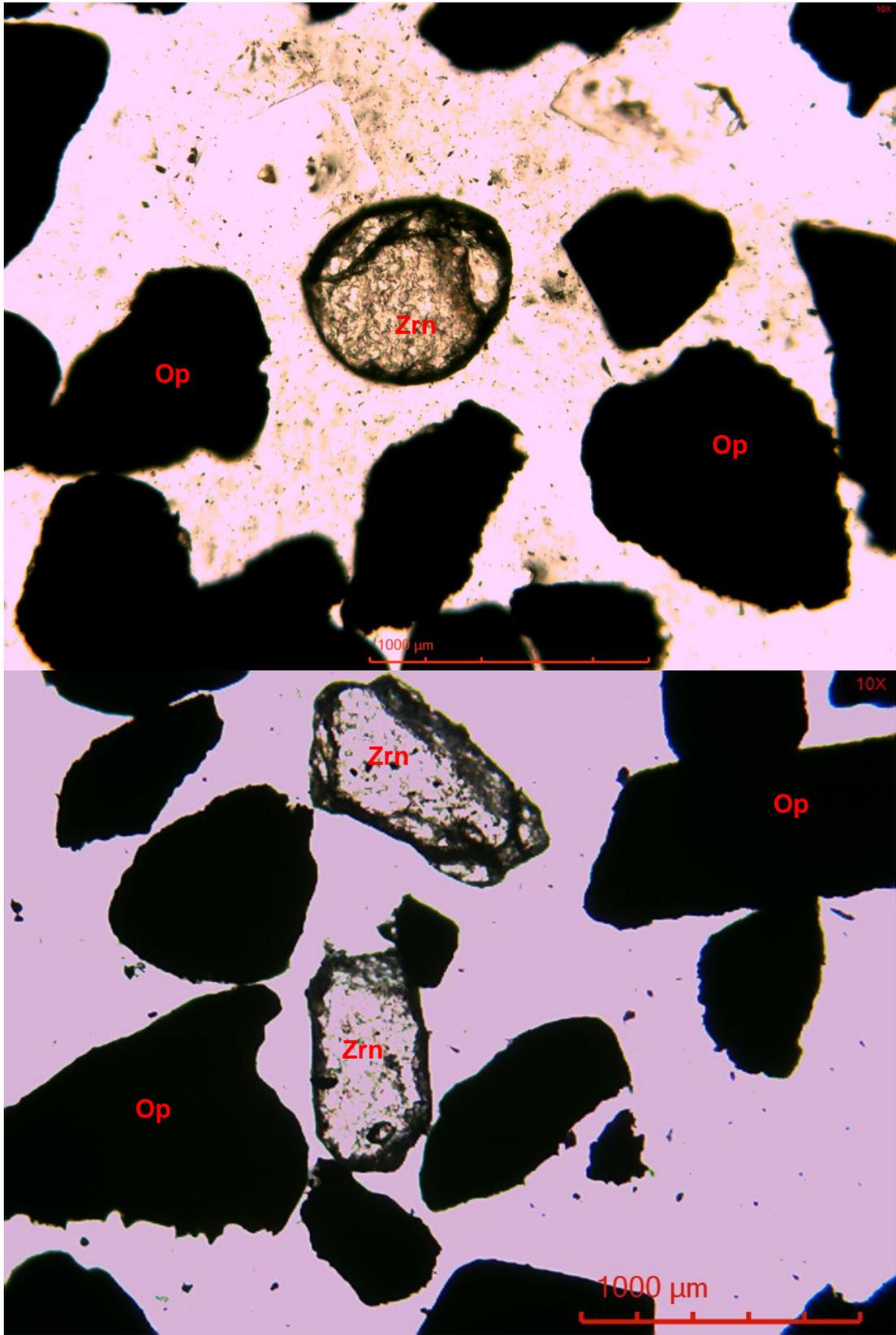


Figura 33. Fragmentos de Zircón.

6. Geoquímica

6.1 Metodología para el análisis geoquímico (sedimentos de playa)

En este capítulo se describirán los resultados obtenidos de estudios por Fluorescencia de Rayos X realizados en el laboratorio del Instituto de Geología de la UNAM. Se obtuvo el contenido de óxidos mayores y elementos traza de las muestras ANOR-HTZO, Ap-NEL, Ilm-NEL, ANOR-PHGO, VNT-01-02-02, VNT-01-02-03, VNT-02-02-02, VNT-02-02-03, VNT-03-01-01, VNT-04-01, de distintas localidades del estado de Oaxaca y la playa La Ventanilla.

La preparación de las muestras (con claves que inician en VNT) consistió en cuartear las muestras de arena recolectadas en campo hasta obtener 15g de cada una, posteriormente, se dejó secar las muestras alrededor de 6 horas a la luz del sol mientras que las muestras ANOR-HTZO, Ap-NEL, Ilm-NEL, ANOR-PHGO se fragmentaron para obtener alrededor de 15g de cada muestra. Una vez obtenido el peso adecuado de muestra se procede a la molienda de las muestras usando una SPEX SamplePrep modelo Mixer/Mill 8000M (figura 34). Luego de obtener los 15 gramos ya molidos de muestra se pasa a un proceso de secado en el horno a una temperatura de 110° C de 12 a 14 horas.

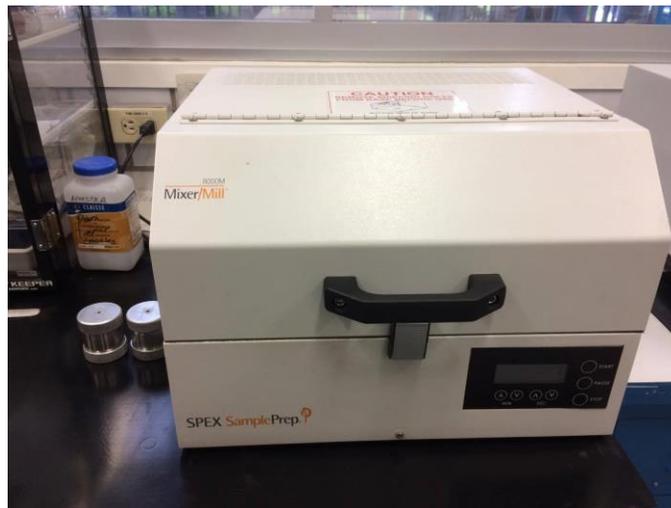


Figura 34. Máquina SPEX SamplePrep modelo Mixer/Mill 8000M.

Las muestras se prepararon en base seca y se fundieron con Borato-Tetraborato de Litio (8 g. de fundente y 0.4 g de muestra), esto para el caso de las muestras con pérdida por calcinación (P x C) positiva. La Pérdida por Calcinación (P x C) se determinó calcinando la muestra a 950°C durante 1 hora en una mufla adecuada.

En el caso del análisis de elementos traza, se prepararon tabletas con 5 g de muestra y 1.6 g de cera-C en micropolvo mezclándose en un mortero hasta llegar a la homogeneización. Una vez obtenida la muestra homogénea esta se pasa a la prensa GRASEBY SPECAC para obtener las tabletas aplicando 20 toneladas de carga durante 25 segundos y así obtener las pastillas que serán montadas en los porta muestras para su posterior análisis (figura 35).

El análisis geoquímico fue realizado en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X RIGAKU ZSX Primus II. El equipo fue calibrado con muestras Internacionales de Referencia Geoquímica, obteniéndose los resultados mostrados en las siguientes tablas.

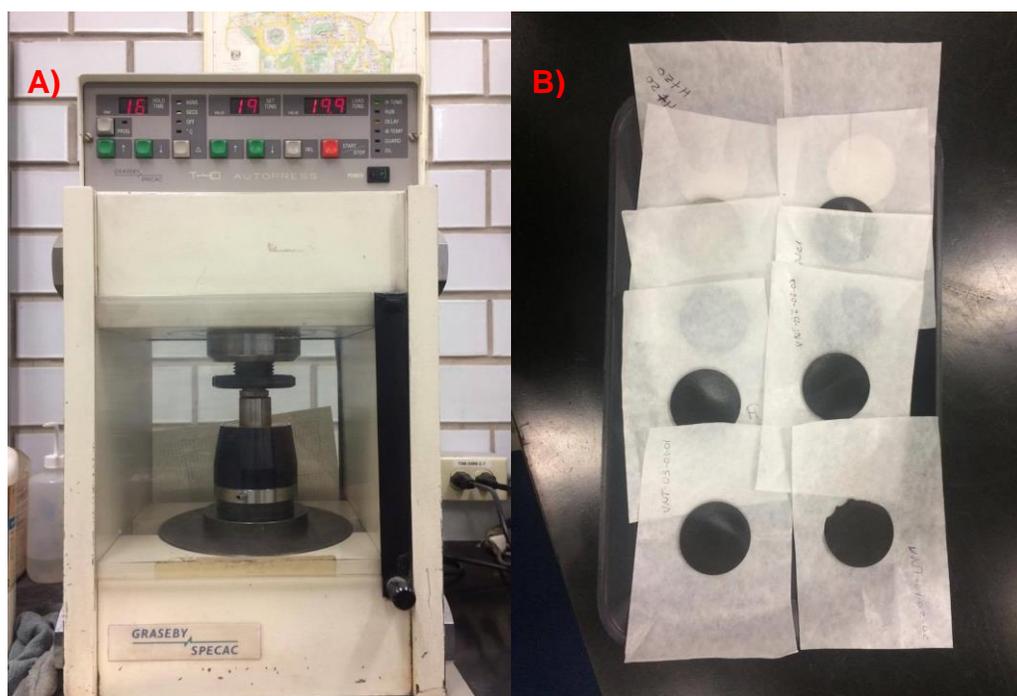


Figura 35. A) Prensa GRASEBY SPECAC. B) Tabletillas para análisis de elementos traza.

