

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“EVALUACIÓN DE LA OCURRENCIA DE ZONAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMIS
EN LA PENÍNSULA DE SANTA ELENA, A TRAVÉS DEL ESTUDIO DEL REGISTRO
DE PALEOTSUNAMIS, UBICACIÓN PILOTO COMUNA SAN PABLO”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOLOGÍA

Presentado por:

KERLY GABRIELA ZAMBRANO RUIZ

GUAYAQUIL - ECUADOR

2018

DEDICATORIA

A mis papás Nelson y Kerly, por su infinito amor, sacrificio y apoyo sin límites, a mi tierna hermana Yovana por su compañía, con ustedes todo. Los amo.

A mi familia, especialmente mis abuelitos por su amor y seguir junto a mi lado.

A las mejores amistades encontradas y por el fortalecimiento de otras, y demás personas que formaron parte de mi vida universitaria.

Sin ustedes, la vida no sería bonita.

Kerly Gabriela Zambrano Ruiz

AGRADECIMIENTO

A Dios por su infinito amor, a mi familia, y amigos, gracias por su compañía y apoyo incondicional.

A todos mis profesores, de manera especial al PhD. Carlos Martillo, por su disposición, dirección e invaluable conocimiento. Al PhD. Jean Noel Proust, PhD. Kervin Chunga, Ing. Galo Montenegro, Ing. Álvaro Mora e Ing. Rita Andrade por su valioso aporte para la culminación exitosa de este proyecto.

A MSc. Patricia Árreaga y PhD. Cristhian Naranjo del INOCAR por su buena predisposición.

A las instituciones de investigación IRD, CNRS, ISTERRE GEOAZUR, Geosciences (RENNES) por su valioso aporte.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

PhD. MAURIZIO MULAS
COORDINADOR DE LA CARRERA

PhD. CARLOS MARTILLO BUSTAMANTE
TUTOR DE MATERIA INTEGRADORA

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kerly Gabriela Zambrano*, y doy mi consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

.....
Kerly Gabriela Zambrano Ruiz

EVALUADORES

MSc. **Daniel Garcés**

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. **Carlos Martillo**

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El margen costero ecuatoriano, al estar sometido a procesos tectónicos por encontrarse en la zona de subducción entre la Placa de Nazca y la placa Sudamericana. Cuatro terremotos; 1901, 1933, 1953 y 1959 han generado tsunamis en la Costa Sur del Ecuador, aunque no todos presentan registros de altura, inundaciones y efectos. El presente estudio en base a criterios estratigráficos, macro y microfauna, análisis de la morfología costera y dataciones, se busca identificar depósitos de paleotsunamis en una excavación de 2m de profundidad en la comuna de San Pablo. Los resultados de las litofacies presentan dos capas distintivas de arenas gruesas, de color gris oscuras con bases erosivas, abundante microfauna, minerales pesados que permitieron evidenciar dos eventos de paleotsunami hace aproximadamente 3467-3297 cal BP y la de edad más antigua 3760 BP con una diferencia de 370 años. La reconstrucción de inundaciones tsunámicas nos encamina a conocer el riesgo que implica esta amenaza y poder validar las diferentes cartas o modelos de inundación generadas por instituciones públicas.

Palabras clave: paleotsunami, criterios estratigráficos, biomarcadores, datación, inundaciones.

ABSTRACT

The Ecuadorian coastal margin, when is being subjected to tectonic processes for being in the subduction zone between the Nazca plate and the South American plate. Four earthquakes; in 1901, 1933, 1953 and 1959 have generated tsunamis on the South Coast of Ecuador, although not all have records of height, floods and effects. The present study based on stratigraphic, macro and microfauna criteria, analysis of coastal morphology and dating, seeks to identify deposits of paleo-tsunamis in a 2 meters deep excavation in the San Pablo district. The results of the lithofacies present two distinctive layers of thick sands, of dark gray color with erosive bases, abundant microfauna, heavy minerals that allow to demonstrate two events of paleo-tsunami makes approximately 3467-3297 cal BP and the oldest age 3760 BP with a difference of 370 years. The reconstruction of tsunamic floods leads us to know the risk that this threat implies and to be able to validate the different flood charts or models generated by public institutions

Keywords: *paleotsunami, stratigraphic criteria, biomarkers, dating, floods.*

INDICE GENERAL

| | |
|---------------------------------------------------------|------|
| RESUMEN..... | I |
| <i>ABSTRACT</i> | II |
| ABREVIATURAS..... | V |
| SIMBOLOGÍA..... | VI |
| INDICE DE FIGURAS..... | VII |
| INDICE DE TABLAS..... | VIII |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1. INTRODUCCION..... | 2 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 3 |
| 1.2 Justificación del problema | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 4 |
| 1.4 Área de Estudio..... | 4 |
| CAPÍTULO 2..... | 6 |
| 2. Marco Geológico | 7 |
| 2.1 Geodinámica del margen ecuatoriano..... | 7 |
| 2.2 Marco Estratográfico | 9 |
| 2.3 Morfología Costera del Ecuador..... | 10 |
| CAPÍTULO 3..... | 12 |
| 3. Marco teórico..... | 13 |
| 3.1 Tsunamis | 13 |
| 3.2 Registro de paleotsunamis y método de estudio | 14 |
| 3.3 Registros de tsunami en el Ecuador..... | 18 |
| CAPÍTULO 4..... | 21 |

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| 4. METODOLOGÍA..... | 22 |
| 4.1 Recopilación bibliográfica..... | 24 |
| 4.2 Recolección de Datos | 24 |
| 4.3 Procesamiento de datos..... | 25 |
| 4.3.1 Descripción..... | 25 |
| 4.3.2 Levantamiento topográfico..... | 25 |
| 4.3.3 Análisis de microfauna..... | 25 |
| 4.3.4 Análisis de microorganismos fósiles | 26 |
| 4.3.5 Datación | 26 |
| 4.4 Interpretación y análisis de resultados. | 26 |
| CAPÍTULO 5..... | 27 |
| 5. RESULTADOS | 28 |
| 5.1 Morfología costera | 28 |
| 5.2 Estratigrafía del depósito..... | 30 |
| 5.3 Análisis de Moluscos..... | 33 |
| 5.4 Análisis de microorganismo fósiles..... | 35 |
| 5.5 Datación..... | 35 |
| Capitulo 6 | 37 |
| 6. Discusión..... | 38 |
| 6.1 Registro de tsunamis..... | 38 |
| 6.2 Zona de inundación..... | 40 |
| CAPÍTULO 7..... | 41 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 42 |
| 7.1 Conclusiones..... | 42 |
| 7.2 Recomendaciones | 42 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 44 |
| ANEXOS..... | 48 |

ABREVIATURAS

| | |
|--------|----------------------------------------------------|
| CEREIS | Centro Regional de Sismología para América del Sur |
| INOCAR | Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador |
| NEIC | National Earthquake Information Center |
| NO | Noroeste |
| SE | Sureste |

SIMBOLOGÍA

| | |
|----|------------------|
| BP | Before Present |
| km | Kilómetro |
| m | Metro |
| Ma | Millones de años |
| u | Unidades |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio- afloramiento en la comuna de San Pablo. .5 | |
| Figura 2.1 Marco Geodinámico y Batimétrico Regional. (A) Vectores de convergencia entre la placa Sudamericana y el Bloque Nor Andino. (B) Batimetría cada 200 m y topografía de la zona de subducción ecuatoriana (Collot et al., 2009).....8 | |
| Figura 2.2 Mapa Geológico de zona de objeto de estudio (símbolo estrella en negro). [Modificado de:(Reyes & Michaud, 2012)].....9 | |
| Figura 2.3 Morfología costera de la Bahía de Salinas. [Modificado de: (Boothroyd et., al 1994)]..... 11 | |
| Figura 3.1. Esquema de los procesos de deposición de sedimentos de tsunami (Einsele et al., 1996). 14 | |
| Figura 4.1 Esquema e la metodología utilizada en el proyecto23 | |
| Figura 4.2 Recolección de muestras en sitio de estudio, ubicado en San Pablo.24 | |
| Figura 5.1 Ortofoto de la zona costera, ubicado en la comuna de San Pablo.....28 | |
| Figura 5.2 Perfil A-B perpendicular a la línea de costa.28 | |
| Figura 5.3 Mapa de la morfología costera de la Comuna de San Pablo con las respectivas zonificaciones.....29 | |
| Figura 5.4. Columna estratigráfica del depósito, con las descripciones de cada litofacie.31 | |
| Figura 5.5 Galería de los moluscos empleando en la datación.....36 | |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 Criterios que evidencian un depósito de tsunami..... | 17 |
| Tabla 5.1 Número de especies encontradas en las muestras recolectadas en campo. NI: No identificados. | 34 |
| Tabla 5.2. Foraminíferos analizados con su respectivo paleoambiente..... | 35 |
| Tabla 5.3 Resultados de la data de radiocarbono para San Pablo. | 36 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCION

Los tsunamis consisten en olas inducidas sísmicamente, en otros casos son generados por deslizamientos de tierra submarinos, actividad volcánica. El Ecuador al encontrarse entre la subducción de la placa oceánica de Nazca y la placa continental de Sudamericana se han manifestados grandes terremotos con periodos de retorno de 100 a 250 años.

Grandes terremotos y tsunamis han ocurrieron en 1906, 1942, 1958, 1979 (Costa Norte de Ecuador) y 1901, 1933, 1953 y 1959 (Costa Sur de Ecuador)¹. Los mismos que han desencadenado tsunamis originando inundaciones que han alcanzado alturas del orden de 2 a 2.5 m en la costa de Santa Elena (Arreaga & Ortiz, 2002; Espinoza, 1992), lo cual produce un riesgo latente para las comunidades que se desarrollan en el borde costero.

La identificación de depósitos de plaeotsunamis preservados en el registro geológico permiten evaluar el peligro que representa esta amenaza y en otros casos, esta evidencia puede ser indicativo del riesgo por tsunami la cual puede está sujeta una región. Al comprender un depósito de tsunami es posible conocer áreas que fueron afectadas por inundaciones en los márgenes costeros y poder definir límites de inundaciones, en caso de que se conservan más de un evento en una secuencia estratigráfica se puede determinar la ciclicidad y frecuencia de la ocurrencia de tsunami; principalmente, como indicadores de riesgos y gestores de planificación territorial. La determinación de un depósito de plaeotsunami involucra la identificación de evidencias sedimentarias, micropaleontológicas, morfológicas, estratigráficas, entre otros.

¹ Catálogo NEIC, CERESIS.

1.1 Descripción del problema

En el margen ecuatoriano se han realizado pocas publicaciones notables, en la identificación de registros de depósitos de paleo tsunami (Chunga & Quiñonez, 2013; Chunga et al., 2016) que permitan mejorar o ampliar el conocimiento sobre el impacto de esta amenaza natural y, sobre todo, validar modelos o cartas de inundación, los mismos que han y son realizados por instituciones públicas como el INOCAR.

En este proyecto se determinará en base a evidencia geológica y biomarcadores la ocurrencia de paleotsunamis en la población de San Pablo, lo cual es esencial conocer la frecuencia de tsunamis para evaluar la seguridad de las poblaciones que residen en zonas costeras.

1.2 Justificación del problema

Grandes terremotos han causado tsunamis, los mismos que no han sido documentados en la historia y debido a la falta de evidencia en el registro sedimentario ha provocado que instituciones generen mapas o cartas de zonas potencialmente inundables sin una debida validación, lo cual no ocurre en otras áreas tsunamigénicas del planeta como Chile, Asia y Oceanía donde se han empleado firmas sedimentarias u otros criterios de depósitos de tsunamis modernos e históricos para la reconstrucción de inundaciones por esta amenaza.

Conocer la ocurrencia de paleostunamis que han afectado las costas es gestión vital para aumentar la resiliencia de las personas que residen, así como también infraestructuras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

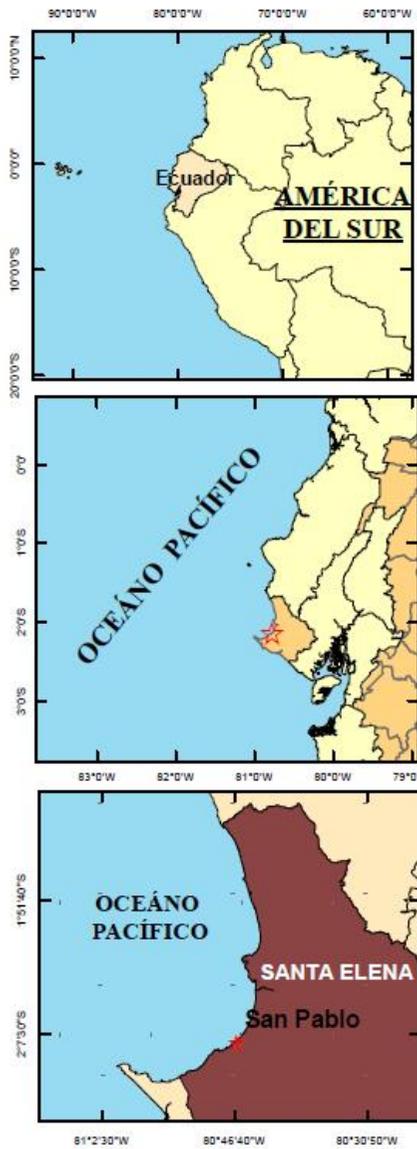
Evaluar, a través de criterios geológicos, posibles registros de eventos de paleotsunami, que permitan mejorar el conocimiento de esta amenaza, en la Península de Santa Elena mediante el empleo de bases geológicas.

1.3.2 Objetivos específicos

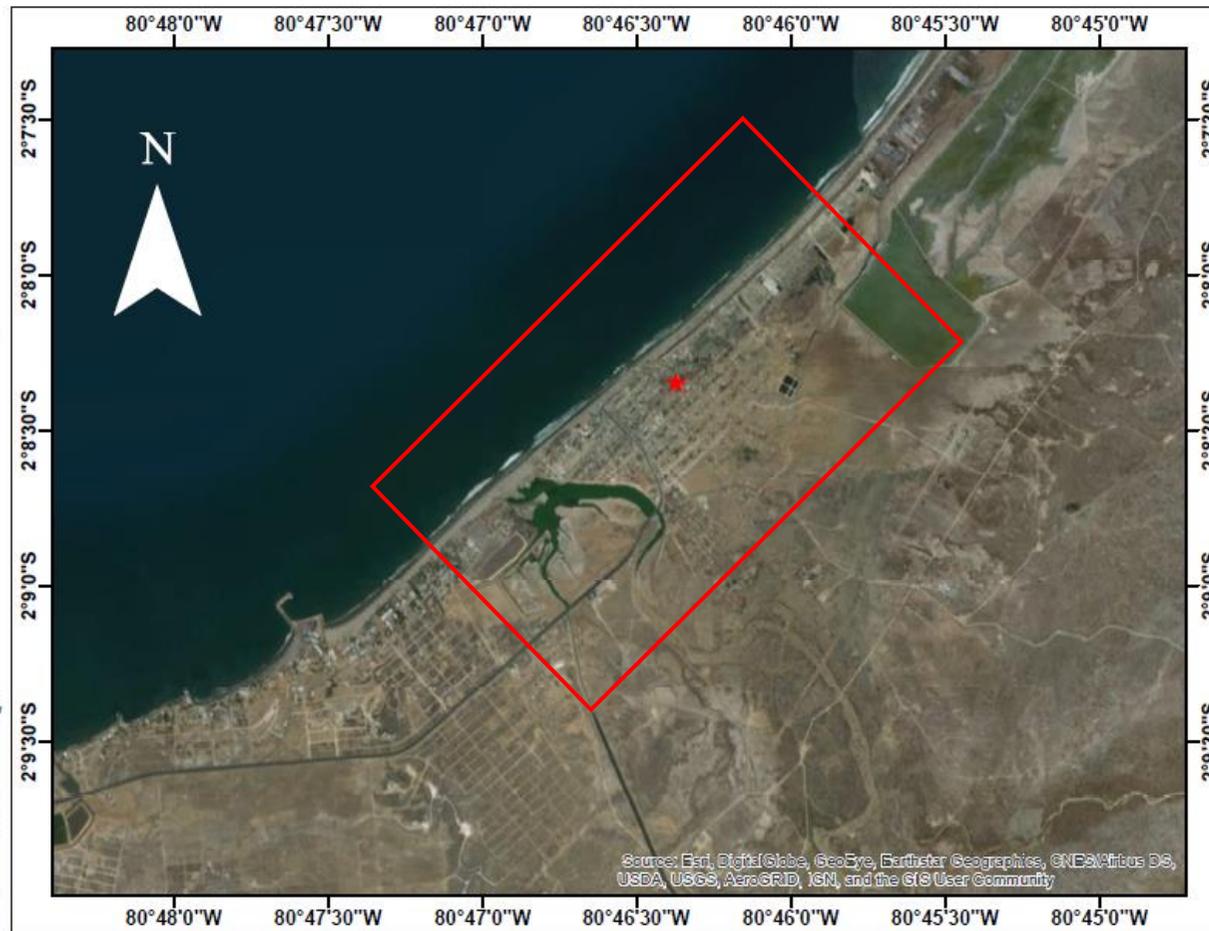
- a) Determinar facies sedimentarias y ambiente deposicional de niveles estratigráficos que presenten posibles registros de paleotsunamis.
- b) Contrastar los resultados de evidencia de modelos o mapas de inundaciones de tsunamis con resultados obtenidos en el presente trabajo.

1.4 Área de Estudio

La zona de estudio donde se encuentra el depósito está ubicada entre las latitudes $2^{\circ}8'5''$ S y $2^{\circ}8'20''$ S y las longitudes $80^{\circ}46'25''$ W y $80^{\circ}46'20''$ W, en la comuna de San Pablo a 16 km de la cabecera cantonal de Santa Elena (Figura 1.1).



MAPA DE UBICACIÓN DEL AFLORAMIENTO EN LA COMUNA DE SAN PABLO



Simbología

- ★ Zona de Estudio
- Área de estudio

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio- depósito en la comuna de San Pablo.

CAPÍTULO 2

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geodinámica del margen ecuatoriano

La tectónica del margen activo ecuatoriano es desarrollado por la subducción la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental Sudamericana, a una velocidad de 4,7 cm/año, y de manera oblicua a N 83°E (Nocquet, et al., 2016). El antearco ecuatoriano se levanta sobre un basamento máfico (Formación Piñón y Cayo) (Luzieux et al., 2006).

Un rasgo predominante de la placa de Nazca es la Cordillera de Carnegie de 200 km de ancho y elevación de 2000 m (Lonsdale, 1978; Gutscher et al., 1999) (Santana et al., 2003), que nace desde las Islas Galápagos hasta la fosa de subducción Sudamericana (Michaud, Pazmiño, & Collot, 2009). Este impacto de la Cordillera de Carnegie trae consigo irregularidades morfológicas como montes submarinos de diámetros kilométricos. Toda esta actividad es evidenciada a través de levantamientos marinos y sismicidad de interplaca (Graindorge et al., 2004; Pedoja et al., 2006).

La morfología del margen de Ecuador, así como en su segmentación está dividido en tres segmentos de primer orden, el segmento Norte comprendido desde el cañón de Esmeraldas hasta el cañón Patia, el segmento Central se extiende desde Punta Salinas hasta el cañón Esmeraldas y caracteriza la mayor parte del margen; y el tercer segmento, desde el cañón de Santa Elena y finaliza en extremo sur del Banco de Perú. (Collot, et al., 2006) (Ver Figura 2.1).

La zona de estudio se encuentra en el Segmento Central, el cual es de carácter erosional en comparación con los segmentos Norte y Sur que son de acreción activa; además el carácter morfológico muy rugoso (Sage et al., 2006) e inestable con un talud empinado, intenso deslizamiento de masas y pequeño prisma de acreción. (Collot, et al., 2006)

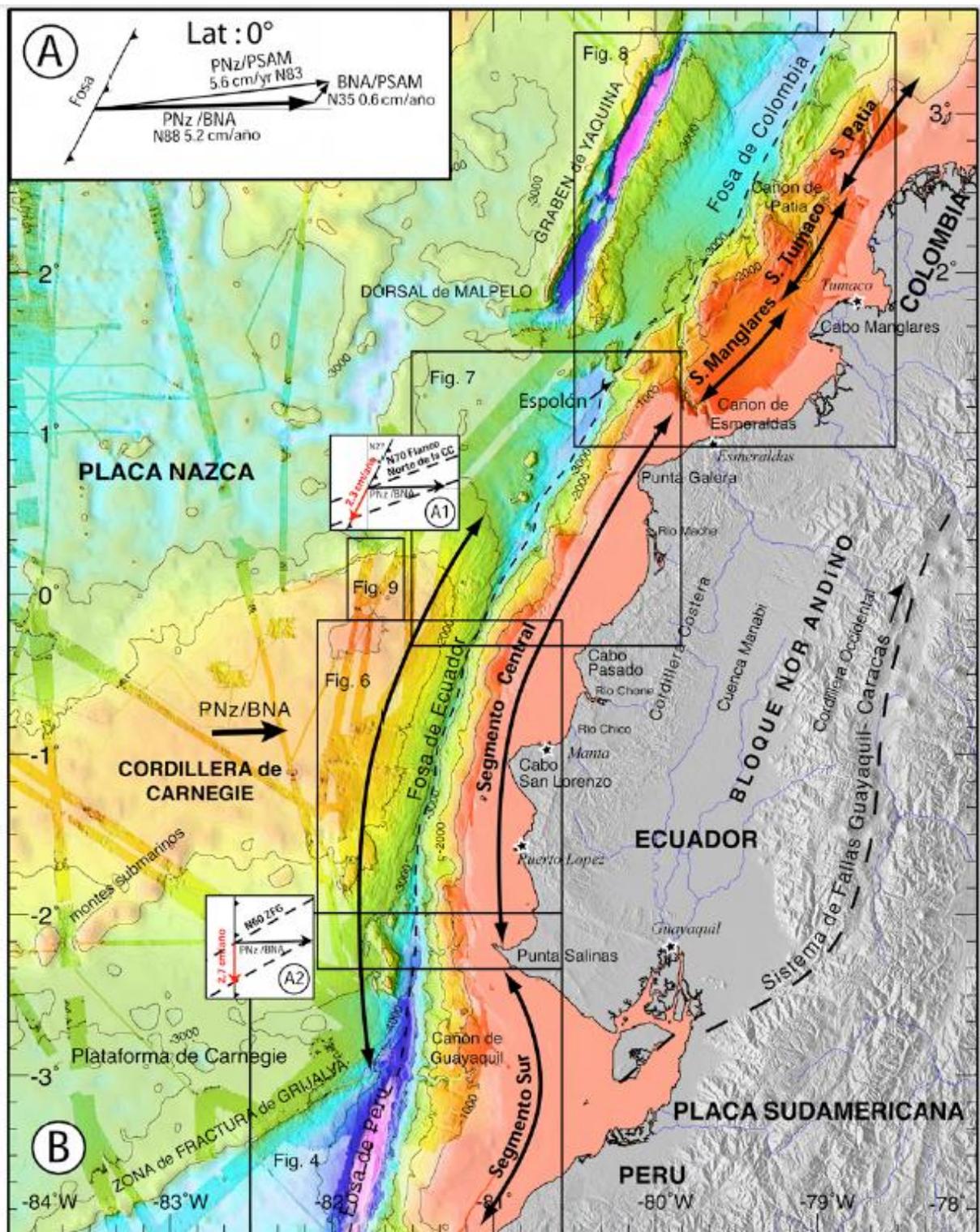


Figura 2.1 Marco Geodinámico y Batimétrico Regional. (A) Vectores de convergencia entre la placa Sudamericana y el Bloque Nor Andino. (B) Batimetría cada 200 m y topografía de la zona de subducción ecuatoriana (Collot et al., 2009).

2.2 Marco Estratigráfico

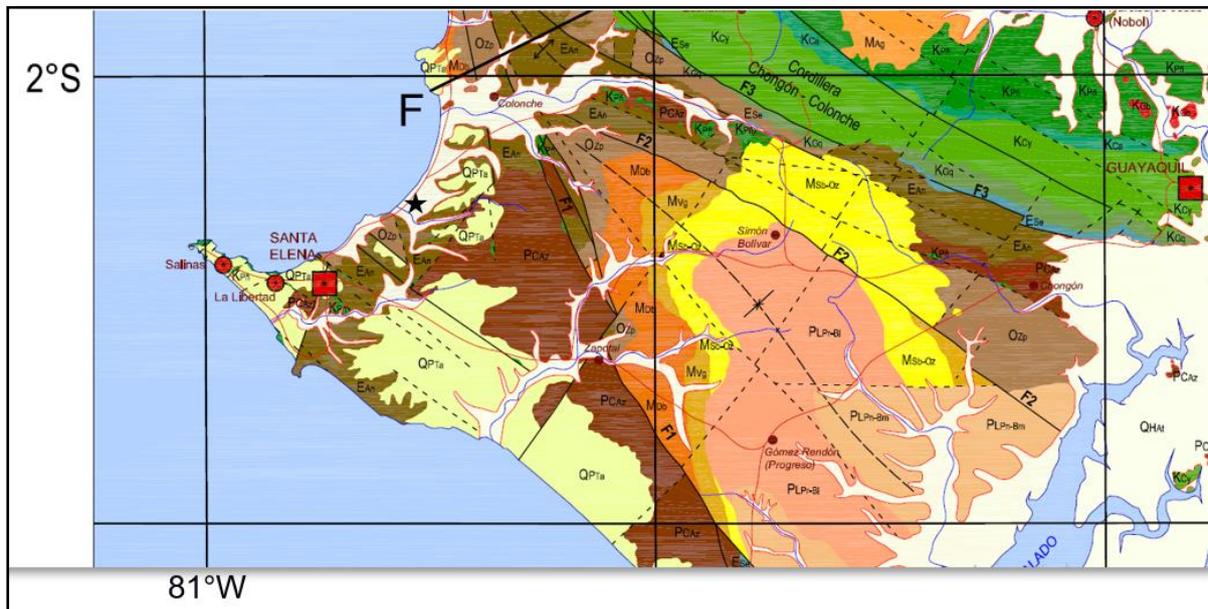


Figura 2.2 Mapa Geológico de zona de objeto de estudio (símbolo estrella en negro).