6.2 Resultados de los análisis geoquímicos

6.2.1 Geoquímica de elementos mayores

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de estudios de fluorescencia de rayos X de 10 muestras recolectadas en campo mediante la metodología previamente descrita. Seleccionados para determinar el contenido de TiO_2 , Fe_2O_3 y ZrO_2 , y así, realizar comparaciones de los porcentajes de estos óxidos en cada uno de los horizontes (claro y oscuro). Se anexan resultados de los mismos análisis realizados por Sarmiento Santiago (2011) que representan valores importantes de TiO_2 en la localidad de Pluma Hidalgo.

Clave de la muestra	Horizonte	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %	K_2O %	Na ₂ O %	MnO %	TiO_2 %	P_2O_5 %	SUMA %
VNT-01-02-02	Oscuro	5.17	1.56	53.41	1.20	0.85	0.07	0.33	1.34	35.98	0.12	100
VNT-01-02-03	Mixto	61.30	7.41	13.43	3.58	2.64	1.21	2.00	0.33	7.97	0.13	100
VNT-02-02-02	Claro	78.50	9.22	3.17	2.34	1.44	1.77	2.58	0.07	0.84	0.07	100
VNT-02-02-03	Oscuro	5.12	1.32	56.69	0.92	0.64	0.08	0.27	1.26	33.61	0.09	100
VNT-03-01-01	Oscuro	4.15	1.18	57.58	0.98	0.62	0.05	0.08	1.30	33.86	0.20	100
VNT-04-01	Oscuro	11.76	2.66	47.97	2.07	1.57	0.18	0.49	1.18	31.95	0.17	100
AP-NEL	N/A	1.34	0.77	29.22	21.84	1.24	0.01	0.05	0.22	26.19	19.11	100
ILM-NEL	N/A	1.16	0.74	28.76	21.29	1.24	0.01	0.06	0.22	27.45	19.07	100
PH1	N/A	11.60	2.18	1.39	1.69	0.66	0.17	0.98	0.004	79.706	0.01	100

Tabla 2. Concentraciones de elementos mayores dados en porcentaje en peso (%) de las muestras colectadas en distintas localidades del estado de Oaxaca. Los resultados de la muestra PH1 fueron tomados de (Sarmiento, 2011).

Sílice

El contenido de SiO_2 de las muestras recolectadas en la playa La Ventanilla (VNT-01-02-02, VNT-01-02-03, VNT-02-02-02, VNT-02-02-03, VNT-03-01-01, VNT-04-01) presentan valores que varían entre 4.15% y 5.17%. Los porcentajes de sílice menores al 6% corresponden a las arenas negras, las cuales presentan una cantidad de silicatos mucho menor. Las fases minerales presentes a las que se les atribuye el contenido de SiO_2 son: granate, cuarzo y feldespato. En comparación, los valores altos de SiO_2 (61.30% y 78.50%) se atribuye a que son horizontes claros ricos en cuarzo, feldespato y otros silicatos.

Las muestras AP-NEL e ILM-NEL corresponden a las nelsonitas recolectadas en la localidad de Huitzo. El contenido de sílice es muy bajo debido a que la roca se compone principalmente de apatito e ilmenita, sin embargo, es posible encontrar algo de piroxenos.

Aluminio

El contenido de Al_2O_3 varía de 1.18% a 9.22%, los valores menores al 7% corresponden a las arenas negras donde la fase mineral a la que se le atribuye el contenido de aluminio es principalmente el granate, sin embargo, minerales como feldespatos llegan a estar presentes en una cantidad menor al 1%. Los valores mayores al 7% son para los horizontes claros ricos en feldespatos, fase mineral a la que se atribuye principalmente el contenido aluminio.

Hierro

El contenido de Fe_2O_3 se presenta con valores entre 3.17% hasta 57.58% para las arenas negras. Los valores bajos de hierro se presentan en los horizontes claros los cuales llegan a tener minerales con hierro (magnetita e ilmenita) en un porcentaje menor al 8%. Valores altos de hierro corresponden a las arenas negras, donde los altos valores son atribuidos a la presencia de minerales como magnetita e ilmenita.

Calcio

Los valores de CaO que se presentan varían entre 0.92% hasta 2.07% para las arenas negras, mientras que para los horizontes claros no llegan a ser mayores al 3.58%. El contenido de calcio se atribuye a la presencia de la serie anortita (plagioclasa cálcica) que llegan a tener calcio dentro de su red cristalina.

Para las muestras de nelsonita (AP-NEL, ILM-NEL) existe un alto valor de CaO debido a que se encuentra dentro de la red cristalina del apatito. Los valores de calcio no varían demasiado para las dos muestras y son de 28.76% y 29.22% respectivamente.

Magnesio

El contenido de magnesio para todas las muestras es, en general bajo. Varía de 0.62% hasta un valor pico de 2.64% presente en un horizonte claro de las arenas de La Ventanilla. El magnesio se atribuye a la cantidad de minerales accesorio como los clinoanfíboles.

Potasio y Sodio

El valor de K_2O en general es bajo, para las muestras de La Ventanilla los valores varían de 0.05% para las arenas negras mientras que, en los horizontes claros se tiene valores de hasta 1.77% y que puede asociarse a la presencia de feldespato potásico. Los valores de Na_2O tienen un comportamiento similar, mostrándose un enriquecimiento en los horizontes claros.

Manganeso

El manganeso en las muestras de La Ventanilla es bajo, sin embargo, en los horizontes oscuros llega a un valor de 1.34%. En general para los horizontes claros, las anortositas y nelsonitas los valores de manganeso son bajos (de 0.01% a 0.22%).

Titanio

El elemento importante para los fines de esta tesis es el contenido de Ti. Los valores de TiO_2 que se presentan en las arenas negras varían de 31.95% hasta 35.98% para las zonas más enriquecidas, asociándose principalmente a la presencia de ilmenita y rutilo.

En los horizontes intercalados los valores no son altos llegando apenas al 7.97% debido a que la ilmenita y rutilo presentes se encuentra como si estuviera diseminado. Para los horizontes claros los valores de TiO_2 bajan ya que la Ilmenita está presente en porcentajes menores a 8%.

Valores importantes de TiO_2 también se presentan en la nelsonitas cuya composición es principalmente ilmenita + apatito. Para estas muestras de Huitzo (nelsonitas) los valores son de 26.19% y 27.45%. Por otro lado, los valores que reporta Sarmiento Santiago (2011) para las zonas más enriquecidas de rutilo en Pluma Hidalgo se tiene un valor de hasta 79% de TiO_2 .

Fósforo

Los valores de P_2O_5 para las muestras de La Ventanilla son bajos, variando de 0.07% a 0.20%. Sin embargo, en las muestras de nelsonita los valores de P_2O_5 son muy altos (19.11% y 19.07%) debido a que la composición de la roca es ilmenita + apatito. El apatito es el mineral principal al que se asocia dicho enriquecimiento.

6.2.2 Otros óxidos medidos

Óxido de Azufre

Los valores de trióxido de azufre varían de 0.013% para las arenas oscuras hasta 0.041% para las arenas de La Ventanilla. Este óxido también se presenta en las muestras de nelsonita del poblado de Huitzo donde los valores son de 0.016% y 0.025% (tabla 3).

Dióxido de Zirconio

Otro atractivo económico en las arenas negras de La Ventanilla son sus leyes de dióxido de zirconio. En las arenas negras se tienen valores que van de 0.9% hasta 1.22% de ZrO₂ para la muestra VNT-03-01-01.