[Modificado de:(Reyes & Michaud, 2012)]

La Costa occidental presenta tres cuencas de antearco (Progreso, Manabí, y Borbón)(Feininger & Bristow, 1980), de las cuales la Cuenca Progreso con un registro estratigráfico que evidencia el producto complejo de eventos tectónicos desde acreciones a colisiones de terrenos alóctonos, sistema fosa y arco con subducción.

Del Paleoceno a Eoceno Inferior, El Grupo Azúcar (P_{CAZ}) compuesto por areniscas grises cuarzosas y conglomerados que contiene alto porcentaje de clastos de origen metamórfico. El grupo Ancón (E_{AN}) del Eoceno compuesta de conglomerados, areniscas, limolitas. En la cima de la Cordillera Chongón Colonche aflora el miembro Zapotal (OZ_p) caracterizado por areniscas y limolitas. Abundantes afloramientos en la Península de Santa Elena de la formación Miocénica Dos Bocas (M_{DB}) incluyen lutitas y lodolitas de color chocolate. Depósitos cuaternarios están caracterizados por sedimentos de abanicos aluviales QP_{AB} , terrazas marinas y fluviales levantadas a lo largo de

la Cordillera Costera QP_{TA} , que a su vez incluyen las terrazas marinas de la Formación Tablazo QP_{Tb} (Benitez, 1995; Reyes & Michaud, 2012) (ver Figura 2.2).

2.3 Morfología Costera del Ecuador

La costa del Ecuador continental es muy irregular, presenta salientes predominantes como son: Punta Galera, Península de Manta y la Península de Santa Elena, así como entradas importantes como son: el Golfo de Guayaquil, la bahía de Salinas, y la bahía de Cojimíes. La morfología costera está relacionada con los procesos tectónicos de levantamiento y subsidencia que se presentan en el margen continental (Martillo, 2016; Proust et al., 2016).

La morfología costera de la Bahía de Salinas, limitada por el Cabo de Ayangue y al sureste por la Península de Santa Elena es muy irregular y está marcada por bahías asimétricas cóncavas y al este, pequeñas bahías simétricas (Santana et al., 2003). En cuanto a la morfología costera correspondiente a San Pablo se caracteriza por un sistema de barrera/planicie litoral, en dirección suroeste acantilados bajos y altos, y múltiples barreras levantadas², de norte a sur. Una barrera de 5 km se une con una barrera levantada (8 km) para terminar una pequeña flecha al sur de la comuna. Una deriva litoral se manifiesta variable. (Boothroyd et., al 1994) (ver Figura 2.3)

² Llanura amplia y baja, elevado pocos metros sin acantilado visible.

CAPÍTULO 3

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Tsunamis

Los tsunamis son olas inducidas sísmicamente, o por deslizamientos de tierra submarinos, erupciones volcánicas. La palabra *tsunami* que se deriva del término japonés que significa ola portuaria. Las ondas individuales inundan la tierra durante unos segundos o minutos y se asocian con altos niveles de energía tanto en el proceso de recuperación como en el contralavado (backwash) (Goff, McFadgen, & Chagué-Goff, 2004).

Los depósitos de tsunami generados por eventos pasados provocan el transporte de sedimentos hacia el continente acumulándose en delgadas capas extensas de arena marina (Atwater, 1986; Dawson et al., 1988; Long et al., 1989, 1990). La complejidad de los depósitos de tsunamis se debe a la escasez de antiguos paleoeventos ya sea por la erosión en el registro de sedimentario o similitud de características por otros procesos litorales y marinos abruptos o de alta energía (Shiki, Cita, & Gorsline, 2000; Tsunemasa Shiki, 1996). Es importante que cualquier estudio de la expresión geológica de los tsunamis considere sus firmas de depósito en términos de su génesis física.

La génesis física del tsunami comprende tres procesos (1) la generación por cualquier evento que perturbe la columna de agua, (2) propagación, ya sea desde mar abierto a aguas costeras más restringidas, (3) inundación de áreas costeras. Un cuarto proceso denominado tracción es añadido, donde la corriente de contralavado generada desde la costa hacia aguas más profundas por el tsunami (Einsele, Chough, & Shiki, 1996). Estos cuatro procesos del tsunami van a modificar la morfología de la costa o su perfil costero, generando una erosión de las zonas de depósitos naturales, como son depósito de frente de playa, barrera litoral, zona de dunas, etc. (ver Figura 3.1). Estos sedimentos redistribuidos, y depositados con una gran energía quedarán en el margen litoral, lo cual constituirán el registro del evento.

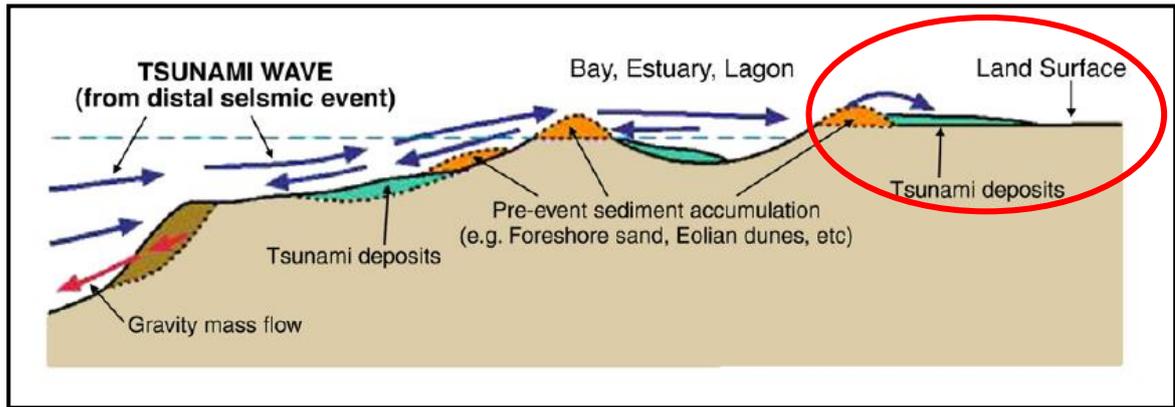


Figura 3.1. Esquema de los procesos de deposición de sedimentos de tsunami
 [Modificado de (Einsele et al., 1996)].

3.2 Registro de paleotsunamis y método de estudio

Los depósitos de paleotsunamis se distinguen en base a criterios sedimentológicos, estratigráficos, macro y microfauna, y datación para el registro histórico.

La principal característica de un depósito es la inusual presencia de arenas interestratificadas en materiales de grano fino, pobremente ordenado, con presencia de clastos de tipo rip-up y contacto erosivo a la base (Goff et al., 2004; Lagos & Cisternas, 2004). A continuación, se detallan algunas de las principales características o criterios para su reconocimiento:

1. Al momento que un tsunami invade aguas poco profundas, cada ola individual disminuye su velocidad y aumenta drásticamente su amplitud (Dawson & Stewart, 2007). Por lo tanto, los sedimentos del lecho marino se suspenden y se forma una superficie de erosión basal (Coleman, 1978).
2. Los depósitos relacionados con el tsunami se manifiestan en capas de arena anormalmente gruesas (es decir, capa del evento) en comparación con las litofacies superpuestas y de grano fino subyacentes (Ballance et al. 1981; Cantalamessa & Celma, 2005); Dawson & Stewart, 2007). Estas capas se componen de muchos fragmentos exógenos (por ejemplo, plantas, raíces, madera, roca de

playa, corales, etc.), que están ausentes en las unidades adyacentes (Takashimizu y Masuda 2000; Fujino et al. 2006).

3. A medida que se desvanece la energía del tsunami, su capacidad erosiva se debilita y aumenta la deposición de sedimentos gruesos (Dawson & Stewart, 2007); así como también la deposición de sedimentos mal clasificados (Coleman, 1968).
4. Sedimentos de clastos rip-up y transportados o intraclastos se reportan en los depósitos relacionados con el tsunami en áreas costeras (Jaffe et al. 2003; Matsumoto et al. 2008).
5. En algunos depósitos de tsunamis en la parte inferior de la capa o en toda la capa o en forma de láminas delgas se observa la presencia de minerales pesados (Morton et al., 2007; 2008; Jagodziński et al., 2009; Higman y Bourgeois, 2008), característico de sedimentos de tracción. La fuente de minerales pesados pueden darse a través de sedimentos costeros o un substrato geológico que actúa como fuente por ejemplo, volcanes, fondo marino (Nakamura, Nishimura, & Sulastya, 2012).
6. Las capas de sedimento del tsunami pueden contener macro o microfauna característicos de hábitat profundo, mezclados con fauna de ambientes someros. El contenido de la macrofauna puede variar desde restos de peces hasta una amplia gama de desechos de conchas (Dawson & Stewart, 2007). En cuanto a la microfauna puede ser la presencia de foraminíferos o moluscos. Esto es indicativo sobre la profundidad desde la cual fueron arrastrados los sedimentos, o su distancia de transporte antes de la deposición en el lugar donde se encuentran actualmente (Uchida et al., 2004, 2007a, b; Dawson y Shi, 2000).

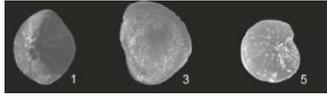
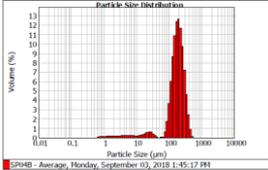
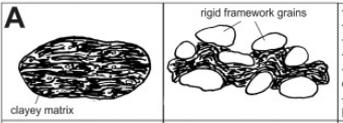
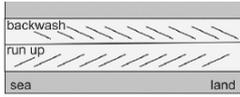
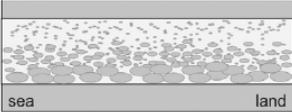
Otros criterios se presentan a continuación:

7. Cantalamessa y Di Celma (2005) propusieron que múltiples unidades finas ascendentes (fining-upwards) en sucesiones relacionadas con tsunamis reflejan una energía de transporte decreciente con el tiempo durante la deposición de múltiples olas sucesivas.

8. La presencia de estratificación cruzada (depósito de carga por tracción) ha sido reportada en depósitos de tsunamis del Océano Índico de 2004 por Bahlburg y Weiss (2007, su Fig. 11d).

Algunos de estos criterios se resumen en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Criterios que evidencian un depósito de tsunami.

| | Tipo de firma de tsunami | Gráfico | | Tipo de firma de tsunami | Gráfico |
|---|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Superficie de erosión basal |  (Shanmugam, 2012) | 6 | Macrofauna y microfauna (Moluscos) |  (Spiske et al., 2013) |
| 2 | Capas anómalas de arena gruesa | | 6 | Contenido de microfósiles (diatomeas, foraminíferos) |  |
| 3 | Tamaño de grano |  | 7 | Sucesiones finas hacia arriba (Fining upward Sequence) | |
| 3 | Sorting |  | | Estratificación cruzada |  |
| 4 | Clastos Rip-up |  | | | |
| 5 | Laminación planar horizontal |  (Shanmugam, 2012) | | Flujo Bidireccional |  |
| 5 | Minerales pesados |  (Shanmugam, 2012) | | Gradación Normal |  |

3.3 Registros de tsunami en el Ecuador

En Ecuador se han evidenciado algunos eventos de tsunamis, entre los que se encuentran los de 1906, 1958, 1979 (Kanamori & McNally, 1999), los cuales se registraron principalmente en la zona Norte de Ecuador; sin embargo, también se han registrado algunos eventos en la zona Sur (Golfo de Guayaquil); 1901, 1933, 1953 y 1959 documentados por los catálogos NEIC, CERESIS y EPN-RENSIG y Contreras, (2012); que han generado olas e inundaciones (Arreaga & Ortiz, 2002; Chunga & Quiñonez, 2013).

Para comprender estos procesos algunos investigadores e instituciones estatales han realizado algunos trabajos de modelamiento de estos eventos a lo largo de la costa del Ecuador, entre los cuales se encuentran:

- ✓ Arreaga & Koshimura, (2015) propuso varias simulaciones para evaluar el riesgo de tsunami en base a sismos locales en la zona del Golfo de Guayaquil.
- ✓ Sanclemente, Ioualalen, & Navarrete, (2011) propusieron una calibración de parámetros de ruptura en base al terremoto de 1979, Mw=8.2 en la Zona Norte.
- ✓ Ioualalen et al., (2017) realizó un análisis del efecto del sismo de Pedernales y sus efectos en la generación de tsunamis a lo largo de la costa del Ecuador, destacando que en la Bahía de Santa Elena, con el mareógrafo de La Libertad se identificó un efecto de resonancia prolongado (15h) pero débil, el mismo que estaría relacionado con la morfología general de dicha bahía.

Algunos de estos eventos han sido analizados en base a su registro sedimentario o biológico, entre los cuales se identifican los siguientes:

Chunga & Toulkeridis, (2014) introducen la primera evidencia de depósito de paleotsunami en Villamil Playas a través de características estratigráficas, bioestratigráficas, datación y correlación, concluyeron un evento de tsunami hace 1250 años.

Chunga et al., (2016) reconoció un evento de tsunami en base a estudios bioestratigráficos y estratigráficos en el área desde Manta a Jaramijó, y dataciones indican que hace aproximadamente 1170 ± 30 BP dicho evento afectó las áreas costeras ecuatorianas.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA

Este proyecto se efectuará a través de una metodología que comprende las siguientes etapas (ver Figura 3.1).

- Fase I, recopilación bibliográfica;
- Fase II, recopilación de datos en campo,
- Fase III, trabajo de laboratorio y,
- Fase IV, interpretación y análisis de resultados.

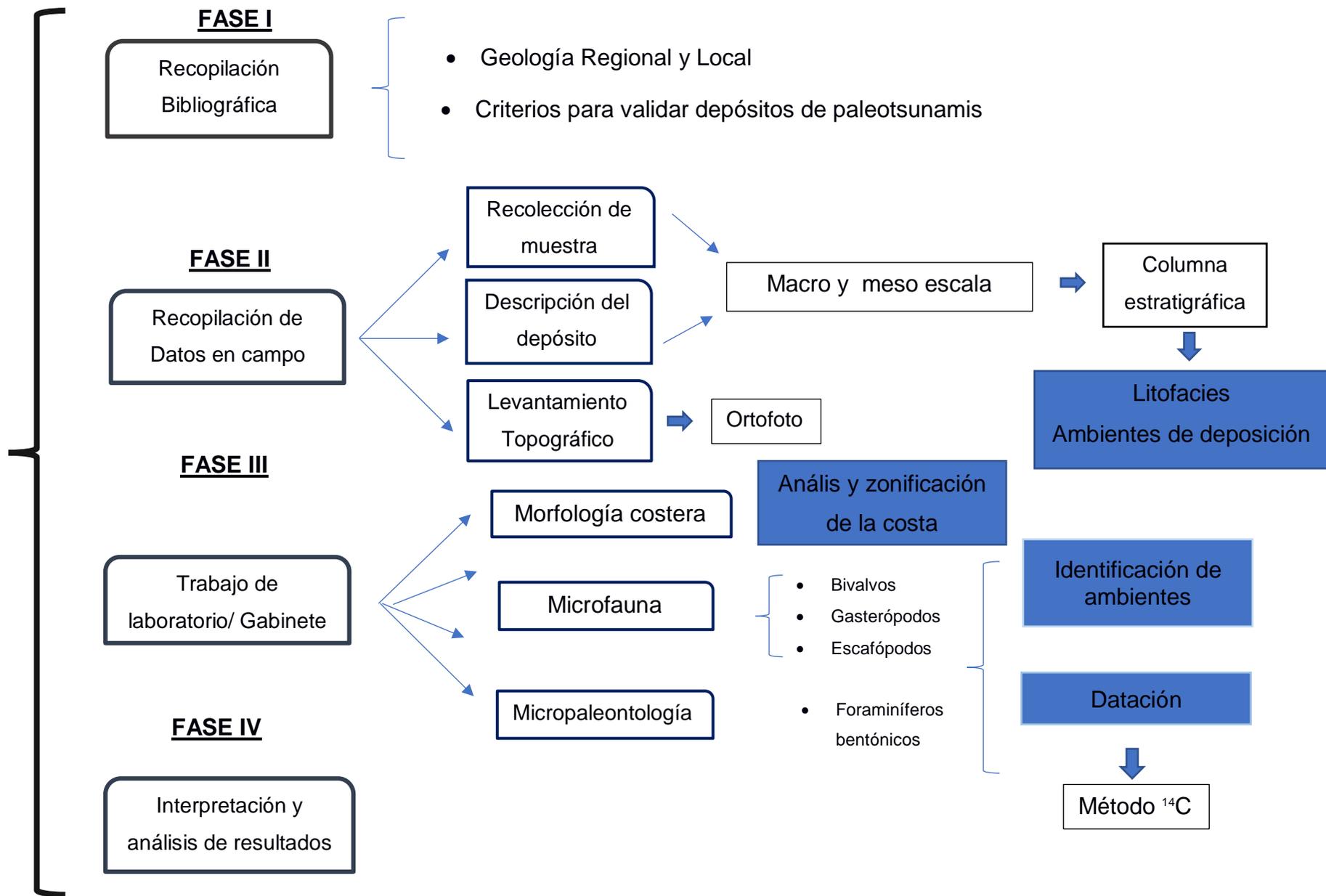


Figura 4.1 Esquema de la metodología utilizada en el proyecto

4.1 Recopilación bibliográfica

La primera fase comprende la investigación de la geología regional y local. Seguido de la búsqueda de publicaciones que abarquen sobre el estudio de depósitos de tsunamis antiguos y actuales en otras áreas del mundo y en Ecuador.

4.2 Recolección de Datos

En esta etapa comprende la toma de trece muestras en la excavación ubicada en la comuna de San Pablo (ver Figura 4.2), en conjunto con el grupo de investigadores de IRD (Institut de Recherche pou le Développement), el 2 de agosto de 2018.



Figura 4.2 Recolección de muestras en el sitio de estudio, ubicado en San Pablo.

4.3 Procesamiento de datos.

4.3.1 Descripción

En primera estancia, se realizó descripción a escala macro para observar la geometría del depósito, a una distancia más cercana (escala meso) el tipo de sedimento (arcilla, arena, grava, etc.), color, estructuras sedimentarias, espesor de capas; y además, en contenido carbonático y orgánico (restos de plantas, raíces), presente en el afloramiento. Esta descripción del depósito se complementa con el análisis de las muestras empleando el microscopio de luz polarizada, para destacar empaquetamiento (proporción grano/matriz), tamaño de grano, sorting, selección, redondez y composición mineralógica.

4.3.2 Levantamiento topográfico

En una segunda salida de campo, se realizó el levantamiento topográfico del punto de estudio con el GPS diferencial empleando un Drone (DJ phantom 4 pro). Con los productos obtenidos se pretende caracterizar la morfología costera.

4.3.3 Análisis de microfauna

Los ejemplares fueron discriminados de forma manual por clase: bivalvos, gasterópodos, escafópodos, y otros como restos de erizos de mar; a través del estéreomicroscopio de marca NIKON; pero antes de iniciar el proceso de separación se tamizaron las muestras cuidadosamente para capturar la mayor cantidad de moluscos completos. En conchas desarticulados de bivalvos, cada valva es considerada como un individuo.

La identificación de los individuos con base a sus características morfológicas y literaturas para la zona de estudio como principalmente el libro de Keen (1971) (Ver Figura C1 y C2) , (Paredes et al., 2016), la base World Register of Marine Species (WoRMS, 2016).

Las especies identificadas se fotografiaron usando un estéreomicroscopio ZEISS con cámara incorporada, para ser presentadas en la galería de cada muestra (Ver Anexo C).

4.3.4 Análisis de microorganismos fósiles

Las muestras fueron tamizadas para separar y el escogimiento de foraminíferos, luego los extraídos se ubicaron en placas micropaleontológicas y clasificadas para analizar GÉNERO Y ESPECIE usando un estéreomicroscopio STEMI. La clasificación de los foraminíferos se realizó en base a Ordóñez, Jiménez y Suárez (2006), Molina, (2004), Whittaker, (1988).

4.3.5 Datación

Se analizaron dos muestras de sedimentos de las cuales se seleccionaron DOS moluscos que cumplan con el peso mínimo requerido para datación mediante el método de ^{14}C ; uno de la capa superior A2, a una profundidad de 60 cm y otro de la capa inferior A1, a 1.60 cm, con el propósito de relacionar con un evento pasado. Posteriormente, los individuos fueron procesados por el laboratorio Beta Analytic INC, en Miami, Florida y ARTEMIS, en París

4.4 Interpretación y análisis de resultados.

En esta última fase se agrupa los resultados en base a los criterios de la bibliografía recopilada para la discusión y poder definir la ocurrencia de depósitos de paleotsunami.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

5.1 Morfología costera

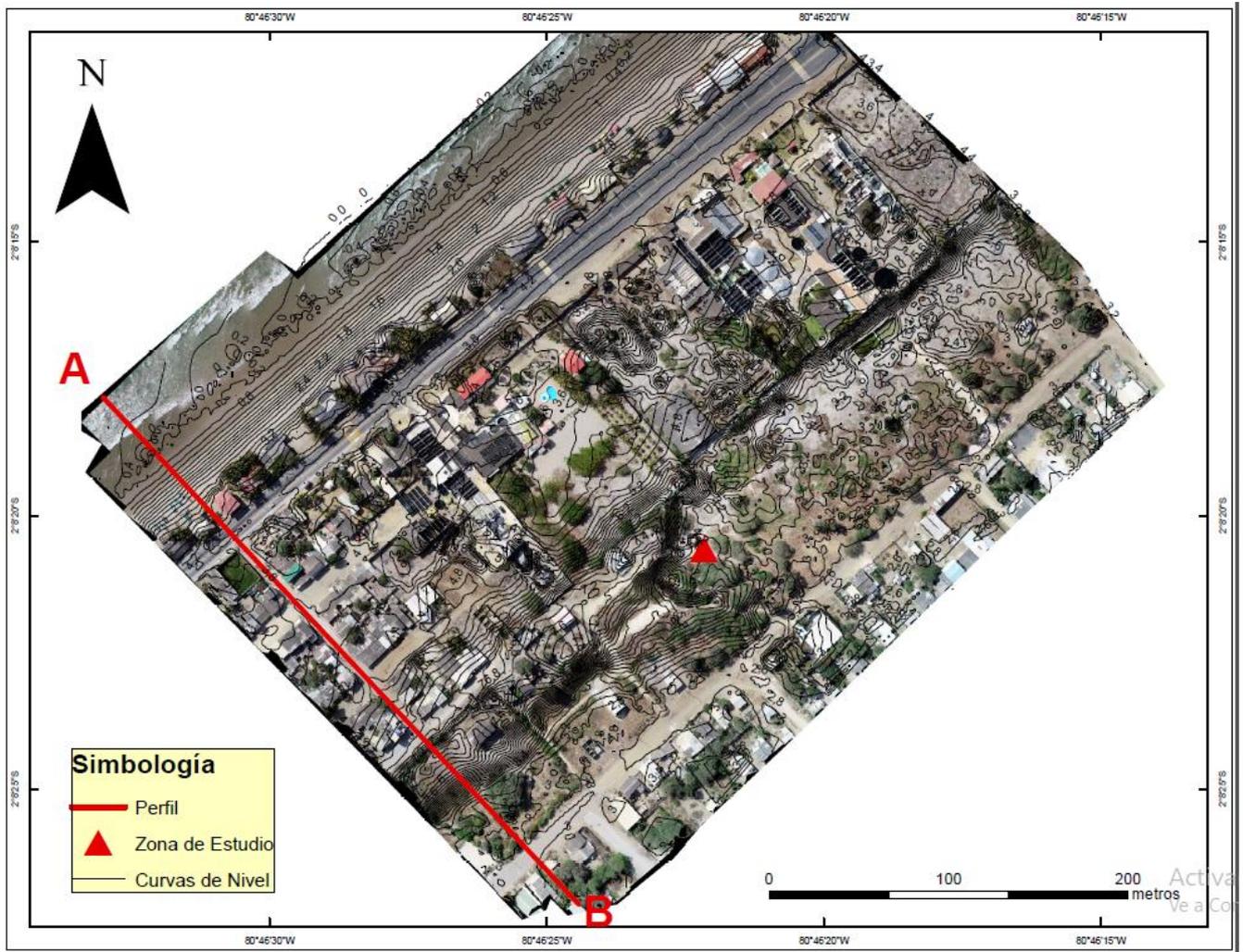


Figura 5.1 Ortofoto de la zona costera, ubicado en la comuna de San Pablo.

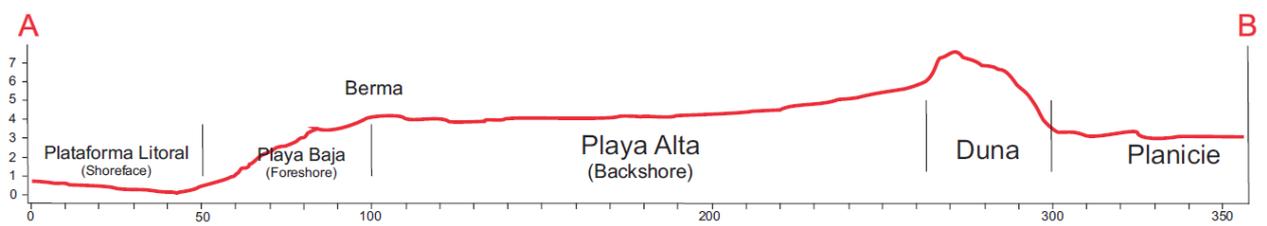


Figura 5.2 Perfil A-B perpendicular a la línea de costa.