Clave de la muestra	Horizonte	SO ₃ %	ZrO ₂ %
VNT-01-02-02	Oscuro	0.031	1.03
VNT-02-02-03	Mixto	0.03	-
VNT-03-01-01	Oscuro	0.013	1.22
VNT-04-01	Oscuro	0.041	0.918
AP-NEL	N/A	0.016	-
ILM-NEL	N/A	0.025	-

Tabla 3. Resultados de otros óxidos medidos.

6.2.3 Geoquímica de elementos traza

En la tabla 4 se muestran las concentraciones de elementos traza principales de las 10 muestras analizadas por fluorescencia de rayos X.

Muestra	Ni ppm	Cr ppm	V ppm	Sr ppm	Rb ppm	Ba ppm	Pb ppm	Zr ppm	Y ppm	Nb ppm	Th ppm	Cu ppm	Zn ppm	Co ppm
VNT-01-02-03	11	197	411	215	19	0	7	796	28	60	14	0	69	88
VNT-02-02-02	11	52	60	306	27	819	7	102	10	29	0	0	24	43
VNT-01-02-02	0	980	2026	15	0	0	7	4917	52	241	41	0	223	301
VNT-02-02-03	0	784	1974	14	0	0	5	5989	47	224	55	0	212	326
VNT-03-01-01	0	802	1981	12	0	0	9	5656	50	225	44	0	220	301
VNT-04-01	3	809	1801	39	0	0	7	4383	60	213	46	0	205	278

Tabla 4. Resultados de elementos traza para las muestras de La Ventanilla.

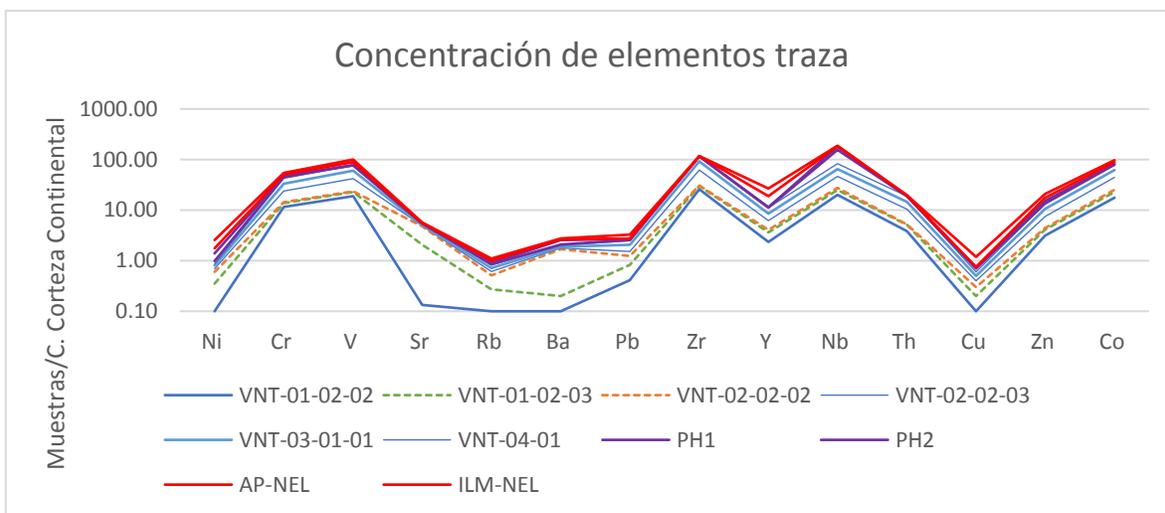


Figura 36. Diagrama normalizado de multielementos para las muestras de arena de la playa La Ventanilla contra el promedio de la Corteza Continental Superior (Taylor & McLennan, 1985-1995). Para las muestras PH1 y PH2 los valores fueron tomados de Sarmiento (2011).

En la figura 36 se observa las anomalías de concentraciones de distintos elementos para las arenas de la playa La Ventanilla normalizadas respecto a la composición promedio de la Corteza Continental Superior (Taylor & McLennan, 1985;1995). Las

líneas punteadas en color naranja y verde corresponden a los horizontes claros y las líneas continuas en azul a las arenas negras.

Las anomalías positivas más importantes en las arenas negras son para los elementos Cromo (Cr), Vanadio (V), Zirconio (Zr), Niobio (Nb) y Cobalto (Co). Se comprobaron fuertes enriquecimientos de estos elementos, siendo el valor pico para el Zircón (asociado a la presencia de la fase mineral zircón) dentro de la composición de las arenas negras.

Otras anomalías positivas no tan intensas, pero igualmente importantes son para elementos como el Itrio (Y) y el Zinc (Zn) mostrando enriquecimiento en estos elementos respecto a la composición de la Corteza Continental Superior. Las anomalías negativas se dan para elementos como el Estroncio (Sr) y Plomo (Pb) donde se observa un cambio brusco respecto al Vanadio y el Zirconio.

Para los horizontes claros (líneas punteadas) las anomalías son más variables debido a que en el espesor donde fue recolectada la muestra VNT-01-02-03 corresponde un horizonte claro que tiene intercalaciones con arenas negras de unos cuantos milímetros de espesor. Las anomalías para esta muestra muestran un comportamiento similar a las arenas negras, sin embargo, se coloca como un valor promedio entre los dos horizontes (claro y oscuro).

Para el horizonte claro (VNT-02-02-02) las únicas anomalías positivas son para elementos como el Sr, Nb y Co. Para el estroncio esta muestra junto con el horizonte intercalado, son las únicas que presentan un enriquecimiento. El Niobio está presente en todas las muestras, a pesar de esto, en el horizonte claro se muestra un menor enriquecimiento respecto a los demás, lo mismo pasa con el cobalto para el horizonte claro.

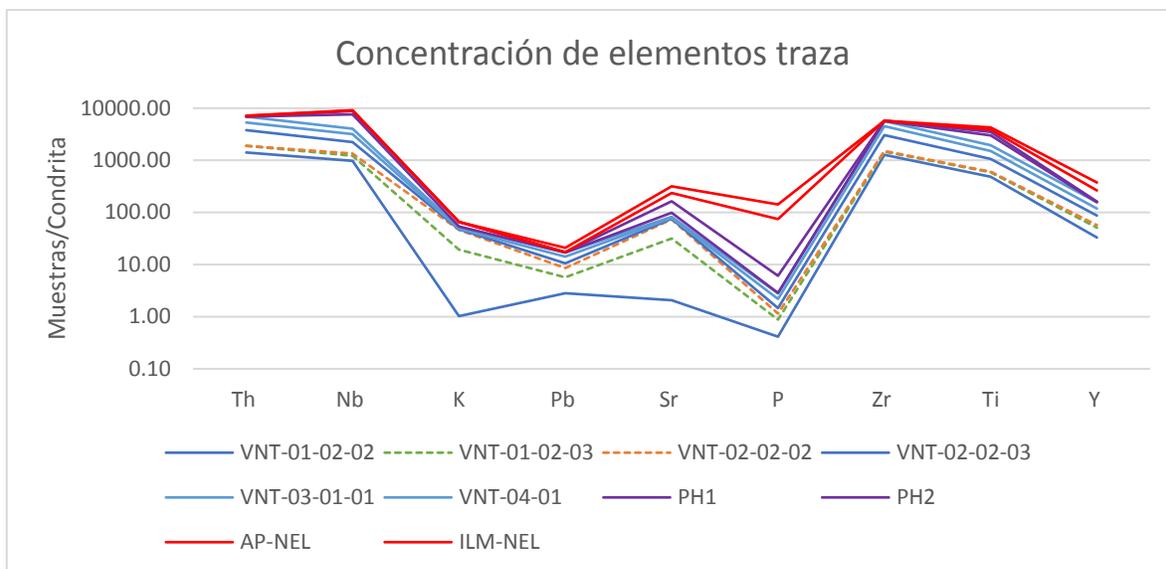


Figura 37. Diagrama normalizado de multielementos para las muestras de arena de la playa La Ventanilla contra el promedio de la composición de Condrita. Tomado de (Sun, & McDonough, 1989). Para las muestras PH1 y PH2 los valores fueron tomados de Sarmiento (2011).

En el diagrama de la figura 37 se indican las anomalías de concentraciones de elementos traza para las muestras de arena de La Ventanilla y la nelsonita de Huitzo respecto a la composición de la Condrita de Sun & McDonough, (1989). Sólo para la muestra VNT-02-02-02 no presenta registro para el Torio (Th). Para las arenas negras se puede observar que los valores máximos representan anomalías positivas principalmente para los elementos Th, Nb, Zr, Ti e Y, mostrando un enriquecimiento 100 veces mayor a la composición de la Condrita, dichas anomalías pueden asociarse a las fases minerales presentes Ilmenita y Zircón principalmente. En las nelsonitas el comportamiento es similar, pero en menor proporción para dichos elementos excepto para el Zirconio donde no muestra gran enriquecimiento, sin embargo, la nelsonita muestra un enriquecimiento en Fósforo en comparación con las arenas negras debido a la presencia de apatito como mineral esencial en la nelsonita. Elementos como el Plomo (Pb), Estroncio (Sn) no presentan un enriquecimiento considerable respecto a la condrita a diferencia de las nelsonitas donde el enriquecimiento de Estroncio (Sr) es mucho mayor respecto a las demás muestras.