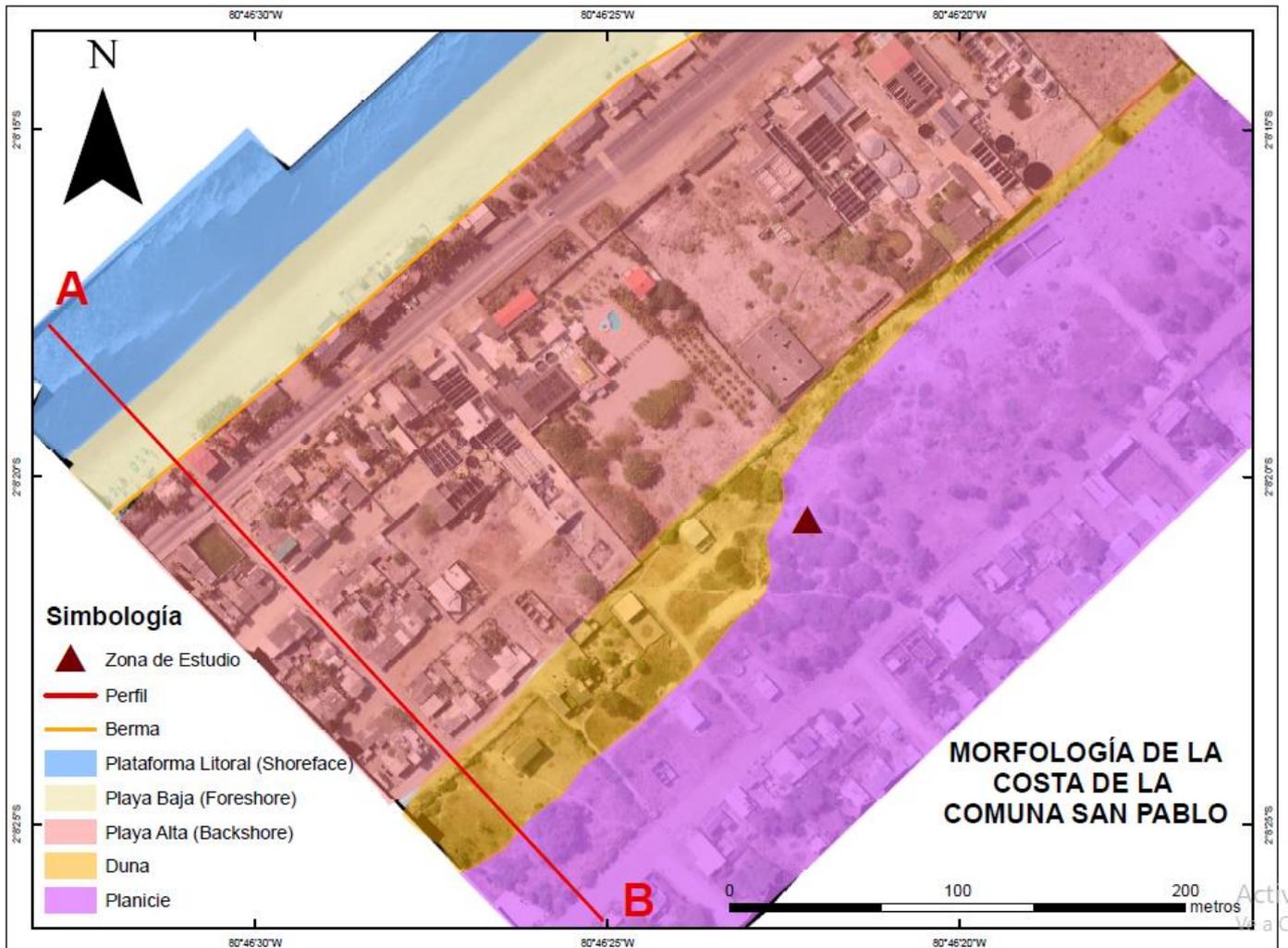


Figura 5.3 Mapa de la morfología costera de la Comuna de San Pablo con las respectivas zonificaciones.

La ortofoto tomada en la comuna San Pablo (ver Figura 5.2) muestra que la zona costera comprende latitudes que van desde 2 hasta 6 m.s.n.m. aproximadamente. La misma que está compuesta por el desarrollo de una playa que provoca que la línea de costa avance al mar, terrazas altas con acumulación de depósitos aluviales.

A partir del perfil A-B con dirección NO-SE realizado sobre la información topográfica y perpendicular a la línea de costa (ver Figura 5.2) se puede observar los elementos principales de la playa, i.e. el shoreface, foreshore, backshore, la zona de berma, duna, y la zona de planicie detrás de las dunas.

La pendiente dominante fluctúa entre 0 y 10°. A 300 m de la línea de costa se observa un montículo de arena media perteneciente al sistema de dunas de 222 m de extensión y de 6 m elevación aproximadamente con pendiente máxima de 50-60°; a partir de ahí, se domina la planicie del terreno (ver Figura 5.3). Al suroeste desemboca el estuario San Pablo con la deposición de sedimentos holocénicos producto de la erosión y transporte.

Usando como referencia el perfil de playa se realizó un mapa morfológico de la zona alrededor de la excavación para el estudio de paelotsunami, la misma que se encuentra en la zona de planicie detrás de la duna (ver Figura 5.3).

5.2 Estratigrafía del depósito

En el depósito se presentan dos fases de arena de grano medio a grueso de color gris oscura y arena fina de color gris parduzco claro con intervalos de materiales de grano fino y volcánicos. Las litofacies de arena de grano fino se encuentran adyacentes a la fase de arena de color gris oscuro. En las capas de arena oscura se presenta dos superficies de erosión basal. Se identificaron cinco litofacies sedimentarias las mismas que se describen, de la base al tope, a continuación:

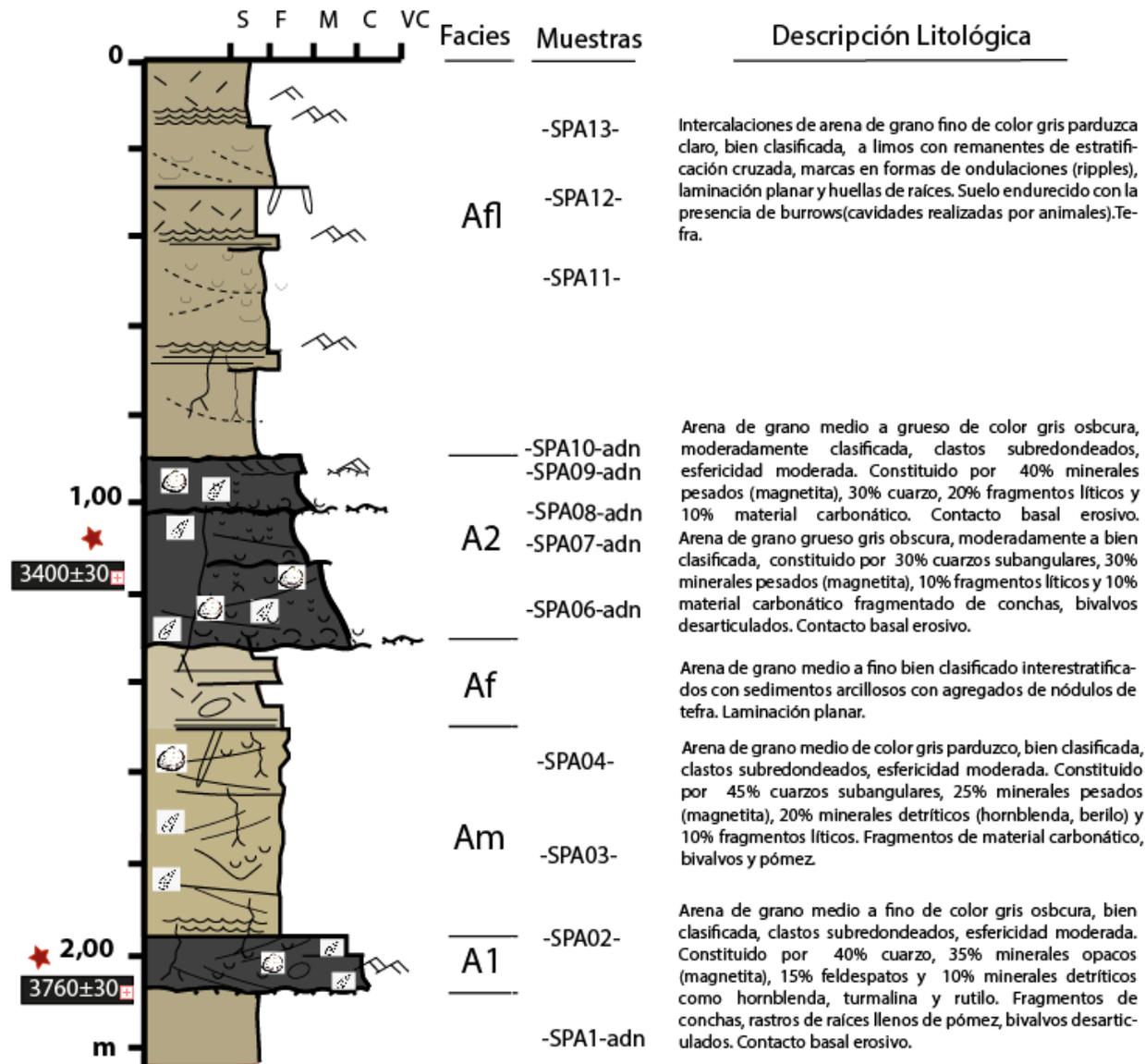


Figura 5.4. Columna estratigráfica del depósito, con las descripciones de cada litofacies.

- **A1 (1.95-2.20m):** estructura masiva, arena de medio a gruesa gris oscura de 10 cm de espesor, a la base un contacto de erosión basal, composición mineralógica cuarzo angulares (> 35%), minerales pesados (35%), feldespatos y minerales detríticos. Contenido de restos orgánicos, como conchas de bivalvos desarticulados, moluscos fragmentados, rastros de raíces llenos de pómez. La base del estrato está limitado por un contacto de erosión basal (ver Anexo B).
- **Am (1.50–1.95m):** arena de grano medio de color gris parduzco, bien clasificado, granos subredondeados, composición mineralógica de cuarzo (> 45%), minerales opacos, minerales detríticos y líticos. Con presencia de raíces (ver Anexo B).
- **Af (1.35–1.50 m):** las características texturales de este intervalo, muestra sedimentos interestratificados de arena de grano fino a arcillosos con laminaciones horizontales y nódulos de tefra, evidencian un ambiente de depositación típica lagunar con influencia fluvial, está limitado a la base por un contacto erosivo.
- **A2 (90cm-1.35m):** Dos superficies de erosión limitan dos subcapas, la base está caracterizada por arena de granulometría gruesa a muy gruesa, cuya composición mineralógica predomina cuarzoes subangulares (> 30%), minerales pesados (30%), magnetita , turmalina fragmentos líticos y abundante material carbonático, es decir, presencia de microfauna como bivalvos, gasterópodos, restos de erizo de mar (ver Anexo B). Los moluscos se encuentran ausentes en la capa suprayacente. El límite inferior está definido por un contacto erosivo. A 30 cm de la base se presenta otro contacto basal erosivo de una capa de arena de medio a fino, moderadamente clasificado. La capa A2, corresponde a un ambiente de alta energía.
- **Afl (0-90cm):** Los rasgos texturales de los sedimentos se presentan en intercalaciones de arena de grano fino, bien clasificada con granos subredondeados; con fragmentos de raíces, material volcanoclástico (tefra);

con sedimentos predominantemente limos, con laminaciones horizontales, remanentes de estratificación cruzada y estructuras de ripples. A partir de estos criterios se puede inferir que el ambiente de depositación estuvo controlado por energía de moderada a débil (ver Anexo B).

5.3 Análisis de Moluscos

Del análisis de moluscos, se identificó que las capas de facies A1 y A2, presenta mayor abundancia de moluscos en comparación de las capas Am, Af, y Alf. Por lo cual se desarrolló el trabajo de identificación a partir de trece muestras tomadas en la columna estratigráfica tal como lo indica la Figura 5.4, siguiendo el método descrito en el capítulo de metodología.

De las trece muestras se recolectó un total de 81 ejemplares, que se clasificaron en tres clases de moluscos: Pelecypoda, 25 u; Gastropoda, 51u; Scaphopoda, 1 especie (ver Tabla 5.1). La identificación para con el enfoque del proyecto se centró en las clases Pelecypoda y Scaphopoda; mientras que, de la clase Gastropoda debido al ambiente no muy profundo, fueron no objeto de análisis primordial.

En la capa A2, en las muestras SP06C, SP06B, SP07B, SP08B, SP09, SP010 se identificaron los géneros *Núcula exigua*, *Crassinella varians*, *Lucina (Parvilucina) mazatlanica*, *Glycymeris, sp.*, *Chione, sp.* y *Dentalium cf. perstedii*: cuyo ambiente característico son profundidades que abarcan entre 11 a 85 m, extendiéndose a 1024 m. (Ver Anexo C)

Tabla 5.1 Número de especies encontradas en las muestras recolectadas en campo. NI:
No identificados.

| Litofacies | Muestra | Bivalvos | Gasterópodo | Escafópodo | Otros | NI | Ambiente |
|------------|---------|----------|-------------|------------|-------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Afl | SP013B | | | | 1 | | |
| A2 | SP010B | 1 | | | | | <i>Dónax sp.</i> |
| | SP09B | 7 | 7 | | | 8 | <i>Núcula exigua</i> ; <i>Crassinella varians</i> ; <i>Odontogena sp.</i> |
| | SP08B | 5 | 2 | | 1 | 4 | <i>Núcula Exigua</i> <i>Lucina (Parvilucina) mazatlanica</i> , 4 a 1024 m <i>Glycymeris sp.</i> , |
| | SP07B | 2 | 6 | | | 6 | <i>Crassinella varians</i> ; <i>Odontogena sp.</i> |
| | SP06B | 1 | 18 | 1 | 1 | 19 | <i>Dentalium cf. perstedti</i> : 4 a 145 m. |
| | SP06C | 7 | 13 | | 1 | 14 | <i>Núcula exigua</i> , 11 a 1900m; <i>Crassinella varians</i> ; 15 a 80 m; <i>Chione sp.</i> : 18 a 85 m; <i>Glycymeris sp.</i> : 41 to 85m. |
| Am | SP04B | 1 | 1 | | | 1 | <i>Núcula exigua</i> ; |
| | SP03B | | 1 | | | 1 | |
| A1 | SP02B | | 3 | | | 3 | |
| | SP01B | 1 | | | | 1 | |
| | | 25 | 51 | 1 | 4 | 57 | |

5.4 Análisis de microorganismo fósiles

La búsqueda de microorganismos se realizó en las capas A1 y A2 debido a la gran acumulación de biofacies. Este análisis se desarrolló en la búsqueda de foraminíferos de tipo bentónicos.

En la muestras de A2, se encontraron microorganismos fósiles como los foraminíferos bentónicos: *Cibicidoides crebbsi*, *Cibicides* cf. *dutemplei*, *Ammonia tepida*, los cuales, de acuerdo a su morfología corresponderían a foraminíferos del Mioceno Tardío.

Tabla 5.2. Foraminíferos analizados con su respectivo paleoambiente.

| Taxonomía | Paleoambiente |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <i>Cibicidoides crebbsi</i> | Talud inferior (2000-4000m – Abisall(> 4000m) |
| <i>Cibicides dutemplei</i> | De las profundidades neríticas externas y batiales superiores. |
| <i>Ammonia tepida</i> | Ambiente Estuarial |

En la muestra de la capa A1, se presentan de raro a poco común foraminíferos bentónicos como *Cibicidoides crebbsi*, *Pararotalia* sp., microorganismos fósiles, ciertos radiolarios, así como restos de organismos mayores; espícula de equinodermo y espícula de esponjas; y restos micro moluscos (gasterópodos, escafópodos).

En ambas muestras, los ejemplares se encuentran retrabajados, pulidos, fragmentados lo que dificulta el reconocimiento a nivel de especie de algunos.

5.5 Datación

En la zanja de estudio se han identificado dos capas de arena distintivas dentro de la estratigrafía denominadas A2 y A1; superior e inferior, respectivamente. Las mismas que por su abundante contenido de micromoluscos fueron objeto de datación (ver Figura 5.5). La capa A1 dió aproximadamente 3760 ± 30 BP en base a un molusco de la clase bivalvia;

Dónax, sp. ; mientras que, A2 está fechado alrededor de 3400 ± 30 BP, con la datación de otro bivalvo *Divalinga spp.*

Figura 5.5 Galería de los moluscos empleando en la datación.

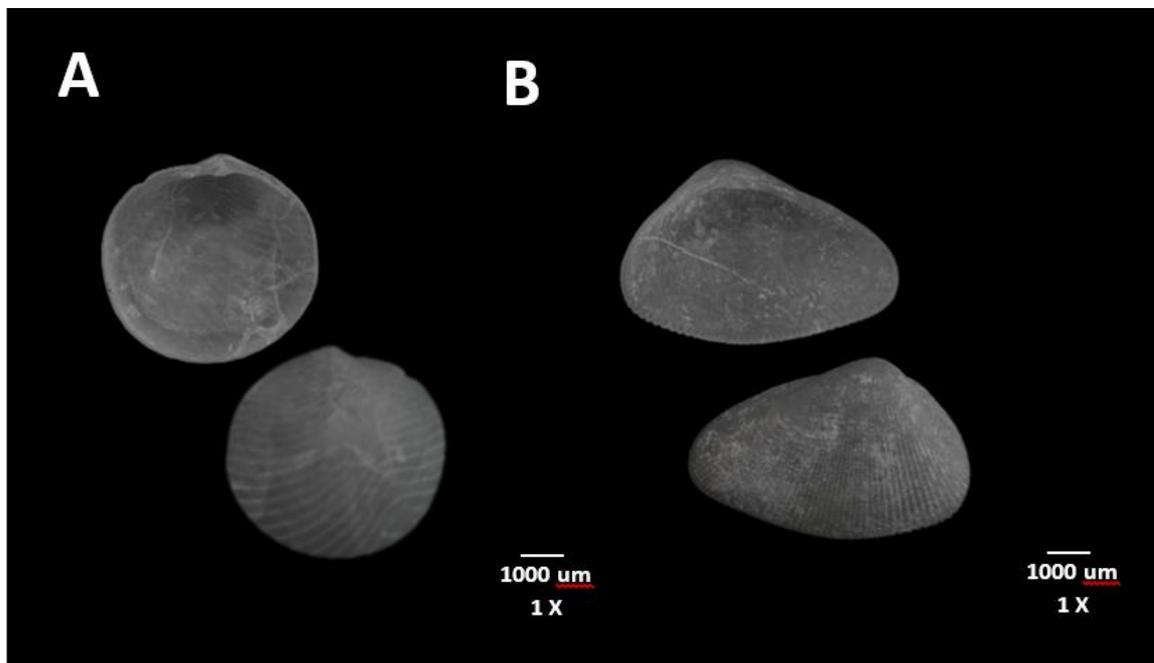


Tabla 5.3 Resultados de la data de radiocarbono para San Pablo.

| | Laboratorio | Muestra | Profundidad | Edad BP | Material Datado |
|----|---------------|---------|-------------|---------------|-----------------|
| A2 | BETA Analytic | A | 60 cm | 3400 ± 30 | Bivavlo |
| A1 | ARTEMIS | B | 1.60 cm | 3760 ± 30 | Bivalvo |

Capitulo 6

6. DISCUSIÓN

6.1 Registro de tsunamis

En la columna estratigráfica levantada en campo se muestra que existen dos ambientes principales de sedimentación, los cuales a partir de su litología se evidenciaron que corresponden a diferente tipo de energía de depósito: un ambiente de baja energía corresponde a las capas desde la base al tope; Am, Af y Afl, y otro de mayor energía correspondiente a las capas A1 y A2. Los estratos A1 y A2 de espesores 10 y 41 cm, respectivamente; con partículas moderadamente a bien seleccionadas con porciones de materiales fino como limo, y estructura sedimentaria masiva.

En la capa inferior A1, la variedad de moluscos marinos es abundante y está caracterizado por fragmentos de gasterópodos (ver Anexo C3), bivalvos desarticulados, a pesar de que la muestra SP02B no refleja dicha abundancia. En contraste, la capa superior A2 refleja una muy buena cantidad de moluscos (ver Anexo C5-C11) en el análisis de las muestras y en campo. La combinación de moluscos marinos como bivalvos de la especie *Núcula exigua* de profundidades de 11 a 1900m, *Crasinella varians*, 15 a 80 m; *Glycymeris sp.*, 41 a 85 m; un escafópodo de la especie *Dentalium cf. Perstedii*, 4 a 145 m y una mezcla variada de gasterópodos y otros restos, los mismos que están preservados o fragmentados. En ambas capas se observa exuberante microfauna marina en comparación con los sedimentos adyacentes que presentan una pobre a nula diversidad de especies. Por lo tanto, la identificación de las especies manifiesta un ambiente desde la plataforma continental hasta zonas más profundas y con mezcla de individuos de hábitat somero, por lo que, se puede inferir que por la rareza de moluscos (no estudiados o poca literatura existente) y fragmentación han sido transportados en corto tiempo desde una considerable distancia (mar adentro) o por inundación marina de alta energía.

Tanto A1 como A2 son ricas en minerales pesados como magnetita (Shanmugam, 2012) dispuesta en toda la unidad y en ciertos tramos en láminas delgadas, y esta abundancia se ve reflejada en la coloración oscura

en comparación con el color claro de las capas adyacentes. La fuente de estos minerales se puede inferir de origen oceánico producto de sedimentos de origen ígneo, las misma que fueron arratrados o trasportados desde mar adentro hasta la superficie costera.

En el análisis de formaníferos bentónicos para identificar el paleoambiente, resultaron de edad miócenica, lo cual no aportaría como evidencia significativa ya que no hay relación con la edad reciente de los moluscos. Sin embargo, al ser formaníferos depositados en una zona donde al observar el marco estratigráfico de la zona (ver Figura 2.2), no existen afloramientos de rocas miocénicas aledañas, por lo que se puede inferir que la fuente de los sedimentos proviene del mar y fueron transferidos por un evento de alta energía desde el fondo marino hasta donde están ubicados actualmente.

El conjunto de elementos previamente analizados presenta la idea que las capas A1 y A2, corresponden a eventos de gran energía que trajeron sedimentos de grandes profundidades y los depositaron alrededor de la zona costera. Estos eventos podrían ser un tormentas o tsunami. El Pacífico Sureste inhibe este tipo de procesos atmosféricos al estar dominado por el Sistema de Corrientes de Humbolt (MetEd & COMET, 2011), y el Ecuador al estar ubicado en esta zona no está sujeto a este tipo de eventos tropicales. En base a esto, se descarta a las tormentas como proceso de transporte y deposición en este margen costero; y además, considerando que las capas A1 y A2 no exhiben muchas estructuras sedimentarias, espesor centimétrico y granulometría no muy gruesa, ya que los depósitos de tormentas presentan firmas diferentes (tamaño de grano más grueso, estructuras sedimentarias, mayor espesor), el evento puede corresponder a inundaciones por tsunami en lugar de inundación por tormentas tropicales.

En el límite inferior de la capa A1 se presenta una superficie de erosión basal. La capa A2, presenta dos superficies de erosión a 1.30 m y 1.05 m las mismas que limitan dos subunidades donde se refleja el decrecimiento del tamaño de grano grueso a fino hacia el tope (ver Figura 5.4). Estas dos subcapas presentan litofacies similares entre sí, esto podría haberse suscitado por una

segunda ola entrante, superior a la primera; ya que, grandes tsunamis pueden generar varias olas significativas depositando los mismos sedimentos (Dawson, 1994; Dawson & Stewart, 2007).

6.2 Zonas de inundación.

Si bien aún no se ha generado una carta de inundación específicamente en la zona de San Pablo que permita validar áreas ante la amenaza de tsunami, existen evidencias que en la Bahía de Santa Elena ha sido afectada por inundaciones, tal como lo expone Ioualalen et al., (2018) a partir del tsunami del terremoto del 2016 con epicentro en Pedernales, lo cual generó en la bahía de Salinas un efecto de prolongado (15 h) pero débil de resonancia. Este efecto es de vital estudio, ya que amplifica de manera radical una ola de tsunami en zonas costeras, bahías cerradas o puertos cerrados son buenos prospectos, pero también en bahías amplias como en este caso (La Libertad) y presuntamente en San Pablo.

Hace 3400 ± 30 BP años se produce el evento A2 y el evento A1 de edad más antigua, en 3760 ± 30 BP con una diferencia de 360 años aproximadamente, asumiendo que el perfil costanero (ver Figura 5.2) no ha sufrido variaciones, el tsunami debió traspasar los 6 metros de altura de la duna inundando esta área.

Las dos superficies de erosión en la capa A2 sugiere que el evento pudo haber ocurrido con dos olas de inundación, donde cada ola erosionó el tope del nivel subyacente. Lo cual, si se compara con la superficie de erosión presente en la capa A1, este pudo haber tenido diferente comportamiento, con una sola ola.