Todas las muestras de arena negra y las de nelsonita muestran anomalías negativas en Potasio (K) debido a que la presencia de feldespatos potásicos se da en

un porcentaje menor al 3%. Además, para el Fósforo (P) las muestras de arena también presentan anomalías negativas a comparación de la nelsonita, esto puede deberse a que el apatito es más susceptible a la intemperización.

Para los horizontes claros se muestra un comportamiento similar en la distribución elemental de las arenas negras, pero en una menor proporción para los elementos como Torio (Th), Niobio (Nb), Zirconio (Zr), Titanio (Ti) e Itrio (Y), por lo que podría estar una fase mineral común en los dos horizontes (claro y oscuro). En los horizontes claros existe una anomalía positiva importante para el Estroncio que supera la relación 10:1 con respecto a la composición de la condrita, igualmente para el Potasio (K) se observa este comportamiento ya que el feldespatos potásico está presente como mineral esencial en los horizontes claros.

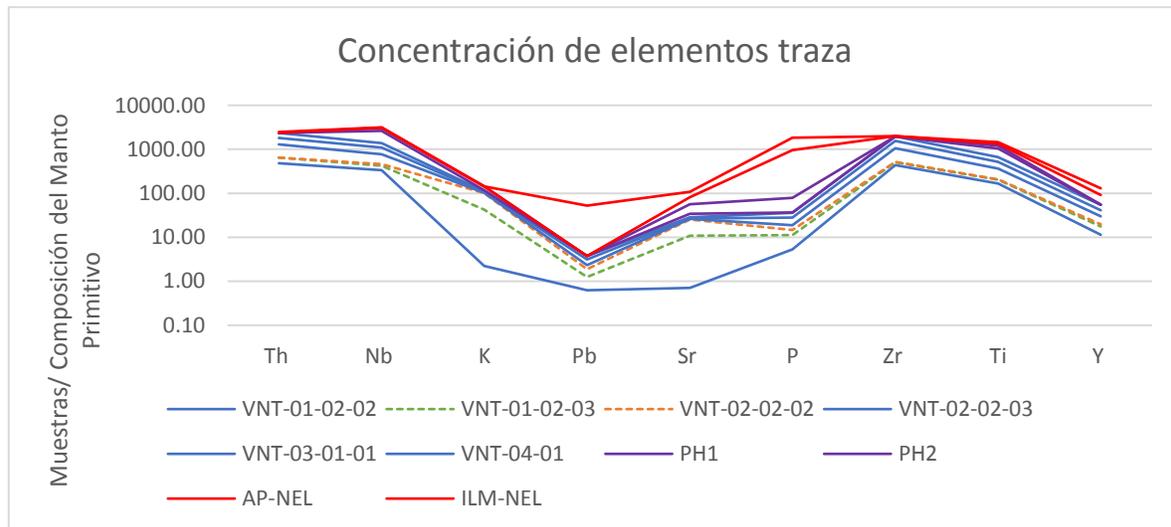


Figura 38. Diagrama normalizado de multielementos para las muestras de arena de la playa La Ventanilla contra el promedio de la Composición del Manto Primitivo (Sun, & McDonough 1989). Para las muestras PH1 y PH2 los valores fueron tomados de Sarmiento (2011).

En el diagrama normalizado de multielementos de la figura 38 se muestran las anomalías de concentración de elementos traza respecto a la Composición de Manto Primitivo de Sun & McDonough, (1989). El diagrama muestra incrementos y decrementos de los distintos elementos, los valores máximos son mayores a 100 veces en las muestras de arena negra con respecto a la composición de manto primitivo para los elementos como: Th, Nb, Zr y Ti. Dicho enriquecimiento se puede asociar a la presencia de Ilmenita y Zirconio en las arenas. Para las nelsonitas el

comportamiento en los elementos anteriormente mencionados es similar excepto para el Zirconio (Zr) donde las nelsonitas no muestran estos valores por encima de 100, sin embargo, como se observó en el diagrama anterior (figura 37) las nelsonitas presentan anomalías positivas para los elementos como: Plomo (Pb), Estroncio (Sr) y Fósforo (P), respecto a las arenas negras.

Para las arenas negras la gráfica muestra una fuerte pendiente negativa en los elementos Potasio (K), Plomo (Pb), Estroncio (Sr), conforme se avanza la línea en el gráfico a partir del elemento Fósforo (P) comienza a enriquecerse llegando al valor máximo de Zirconio.

7. Discusión

El yacimiento de placer de óxidos de Fe-Ti-Zr de la playa La Ventanilla ocurre debido a que se dieron las condiciones necesarias para que exista una distribución y acumulación de minerales pesados en la costa de Oaxaca.

Con base en el análisis de drenaje se puede observar que las distintas localidades visitadas (San Pablo Huitzo y Pluma Hidalgo) donde es posible encontrar yacimientos de óxidos de Fe-Ti asociados a los complejos anortosíticos reportados por Ortega (1978) pertenecen a la cuenca Río Atoyac y la subcuenca Río Tonameca. La cuenca Río Atoyac aporta sedimentos a las costas del estado de Oaxaca cerca de Puerto Escondido y otra parte de estos aportes dan más al SW en el estado de Guerrero. La subcuenca Río Tonameca donde se localiza el yacimiento más importante de titanio Pluma Hidalgo, aporta sedimentos a las costas por medio del río principal Río Tonameca el cual desemboca a unos 4 km al NW del área de estudio. Las condiciones anteriores son favorables para que los aportes detríticos de las distintas cuencas lleguen a las costas del estado de Oaxaca y Guerrero.

Los placeres se forman en los sectores donde los vientos dominantes son oblicuos a la costa y donde existen corrientes marinas paralelas a la costa. Estos factores promueven la deriva a lo largo de la costa (Maksaev, 2010) y las condiciones que presentan en la zona de estudio.

Según los estudios realizados por Ayala-Mata y Ayala-Ruiz (2015) la Contracorriente Marina Ecuatorial pasa por las costas de la parte sur de México iniciando su recorrido en el estado de Chiapas con un recorrido al NW pasando por las costas de Oaxaca y Guerrero para después cambiar de dirección hacia el oeste para así adentrarse al Océano Pacífico. Además, estos autores reportan 3 remolinos formados por los efectos de los llamados "nortes" los cuales giran en sentido de las manecillas de reloj, afectando principalmente a las costas de los estados de Guerrero y Oaxaca. Estos remolinos presentan un desplazamiento hacia el NW. En primera instancia, en el mes de diciembre un remolino se forma al sur de

Golfo de Tehuantepec, al sur de Acapulco se presenta otro en el mes de febrero y, por último, en el mes de mayo se presenta uno más distante al suroeste de Oaxaca.

Queda comprobado que los aportes de la cuenca Río Atoyac y la subcuenca Río Tonameca llegan a las costas de Guerrero y Oaxaca y, que la Contracorriente Marina Ecuatorial y los remolinos causados por los efectos de los llamados “nortes” pueden dar origen al yacimiento de placer de La Ventanilla, ya que dan las condiciones para que exista un aporte, distribución y acumulación de minerales pesados con alto peso específico en forma de placeres.

Por un lado, se tiene que las ilmenitas de San Pablo Huitzo presentan lamelas de exsolución de hematita en forma de gotas, las cuales se encuentran orientadas sobre un plano de crucero de la ilmenita. De acuerdo con Ramdohr (1980) el Fe_2O_3 y el FeTiO_3 son completamente miscibles a una temperatura de 600° . Cuando la temperatura disminuye el Fe_2O_3 se exsuelve en forma de lamelas dentro de la ilmenita (FeTiO_3) debido a una sobresaturación de Fe_2O_3 ya no es miscible a temperatura más baja. En el caso de algunas ilmenitas encontradas en las arenas negras de La Ventanilla, también se presentan estas texturas de exsolución como se puede ver en las figuras (22 y 30), lo cual indica una posible relación textural entre las ilmenitas de Huitzo y de La Ventanilla.

Otras relaciones texturales se pueden observar en las ilmenitas y los rutilos encontrados en la Mina Tizúr en Pluma Hidalgo (figura 25), los cuales presentan una característica macla polisintética. Ramdohr (1980) menciona que estas maclas surgen por una acción mecánica en los minerales. Esta acción mecánica dio origen a la textura y puede ser debido a la deformación que sufrió el Complejo Oaxaqueño (Ortega, 1981), además, Mcanulty et. al. (2009) menciona que el rutilo y la ilmenita se encuentran orientados con la foliación metamórfica que afecta a las metanortositas y metadioritas de esta localidad. Texturas donde la ilmenita y el rutilo presentan macla polisintética también pueden observarse en las arenas de la playa La Ventanilla como se puede observar en la figura 30 y 31, indicando una relación directa entre estos minerales.