En base al mapa de morfología costera (ver Figura 2.3) las zonas de playas de barrera, alcantilado bajos (menor a 10 m) sufrieron inundaciones producidas por tsunamis.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se ha identificado que las capas A1 y A2 representan depósitos por paleotsunami (eventos de alta energía) dentro del registro sedimentario de la comuna San Pablo, las mismas que presentan litofacies de granulometría de arena de grano grueso a arena de grano fino al tope, de espesores de 10 y 40 cm aproximadamente, de coloración gris oscuro; presencia de microfauna (fragmentos o preservada) que no están presente en las capas adyacentes, abundantes minerales pesados, contactos erosivos basales.
- De acuerdo a las edades ^{14}C de los moluscos de las capas A1 y A2, se puede indicar que la ocurrencia de tsunamis es durante el Holoceno, alrededor de 3467-3297 cal BP y asumiendo que el perfil costero conserva la misma morfología se pudieron generar olas de 6 o 7 metros de altura. Al generar olas gigantescas es posible que la fuente detonante del tsunami sea un terremoto en el fondo marino y de magnitud considerable.
- Al identificar depósitos de paleotsunamis hace 3400 años aproximadamente, se manifiesta que la Bahía de Santa Elena fue afectada por inundaciones, lo cual válida cartas o modelos generados por instituciones públicas como el INOCAR.

7.2 Recomendaciones

- Para corroborar los resultados de las primeras dataciones es conveniente datar nuevamente las capas asociados a los depósitos de tsunami, y también, las capas adyacentes para poder reconstruir una frecuencia y ciclicidad.
- Emplear la técnica de geordar para analizar la estructura del depósito.
- En el caso de continuar con el estudio de identificación de paleotsunamis en la costa ecuatoriana se recomienda zonas cuyas morfología corresponde

a playas o barreras litorales para determinar la posibilidad de encontrar el mismo evento, a través de la correlación estratigráfica o nuevos depósitos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arreaga, P., & Koshimura, S. (2015). Tsunami Inundation Modeling and Hazard Mapping of the South Coast of Ecuador, 121–126.
- Benitez, S. (1995). Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire.
- Cantalamesa, G., & Celma, C. Di. (2005). Sedimentary features of tsunami backwash deposits in a shallow marine Miocene setting , Mejillones Peninsula , northern Chile, 178, 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.05.007>
- Chunga, K., Mulas, M., Quiñonez, M., & Garcés, D. (2016). Geomorphologic and Stratigraphic relationships as indicators of Geologic Hazard and Paleoseismicity , central coast of Ecuador, (June).
- Chunga, K., & Quiñonez, M. (2013). Chunga K., Quiñonez Ma. (2013) Evidencia de un depósito sedimentario de tsunamis en la planicie aluvial de Villamil Playas, Golfo de Guayaquil. *Revista Acta Oceanográfica del Pacíf...*, (December 2015).
- Chunga, K., & Toulkeridis, T. (2014). First evidence of paleo-tsunami deposits of a major historic event in Ecuador, (March 2015).
- Coleman, P. J. (1968). Tsunamis as geological agents. *Journal of the Geological Society of Australia*, 15(2), 267–273. <https://doi.org/10.1080/00167616808728698>
- Collot, J., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Ratzov, G., Migeon, S., ... Pazmino, A. (2009). Vision general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia : implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subduccion de la Cordillera de Carnegie, 47–74.
- Contreras, M. (2012). Cronología de Tsunamis en Ecuador desde 1586 a 2012, 50–59.
- Dawson, A. G. (1994). Geomorphological effects of tsunami run-up and backwash, Dawson, A. G.pdf, 10(May 1960), 83–94.
- Dawson, A. G., & Stewart, I. (2007). Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 200(3–4), 166–183. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.002>
- Einsele, G., Chough, S. ., & Shiki, T. (1996). Depositional events and their records—an introduction. *Sedimentary Geology*, 106(3–4), 305. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00072-3)

- Feininger, T., & Bristow, C. R. (1980). Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geologische Rundschau*, 69(3), 849–874. <https://doi.org/10.1007/BF02104650>
- Goff, J., McFadgen, B. G., & Chagué-Goff, C. (2004). Sedimentary differences between the 2002 Easter storm and the 15th-century Okoropunga tsunami, southeastern North Island, New Zealand. *Marine Geology*, 204(1–2), 235–250. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00352-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00352-9)
- Graindorge, D., Calahorrano, A., Charvis, P., Collot, J.-Y., & Bethoux, N. (2004). Deep structures of the Ecuador convergent margin and the Carnegie Ridge, possible consequence on great earthquakes recurrence interval. *Geophysical Research Letters*, 31(4), L04603. <https://doi.org/10.1029/2003GL018803>
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., Collot, J. Y., & Malavieille, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision (Vol 168, pg 255, 1999). *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2), 155–156.
- Ioualalen, M., Pazmino, N. A., Renteria, W. J., Charvis, P., Gordillo, G. X. S., Delouis, B., ... Gallegos, L. A. B. (2018). Analysis of Tsunami Tide Gauge Records Following the 2016 Ecuadorian Earthquake and Tsunami. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 144(2), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000431](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000431).
- Kanamori, H., & McNally, K. (1999). Variable Rupture Mode of the Subduction Zone Along The Ecuador-Colombia Coast, 72(4), 137,138. Retrieved from http://www.worldcat.org/title/terminologia-representacion-y-comunicacion-elementos-para-una-teoria-de-base-comunicativa-y-otros-articulos/oclc/964211283&referer=brief_results
- Lagos, M., & Cisternas, M. (2004). Depósitos de Tsunami como indicadores de riesgo : evidencias. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 49, 329–351. <https://doi.org/10.1021/ol800663v>
- Luzieux, L. D. A., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C. F., & Winkler, W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1 ° N and 3 ° S: Paleomagnetic , radiometric and fossil evidence, 249, 400–414. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.008>
- Martillo, C. (2016). Stratigraphic record of the glacio-eustatic cycles and the deformation during the Pleistocene along the central Ecuadorian margin: using the ATACAMES

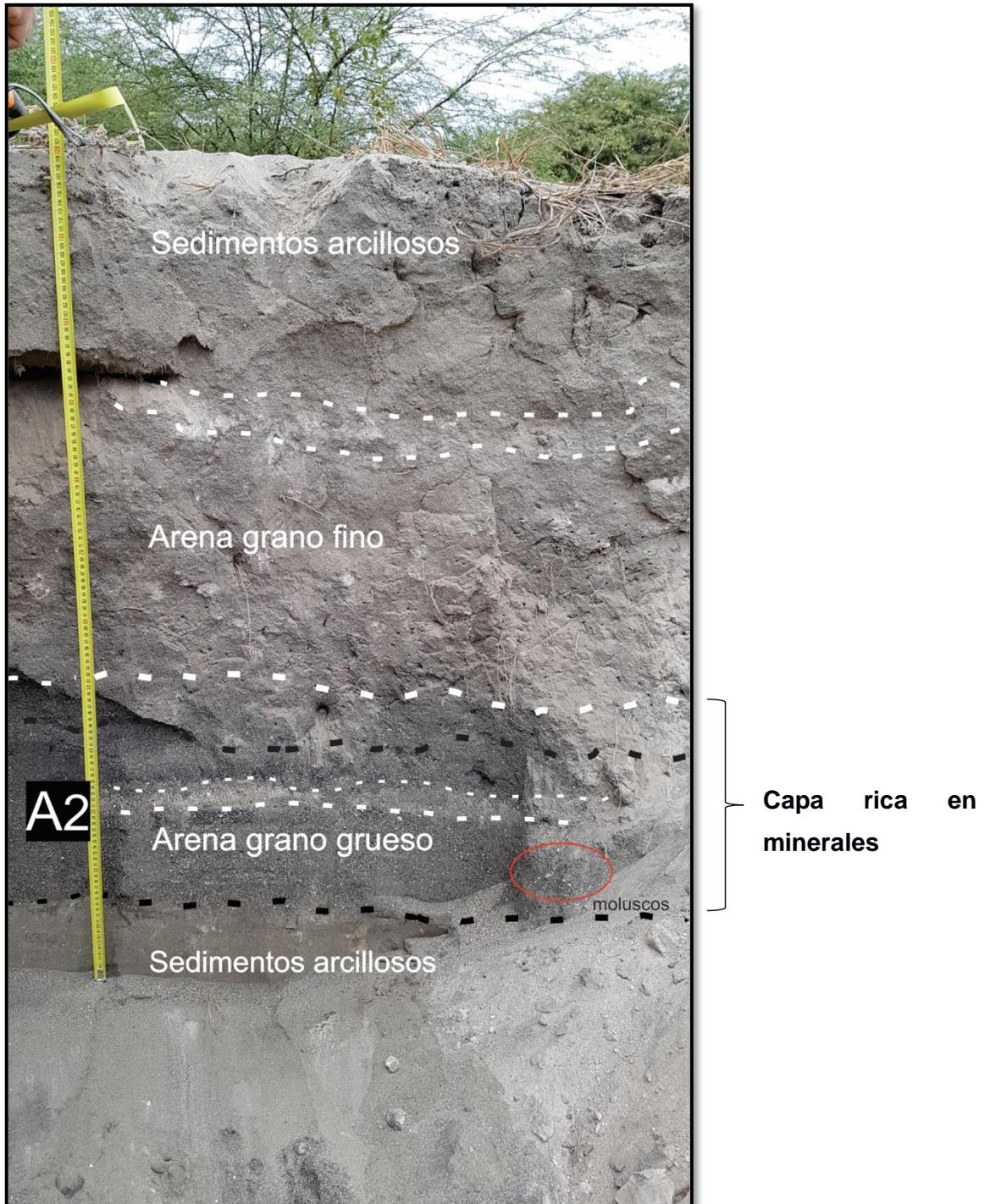
data campaign.

- MetEd, & COMET. (2011). Introduction to Tropical Meteorology, Chapter 8: Tropical Cyclones, 1–6.
- Michaud, F., Pazmiño, N., & Collot, J.-Y. (2009). El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por disolución submarina., 29–45.
- Molina, E. (2004). *Micropaleontología*.
- Nakamura, Y., Nishimura, Y., & Sulastya, P. (2012). Local variation of inundation , sedimentary characteristics , and mineral assemblages of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Misawa coast , Aomori , Japan. *Sedimentary Geology*, 282, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.06.003>
- Paredes, C., Cardoso, F., Santamaría, J., Esplana, J., & Llaja, L. (2016). Lista anotada de los bivalvos marinos del Perú. *Revista Peruana de Biología*, 23(2), 127–150. <https://doi.org/10.15381/rpb.v23i2.12397>
- Pedoja, K., Ortlieb, L., Dumont, J. F., Lamothe, M., Ghaleb, B., Auclair, M., & Labrousse, B. (2006). Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Peru) from new marine terrace data. *Marine Geology*, 228(1–4), 73–91. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.01.004>
- Proust, J. N., Martillo, C., Michaud, F., Collot, J. Y., & Dauteuil, O. (2016). Subduction of seafloor asperities revealed by a detailed stratigraphic analysis of the active margin shelf sediments of Central Ecuador. *Marine Geology*, 380, 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.03.014>
- Reyes, P., & Michaud, F. (2012). Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana.
- Sanclémente, E., Ioualalen, M., & Navarrete, E. (2011). Diciembre de 1979 , a partir de datos hidrográficos y simulación numérica de propagación de tsunamis ., (1).
- Santana, E., Dumont, J. F., Armas, V., Burbano, L., Gutiérrez, L., & Valdez, F. (2003). EVOLUCION MORFOLOGICA DE LA COSTA EN LA PENINSULA DE SANTA ELENA : EVIDENCIAS DE PLATAFORMAS MARINAS Y SOCAVONES ELENA : EVIDENCIAS DE PLATAFORMAS MARINAS Y SOCAVONES costa , se puede obtener una visión estudio . Clásicamente a lo largo de la costa Ecuato, (January).
- Shanmugam, G. (2012). Process-sedimentological challenges in distinguishing paleo-tsunami deposits. *Natural Hazards*, 63(1), 5–30. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9766-z>