No todas las ilmenitas presentes en las arenas negras tienen las características mencionadas anteriormente. Algunas se presentan sin maclas ni exsoluciones, por lo que la procedencia de estas ilmenitas no solo está controlada por los yacimientos de Huitzo y Pluma Hidalgo.

En la parte geoquímica, para los elementos mayores en las muestras recolectadas en La Ventanilla se puede observar distintos valores de contenido de Titanio atractivos para las arenas negras. El contenido de hierro llega a ser de hasta un 57.58% el cual se asocia a la presencia de magnetita e ilmenitas, así como las exsoluciones de hematita que llegan a estar presentes en las ilmenitas. Por otro lado, se tiene que la muestra VNT-03-01-01 presenta el valor más alto de hierro y también tiene el valor más alto para el TiO_2 el cual corresponde a 33.86%. Este valor se atribuye al gran contenido de ilmenita presente en las arenas negras (50% de ilmenita) aunque también se puede atribuir al rutilo, pero en menor proporción ya que la abundancia de este no supera el 3%. Otro atractivo económico de estas arenas son las leyes de zircón, las cuales están cerca del 1%, para la muestra más enriquecida en la VNT-03-01-01 con un valor de 1.22%. De este último mineral la importancia es que puede llegar a tener un alto contenido de tierras raras (Vassallo, 2008).

En cuanto a la distribución de elementos traza en la figura 36, se presentan distintas anomalías positivas importantes para elementos como Cr, V, Zr, Nb y Co, por lo cual, deben de proceder de una fuente enriquecida en estos elementos como Pluma Hidalgo y Huitzo.

Las muestras de arenas negras de La Ventanilla muestran patrones muy similares a los de sus posibles fuentes las Nelsonitas de Huitzo y el yacimiento de titanio de Pluma Hidalgo, como se puede observar en el diagrama multielementos de la figura 36. El enriquecimiento para los elementos Cr, V, Zr, Nb y Co puede ser debido a que éstos son más inmóviles con respecto a los demás, por lo que tienden a acumularse cuando existe una diferenciación de magmas (Vassallo, 2008). Por lo que se conoce de las posibles fuentes, el yacimiento de titanio en el poblado de Huitzo está relacionado con una diferenciación magmática (Solari et al, 2003).

Vassallo (2008), menciona que el Cr $3+$ es compatible con el Al, Mg y Fe por lo cual llega a formar uniones durante la diferenciación de magmas. El Cr también se presenta en óxidos de Ti, Mn, V, Ni, Co, Zn. El vanadio V $3+$ tiene un radio iónico parecido al del Fe $3+$ y Ti $4+$ por lo cual se concentra en minerales con alto contenido de Fe y Ti como en las ilmenitas, magnetitas y rutilos, así como a los granates (Vassallo, 2008).

Otra anomalía importante es la del Zr. Según los patrones utilizados, las fuentes se encuentran enriquecidas en este elemento, sin embargo, la aportación de cristales de zircón no sólo se da por parte de estas localidades, sino que pueden venir de muchas otras fuentes. Por lo que se recomienda fechar a los zircones para determinar sus edades y con ellos relacionarlos con distintas fuentes.

Cuando se observa el diagrama geoquímico multielemental normalizado respecto a la Condrita y el normalizado respecto a la Composición de Manto Primitivo (Sun & McDonough, 1989). Los patrones para las arenas negras y para las posibles fuentes son muy similares, variando considerablemente para el elemento P donde una anomalía negativa se presenta debido a que la fuente (Nelsonita de Huitzo) es rica en fósforo (el P entra dentro de la red cristalina del apatito) y como se sabe, el apatito representa en 39% de la composición de la roca en esta localidad.

Las anomalías positivas en este diagrama son para elementos como Th, Nb, Zr y Ti que, como se sabe son inmóviles (Pearce, 1982), dichas anomalías pueden relacionarse con lo mencionado anteriormente en cuanto a su origen. El enriquecimiento de Ti se debe a que las ilmenitas y rutilos son minerales presentes en gran abundancia en las rocas fuente y las arenas de la playa La Ventanilla.

8. Conclusiones y Recomendaciones

1. Con base en el análisis de drenaje realizado se puede comprobar que los yacimientos de óxidos de Fe-Ti se encuentran dentro de distintas cuencas y subcuencas las cuales aportan sedimentos del continente a las costas de Guerrero y Oaxaca.
2. Los placeres se forman en los sectores donde los vientos dominantes son oblicuos a la costa y existen corrientes marinas paralelas a la costa. Revisando trabajos realizados (Ayala Mata y Ayala Ruiz, 2015), se corrobora que existe una corriente marina llamada: Contracorriente Marina Ecuatorial. Ésta tiene un recorrido con una dirección de SE al NW por las costas pacificas de Chiapas, Guerrero y Oaxaca, además, la existencia de 3 remolinos originados por los llamados “nortes” que afectan en distintos meses del año a los estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Bajo estas condiciones es factible la distribución de minerales en las costas de estos estados.
3. Existen relaciones texturales en las ilmenitas y rutilos encontrados en las arenas negras de la playa La Ventanilla y sus fuentes (Nelsonita de Huitzo y el yacimiento de Ti de Pluma Hidalgo), donde lo más remarcable son las exsoluciones de hematita en ilmenita y las maclas polisintéticas presentes en las ilmenitas y rutilos. Sin embargo, no todas las ilmenitas presentan estas dos características por lo que no se descarta que otra parte de las ilmenitas provengan de fuentes distintas.
4. Los diagramas de multielementos realizados muestran que los patrones de las arenas de La Ventanilla son muy similares con los de sus probables fuentes, Nelsonita de Huitzo y el yacimiento de Ti de Pluma Hidalgo, presentando anomalías para los siguientes elementos: V, Cr, Zr, Co, Ti. Las anomalías más importantes son para el Ti ya que está presente dentro de la estructura cristalina de las ilmenitas y los rutilos. El V y Cr se asocia a los óxidos de Fe-Ti como magnetita e ilmenita presentes en las arenas negras, las nelsonitas de Huitzo y el yacimiento de Ti en Pluma Hidalgo. Otra

anomalía importante es la de Zr que se encuentra directamente asociada a la presencia de zircón en las arenas negras con una abundancia de hasta 3%.

5. Se reportan leyes interesantes que demuestran su importancia económica de este yacimiento de placer rico en titanio, hierro y zirconio asociado a las fases minerales: ilmenita, magnetita y zircón. Con un contenido de hasta 35.98% de TiO_2 , un 57.85% de Fe_2O_3 y hasta un 1.22% de ZrO_2 . Según datos de la Secretaría de Economía en esta área se estiman recursos por 9 millones de toneladas con una ley de 5.94% de Fe y 0.34% de Ti, además de la terraza en la que los contenidos son muy similares.
6. Según la Secretaría de Economía y un trabajo realizado por Sarmiento en 2011. Dado que los minerales de mena se encuentran en las arenas, este puede ser minado con draga simple y concentrado mediante métodos gravimétricos. Sin embargo, esto se complica debido a que el yacimiento forma parte de una reserva ecológica en la cual se preservan manglares, distintos tipos de aves, cocodrilos, cangrejos y es una zona de anidación de la tortuga.

9. Referencias

- Ashwal, L.D. (1993): Anorthosites, Berlin, Springer-Verlag, 422 pp.
- Ayala Mata R., Ayala Ruiz, R. I., 2015, La contracorriente marina ecuatorial, Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional, México, D. F. 12 p.
- Beasley, W. F., 1948, Heavy-mineral beach sands of southern Queensland; Part 1, The nature, distribution and extent, and manner of formation of the deposit: Proceedings of the Royal Society of Queensland, v. 59, p. 109-140.
- Campa, M.F., Coney, P., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in México: Canadian Journal Earth Science, 20, 1040-1051.
- Casas García, R., 2014, Caracterización petrológica de las nelsonitas precámbricas del Complejo Gneis Novillo, NE de México, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de maestría, 206 p.
- Charlier, B., Sakoma, E., Sauvé, M., Stanaway, K., Vander, J. & Duchesne, J.C. (2008): The Grader layered intrusion (Havre-Saint-Pierre Anorthosite, Quebec) and genesis of nelsonite and other Fe-Ti-P ores, Lithos 101, 359-378 pp.
- Collins, L. B., and Hamilton, N.T.M., 1986, Stratigraphic evolution and heavy mineral accumulation in the Minnipup shoreline, southwest Australia, in Australia; A world source of ilmenite, rutile, monazite, and zircon: Perth, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 17-22.
- Collins, L. B., Hochwimmer, B., and Baxter, J. L., 1986, Depositional facies and mineral deposits of the Yoganup shoreline, southern Perth basin, in Australia; A world source of ilmenite, rutile, monazite, and zircon: Perth, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 9-16.
- Corona-Chávez, P., Poli, S. y Bigioggero, B., 2006. Syn-deformational migmatites and magmatic arc metamorphism in the Xolapa Complex, southern Mexico, Journal of Metamorphic Geology, 24 (3), 169-191.
- Cserna, Zoltan, 1965, Reconocimiento geológico en la sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín62, 76p.
- Dickinson, W.R., Lawton, T.F., 2001. Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. Geol. Soc. Am. Bull. 113, 1142 – 1160.

- Dill, H.G. (2010): The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium, *Earth-Science Reviews* 100, 1-420 pp.
- Dymek, H.F. & Owens, B.E. (2001): Petrogenesis of apatite-rich rocks (nelsonites and oxide-apatite gabbro-norites) associated with massif anorthosites, *Economic Geology* 96, 797-815 pp.
- Fettes, D. & Desmons, J. (2007): *Metamorphic rocks, a classification and glossary of terms*, United Kingdom, Ed. Cambridge, 244 pp.
- Force, E. R., and Lynd, L. E., 1984, Titanium-mineral resources of the United States; Definitions and documentation: U.S. Geological Survey Bulletin 1558-B, 11 p.
- Force, E.R. (1991): The geology of titanium-mineral deposits: Geological Society of America Special Paper 259, 112 pp.
- Fries, Carl, Jr., Schmitter, Eduardo, Damon, P. E., y Livingston, D. E., 1962, Rocas precámbricas de edad grenvilliana de la parte central de Oaxaca en el sur de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Bol. 64, p. 45-53.
- Garnar, T.E. & Stanaway, K.J. (1994): Titanium Minerals, In: Carr, D.D. (ed.), *Industrial Minerals and Rocks*, 6th ed., 1,071-1,089 pp.
- Gutiérrez Aguilar, F., 2015, Estudio petrológico del complejo Xolapa, en la región de Santa María Ipalapa, Oaxaca, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 103p.
- Haggerty, S.E. (1976): Oxidation of opaque mineral oxides in basalts, In: *Oxide Minerals* (D. Rumble III, ed.), *Rev. Mineral.* 3, Hg1 – Hg100.
- Hall, A. (1996): *Igneous petrology*, Longman Group Limited, 2nd ed., 551 pp.
- Herz, N. (1969): The Roseland alkalic anorthosite massif, Virginia, In: ISACHSEN, Y.V. (ed.), *Origin of anorthosite and related rocks*, New York State Museum and Science Service Memoir 18, 357-367 pp.
- Hunt, T.S., 1983, in Logan W.E. Murray, A., Hunt, T.S., Billings, E. (eds) *Geology of Canada, report of progress from its commencement to 1983*. *Geol. Surv. Can. Reo. Prog.*, p22.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México) INEGI, 2010, *Perspectiva estadística: Oaxaca*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México: INEGI, p 115.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Cameron, K.L., Solari, L.A., Ortega-Gutiérrez, F., Lopez, R., 2003, *Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the*

- northern Oaxacan Complex, southern Mexico. Tectonic implication: *Precambrian Research*, 120, 365-389.
- Kolker, A. (1982): Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis: *Economic Geology*, v. 77, 1146-1158 pp.
 - Korneliussen, A. (2003): On ilmenite and rutile ore provinces in Norway, and the relationships between geological process and deposit type, In: Duchesne, J.C. & Korneliussen (eds.), *Ilmenite deposits and their geological environment*, Norges Geologiske Undersøkelse Special Publication No. 9, 40-41 pp.
 - Le Maitre, R.W. (1989): *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*, Blackwell, Oxford, 193 pp.
 - Le Maitre, R.W. (2002): *Igneous Rocks A Classification and Glossary of Terms*, 2nd Edition, Cambridge University, United Kingdom, pp. 20-29.
 - Lindsley, D.H. (2003): Do Fe-Ti oxide magmas exist? *Geology*: Yes; *Experiments*: No!, In: Duchesne, J.C. & Korneliussen (eds.), *Ilmenite deposits and their geological environment*, Norges Geologiske Undersøkelse Special Publication No. 9, 34-35 pp
 - Longhi, J., Auwera, J., Fram, M.S. & Duchesne, J.C. (1999): Some phase equilibrium constraints on the origin of Proterozoic (massif) anorthosites and related rocks, *Journal of Petrology*, 40, 339-362 pp.
 - Mcanulty, W.N., Jr., Dumouchel, J., fernandez, H., Y Ortega, F., 2009, Los depósitos de rutilo en anortosita alcalina, Distrito Pluma Hidalgo, Oaxaca in Kenneth F. Clark, Guillermo A. Salas Pizá, and Rodolfo Cubillas-Estrada (eds.), *Geología Económica de México*, 2 Ed: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Servicio Geológico Mexicano, p. 719-727
 - McKellar, J. B., 1975, The eastern Australia rutile province, in Knight, C. L., ed., *Economic geology of Australia and Papua New Guinea*: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 5, p. 1055-1061.
 - M. García-Talavera, A. García-Pérez, C. Rey, L. Ramos. Mapping radon-prone areas using gamma-radiation dose rate and geological information *J. Radiol. Prot. Off. J. Soc. Radiol. Prot.*, 33 (2013), pp. 605-
 - Melville, G., 1984, Headlands and offshore islands as dominant controlling factors during late Quaternary barrier formation in the Forster-Tuncurry area, New South Wales, Australia: *Sedimentary Geology*, v. 39, p. 243-271.

- Mirmohammadi, M., Kananian, A. & Tarkian, M. (2007): The nature and origin of Fe-Ti-P-rich rocks in the Qareaghaj mafic-ultramafic intrusion, NW Iran, *Mineralogy and Petrology* 91, 71-100 pp.
- Morales Zararías J., Velásquez Gonzáles P., 2009, Prueba de Separación Gravimétrica a cuatro muestras de arenas, procedentes de Puerto Escondido y frontera, enviadas por la Gerencia de Yacimientos Minerales del SGM. Servicio Geológico Mexicano, 8 p.
- Morisset, C.E., Scoates, J.S., Weis, D., Sauvé, M. & Stanaway, K.J. (2010): Rutile-bearing ilmenite deposits associated with the Proterozoic Saint-Urbain and Lac Allard anorthosite massifs, Grenville Province, Quebec, *The Canadian Mineralogist*, v. 48, 821-849 pp
- Ortega G. F., 1978: El Gneis Novillo y rocas metamórficas asociadas en los cañones del Novillo y Peregrina, área de Ciudad Victoria, Tamaulipas, *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, v. 2, 19-30 pp.
- Ortega G. F., 1981. Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, 20, 112-131.
- Owens, B.E. & Dymek, R.F. (1992): Fe-Ti-P-rich rocks and massif anorthosite: problems of interpretation illustrated from the Labrieville and St.-Urbain plutons, Quebec, *Can. Mineral* 30, 163-190 pp.
- Paulson, E.G. (1964): Mineralogy and origin of the titaniferous deposit at Pluma Hidalgo, Oaxaca, Mexico, *Economic Geology*, v. 59, 753-767 pp.
- Pearce, J.A. (1982): Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* (R.S. Thorpe, ed.). John Wiley & Sons, Chichester, U.K. (525-548).
- Philpotts, A.R. (1967): Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks: *Economic Geology*, v. 62, 303-315 pp.
- Ramdohr P., (1980) *The ore minerals and their intergrowths*, Pergamon Press, 1207p.
- Rittenhouse, G., 1943, Transportation and deposition of heavy minerals: *Geological Society of America Bulletin*, v. 54, p. 1725-1780.
- Santamaría D. A., Alaniz Á. S. A., Nieto S, A. F., 2008. Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapan, sur de México: *Revista Mexicana de ciencias Geológicas*, v. 25, 494- 516.

- Schaaf, P., Schulze-Schreiber, C.H., 1998, Pegmatites in the Oaxacan Complex, Southern Mexico, Isotopic dating and genetical aspects: Published as a supplement to Eos, Transactions, AGU, 79, (45).
- Secretaría de Economía, 2014, Prospectos Mineros con gran potencial, Servicio Geológico Mexicano.
- Slingerland, 1984, Role of hydraulic sorting in the origin of fluvial placers: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 54, p. 137-150.
- Solari, L.A, Lopez, R., Cameron, L.K., Ortega-Gutiérrez, F., Keppie, J.D., 1998, Reconnaissance U/Pb geochronology and common Pb isotopes from the northern portion of the 1 Ga Oaxacan Complex, Southern Mexico: Published as a supplement to EOS, Transactions, AGU, 79(45).
- Solari, L.A., Keppie, D.J., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K.L., Lopez, R., Hames, W.E., 2003, 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: roots of an orogen: *Tectonophysics*, 365, 257-282.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.
- Streckeisen, A. (1976): To each plutonic rock its proper name, *Earth Science Reviews*, 12, 1-33 pp.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Corona-Chavez, P., Gehrels, E., G., Villagrana-Sarmiento, A., García-Días, J., Salgado-Souto, S., A., 2013. Origin and provenance of basement metasedimentary rock from the Xolapa Complex: New constraints on the Chortis-southern Mexico connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370, 188-199.
- Taylor SR, McLennan SM (1985) The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philos Trans R Soc Lond A* 301:381–399
- Taylor SR, McLennan SM (1995) The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, Carlton, 312 p.
- Thompson, C. H., and Bowman, G. M., 1984, Subaerial denudation and weathering of vegetated coastal dunes in eastern Australia, in Thorn, B. G., ed., *Coastal geomorphology in Australia*: Sydney, Academic Press, p. 263-290.

- Tollari, N., Barnes, S.J., Cox, R.A. & Nabil, H. (2008): Trace element concentrations in apatites from the Sept-Îles Intrusive Suite, Canada – Implications for the genesis of nelsonites. *Chemical Geology* 252, 180-190 pp.
- Tolson T., 2005, La falla Chacalapa en el sur de Oaxaca, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Instituto de Geología, México. p 111-122.
- Vassallo L.F. 2008, Yacimientos Minerales Metálicos, México, Centro de Geociencias UNAM, 138 p.
- Villanova, C., Galí, S., Torró, L., Castillo, M., Campeny, M., olimpio, A. & Melgarejo, J.C. (2009): Depósitos de Titanio en Nelsonitas en el Complejo Anortosítico de Cunene (Angola). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 11, 201-202 pp.
- Watson, T.L. (1907): *Mineral Resources of Virginia*, J.P. Bell Company, Lynchburg.
- Watson, T.L. & Taber, S. (1913): *Geology of the titanium and apatite deposits of Virginia*: Virginia Geological Survey Bulletin 3A, 308 pp.

Artículos en línea:

- Makshev V, 2010, *Procesos Sedimentarios; Depositos Alóctonos*, Chile, Centro de Computo de la Universidad de Chile, disponible en <<http://www.cec.uchile.cl/~vmakshev/PLACERES.pdf>>, consultado 11 de julio de 2017.

A) Anexo: Descripciones de los afloramientos de arenas negras en la playa La Ventanilla, Oaxaca.

Para las arenas de la playa La Ventanilla se realizó una descripción de distintos perfiles de playa los cuales en algunas partes se encontraban ya expuestos por el efecto del llamado mar de fondo. Para el muestreo en la playa se optó por tres métodos de muestreo, los cuales son: A) Obtención de núcleos de 15-30 centímetros utilizando tubo de PVC de donde se recuperan distintos espesores. B) Se cavaron zanjas con distintas profundidades según lo permitiera la marea. C) Debido al mar de fondo que erosiono gran parte de la playa en el año 2016 es posible observar secciones naturales donde se exponen de 50 hasta 120 centímetros, donde se observan los distintos horizontes característicos de la zona.

Clave: VNT-01-01

Coordenadas:

14P (760039mE, 1733661mN), 12 msnm, Precisión: ± 3 m.

Descripción:

La sección representa 70 cm de la playa donde se pueden observar horizontes alternados de coloración oscura y clara (figura 38 A), siendo los horizontes oscuros los de mayor importancia debido a la concentración de metales que se tiene en ellos, donde se puede observar magnetita e ilmenita.

La sección se describe a continuación de la parte superior hasta la parte inferior de la misma:

Espesor (centímetros)	Contenido
9	Arenas negras.
3	Horizonte claro
6	Arenas negras.
12	Horizonte claro
10	Arenas negras.
7	Horizonte claro
18	Arenas negras.
2	Horizonte claro
13	Alternancia de Arenas negras y horizontes claros con espesores variables con 2-3 y 1 a >1 centímetros respectivamente.

Por debajo de la sección se tomó una muestra de núcleo VNT-01-01-03, donde se recuperó 15 cm de muestra. Los primeros 10 cm representan un horizonte oscuro, seguido de 5 cm de alternancias de Qtz-Fsp predominantemente con contenido menor al 15% de óxidos de Fe-Ti.



Figura 39. A) Sección VNT-01 B) Zanja donde se muestra la alternancia de horizontes claros y arenas negras.

Clave: VNT-01-02

Coordenadas:

14P (760037mE,1733652mN), 10 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

Se cavó una zanja de 60 cm donde se muestra una capa gruesa de arenas negras con un espesor de 34 cm de espesor (figura 38 B), seguido de un horizonte de unos 27 cm de espesor donde el contenido de Qz-Fsp predomina dando una coloración clara, además, se muestran ligeros horizontes de arenas negras de espesores variables (1 a >1 centímetro) que se encuentran alternando a los horizontes claros ricos en Qz-Fsp.

Por debajo de la zanja se tomó la muestra de núcleo VNT-01-02-03 donde se tuvo una recuperación de 20 cm. En general, la composición del material obtenido es una predominancia de Qtz-Fsp, se llega a observar horizontes de arenas negras con espesores variables que van de menos de 1 cm hasta los más gruesos que llegan a medir unos 2 cm.

Clave: VNT-01-03

Coordenadas:

14P (760029mE, 1733674mN), 6 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En la sección cavada (figura 39), los primeros 11 centímetros es de una alternancia de horizontes claros y oscuros con algunos milímetros de espesor, en seguida se observa un horizonte oscuro de arenas negras el cual tiene un espesor de 25 cm, por debajo de este se encuentra la base de color claro con un espesor de unos 4 cm.

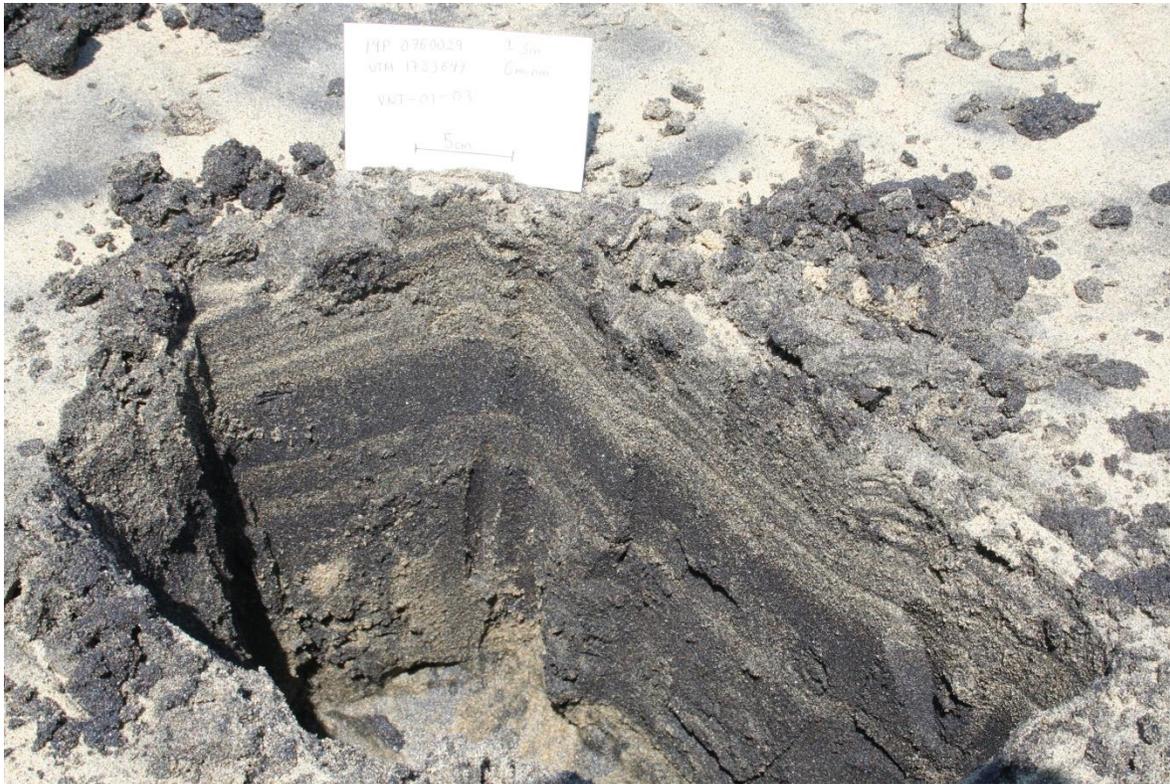


Figura 40. Zanja VNT-01-03

Clave: VNT-02-01

Coordenadas:

14P (759904mE, 1733765mN), 11 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En la sección (figura 40 A) se logra observar que en los primeros 13 cm hay una alternancia de horizontes claros y oscuros con espesores menores a 1 cm, por debajo un horizonte oscuro de 10 cm de espesor con contenido óxidos de Fe-Ti que cambia a un horizonte de 40 cm de espesor donde se alternan los horizontes claros y oscuros, destacando que las partes claras son de mayor predominancia.

Clave: VNT-02-02

Coordenadas:

14P (759883mE, 1733732mN), 10 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

La parte superficial de la sección se puede observar un horizonte de 14 cm de espesor de color oscuro con alto contenido de óxidos de Fe-Ti, seguido se ve un horizonte claro de composición Qtz - Fsp predominantemente con un espesor de 10 cm (figura 40; B). Por debajo comienza una alternancia de horizontes claros y oscuros donde predomina el contenido de óxidos de Fe-Ti, la alternancia se da en los siguientes 12 centímetros. Por último, se observa un horizonte de arenas negras con espesor de 10 centímetros.

Clave: VNT-02-03

28 de junio de 2017

Coordenadas:

14P (759872mE, 1733717mN), 13 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En la sección cavada se observa 3 horizontes, el más superficial es un horizonte de color oscuro rico en óxidos de Fe-Ti con un espesor de 20 cm, en la parte de en medio de la sección se observa un horizonte grueso rico en Qtz - Fsp con un espesor de 26 cm, por último, se observa un horizonte oscuro con un espesor de 15 cm.

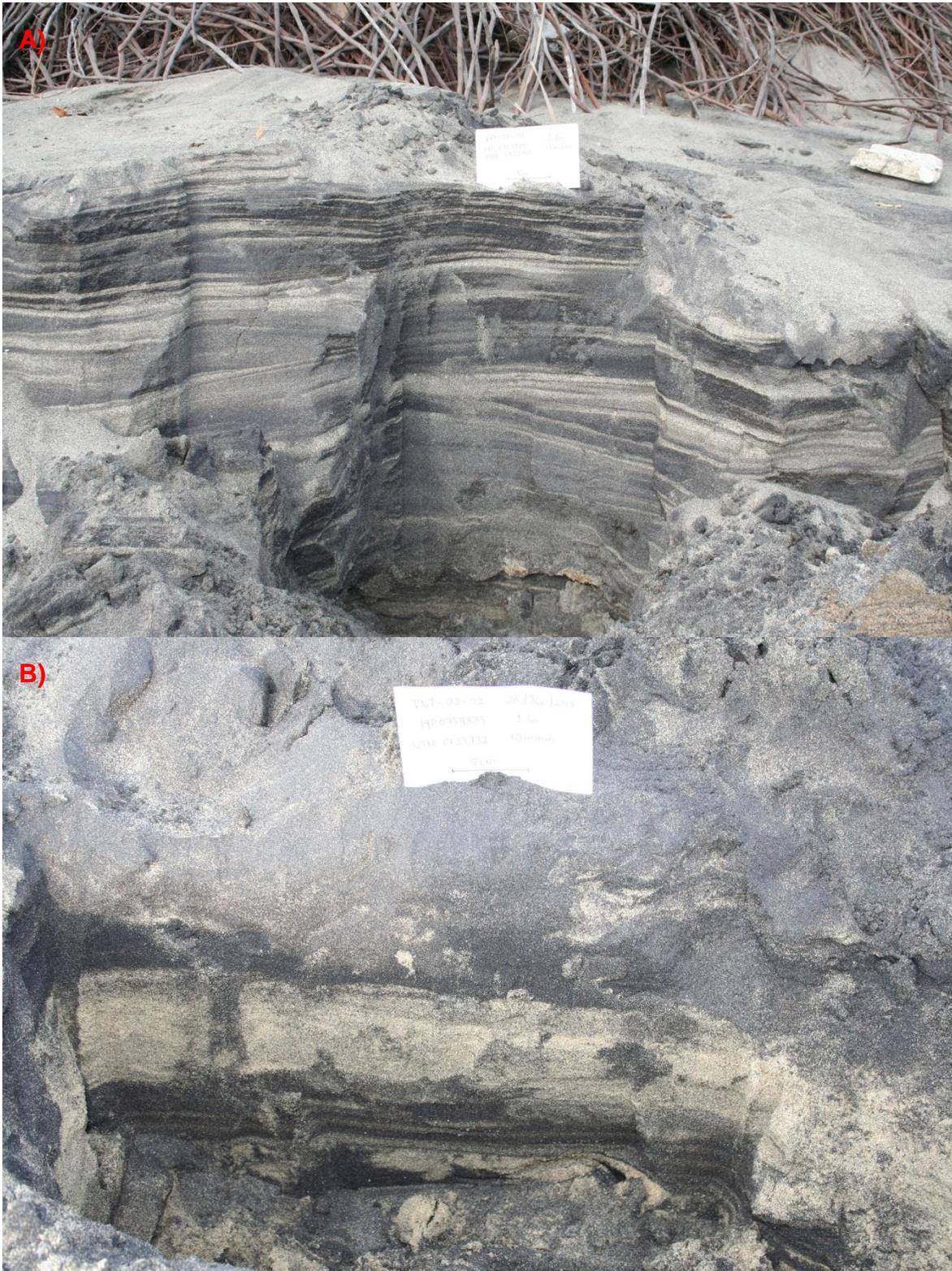


Figura 41. A) Sección VNT-02-01. B) Zanja VNT-02-02,

Clave: VNT-03-01

Coordenadas:

14P (759753mE, 1733822mN), 13 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En esta sección se puede apreciar gran parte de la composición de la terraza la cual supera el metro de espesor. En los primeros 30 cm de la sección se logra observar una alternancia de arenas negras y horizontes claros donde predominan las arenas negras, los horizontes claros no superan espesores de 1 cm. Seguido de esta alternancia hay un horizonte oscuro rico en óxidos de Fe-Ti con un espesor de 20 cm. Por debajo, se logra observar de nuevo una alternancia de arenas negras con horizontes claros donde predominan las arenas negras, esto se expone en un espesor de 22 cm. Seguido, un horizonte claro rico en Qtz-Fsp con un mineral rojo que corresponde a un Granate tiene un espesor de 18 cm. Por debajo se observa un horizonte oscuro de 15 cm de espesor. Por último, un horizonte grueso de 26 cm de espesor de arenas negras.



Figura 42. Sección VNT-03-01 donde se puede observar parte de la composición de la terraza.

Clave: VNT-04-01

Coordenadas:

14P (759467mE, 1733842mN), 9 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

El horizonte más superficial tiene 9 cm de espesor y es un horizonte oscuro rico en óxidos de Fe-Ti, después se encuentra un horizonte claro de 58 cm de espesor con pequeños lentes de arenas negras. Luego, un horizonte de arenas negras con 6 cm de espesor, seguido, en 18 cm una alternancia de arenas negras y horizontes claros (figura 42 A). En seguida se cavó una zanja (figura 42 B) donde se puede apreciar un horizonte de arenas negras con un espesor de 30 cm.



Figura 43. A) Sección VNT-04-01. B) Zanja VNT-04-01.

Clave: VNT-05-01

Coordenadas:

14P (759362mE, 1733862mN), 8 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En esta sección (figura 43 A) se logra observar un paquete claro rico en Qtz-Fsp, la concentración de óxidos de Fe-Ti se da en pequeños lentes de algunos milímetros de espesor, el horizonte tiene un espesor de 85 cm y la sección está en parte de la terraza exponiendo parte de ella. Una zanja cavada a un lado de la terraza (figura 43 B) indica que el horizonte claro con lentes de arenas negras continúa hasta unos



Figura 44. A) Sección VNT-05-01. B) Zanja VNT-05-01.

37 cm por debajo de la sección anteriormente medida.

Clave: VNT-06-01

Coordenadas:

14P (759029mE, 1734009mN), 7 msnm, precisión: ± 3 m.

Descripción:

En esta parte de la playa disminuye considerablemente el contenido de óxidos de Fe-Ti predominando los horizontes claros ricos en Qtz-Fsp (figura 44). Los lentes de arenas negras observados son de pocos milímetros de espesor, la sección mide 47 cm. En seguida se cava una zanja donde se puede observar que este horizonte claro con lentes de arenas negras continúa otros 27 cm.



Figura 45. A) Sección VNT-06-01 donde se puede observar que disminuye el contenido de óxidos de Fe-Ti. B) Zanja VNT-06-01 mostrando pequeños lentes de arenas negras.