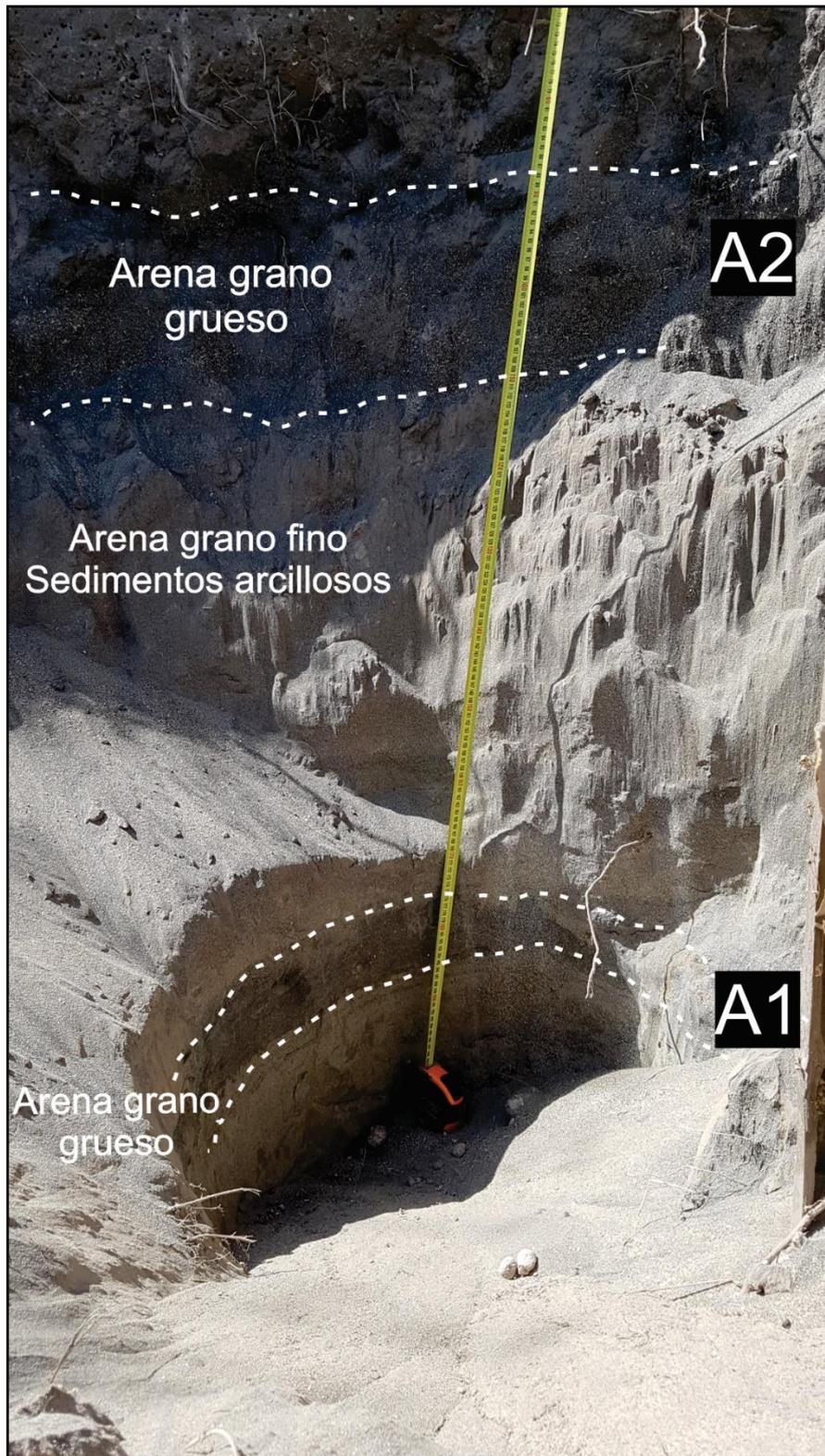
- Shiki, T. (1996). Reading of the trigger records of sedimentary events - A problem for future studies. *Sedimentary Geology*, 104(1–4), 249–255.
[https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00132-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00132-8)
- Shiki, T., Cita, M. B., & Gorsline, D. S. (2000). Sedimentary features of seismites, seismo-turbidites and tsunamiites - an introduction. *Sediment Geol*, 135(1–4), VII–IX.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00058-0)
- Spiske, M., Piepenbreier, J., Benavente, C., Kunz, A., Bahlburg, H., & Steffahn, J. (2013). Historical tsunami deposits in Peru : Sedimentology , inverse modeling and optically stimulated luminescence dating. *Quaternary International*, 305, 31–44.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.02.010>
- Whittaker, J. E. (1988). *Bentonic Cenozoic Foraminifera from Ecuador*.

ANEXOS

ANEXO A



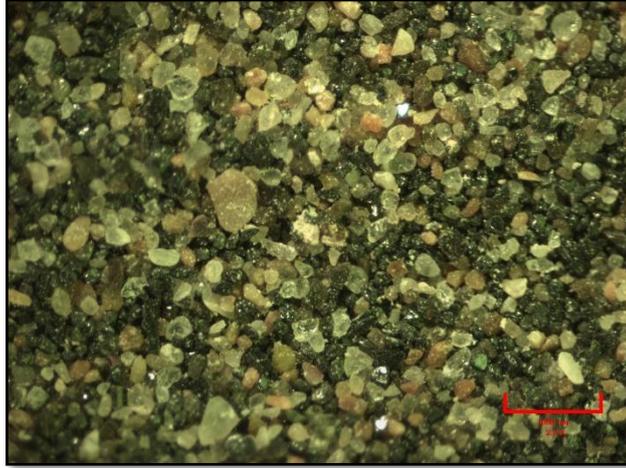
A1. Fotografía de la excavación , donde se aprecia la capa A2 con las dos superficies de erosión basal (línea entrecortada negra).



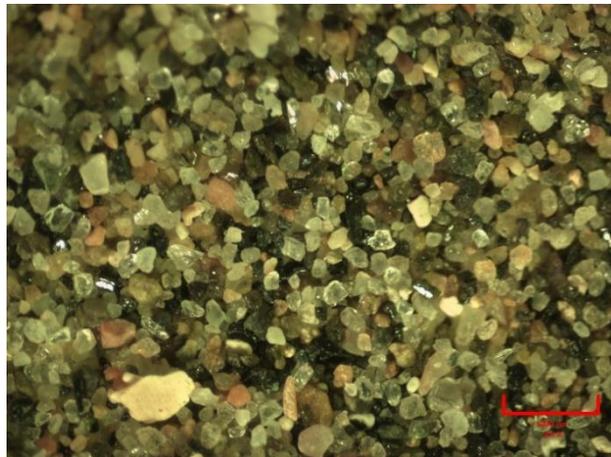
A2. Fotografía del depósito, las capas A1 y A2 de granulometría gruesa interestratificadas con materiales finos.

ANEXO B

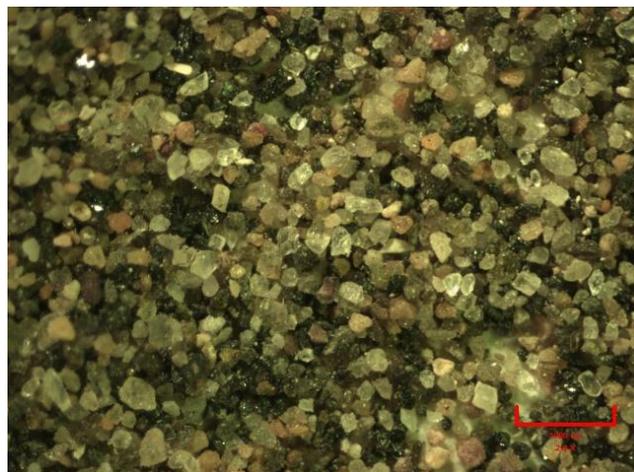
SP02B



SP03B



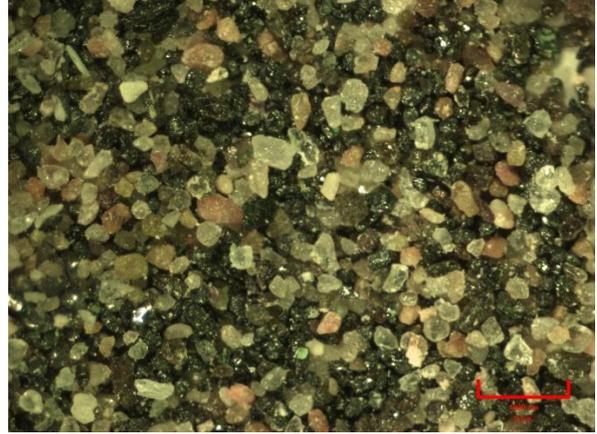
SP04B



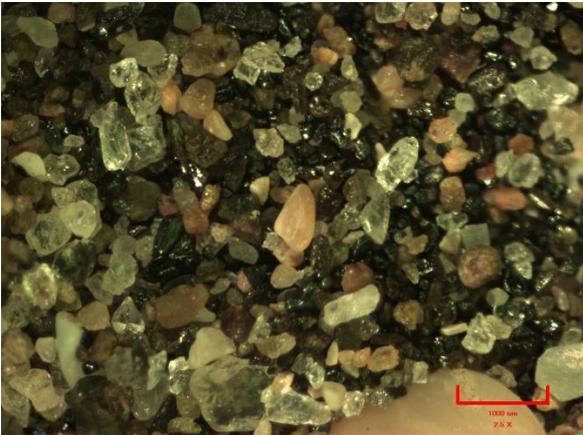
SP06C



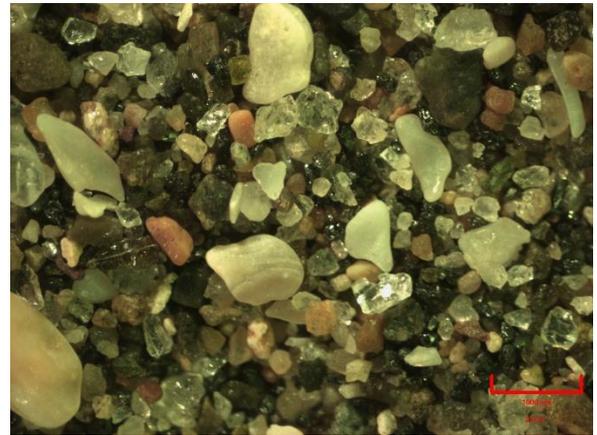
SP06B



SP07B



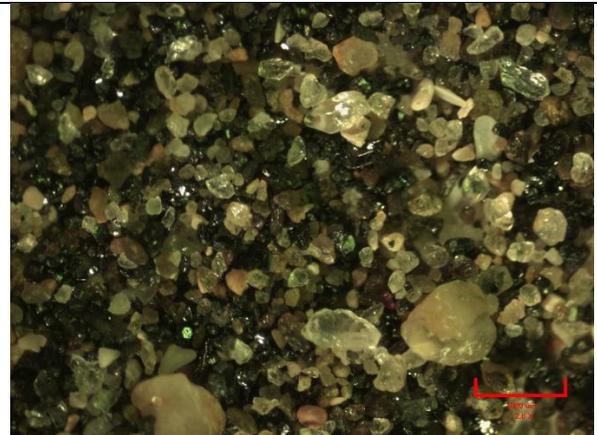
SP08B



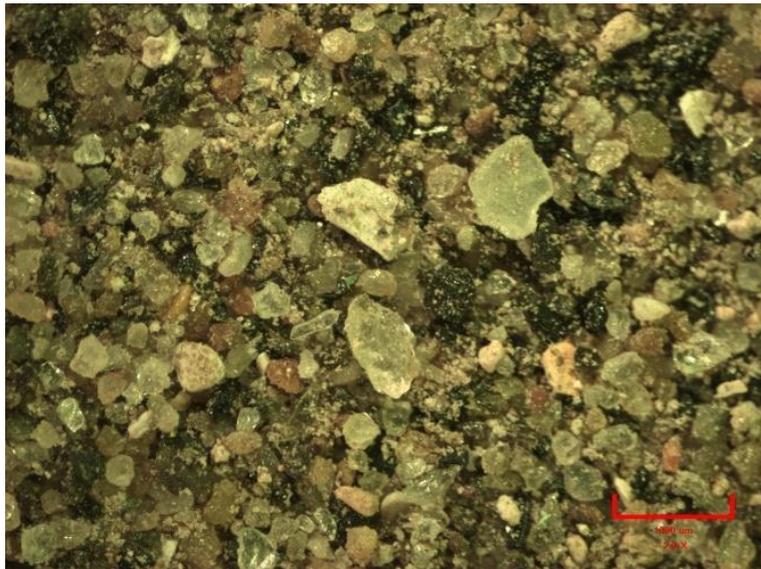
SP09B



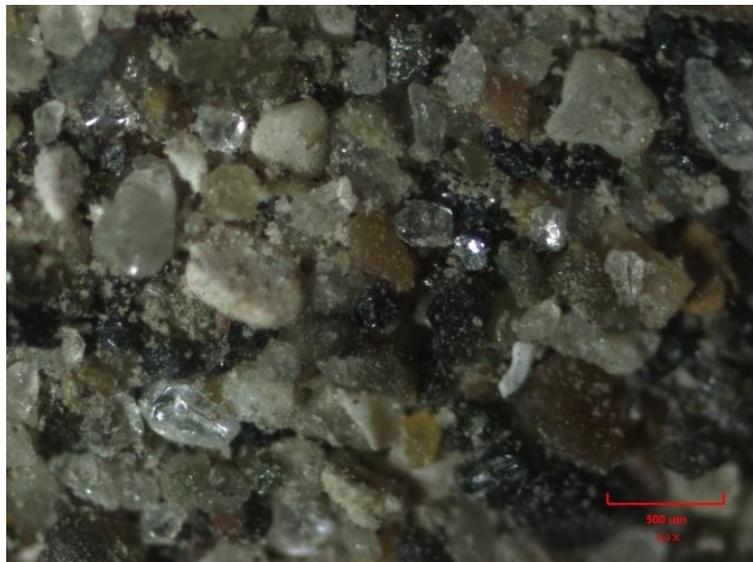
SP010B



SP011B

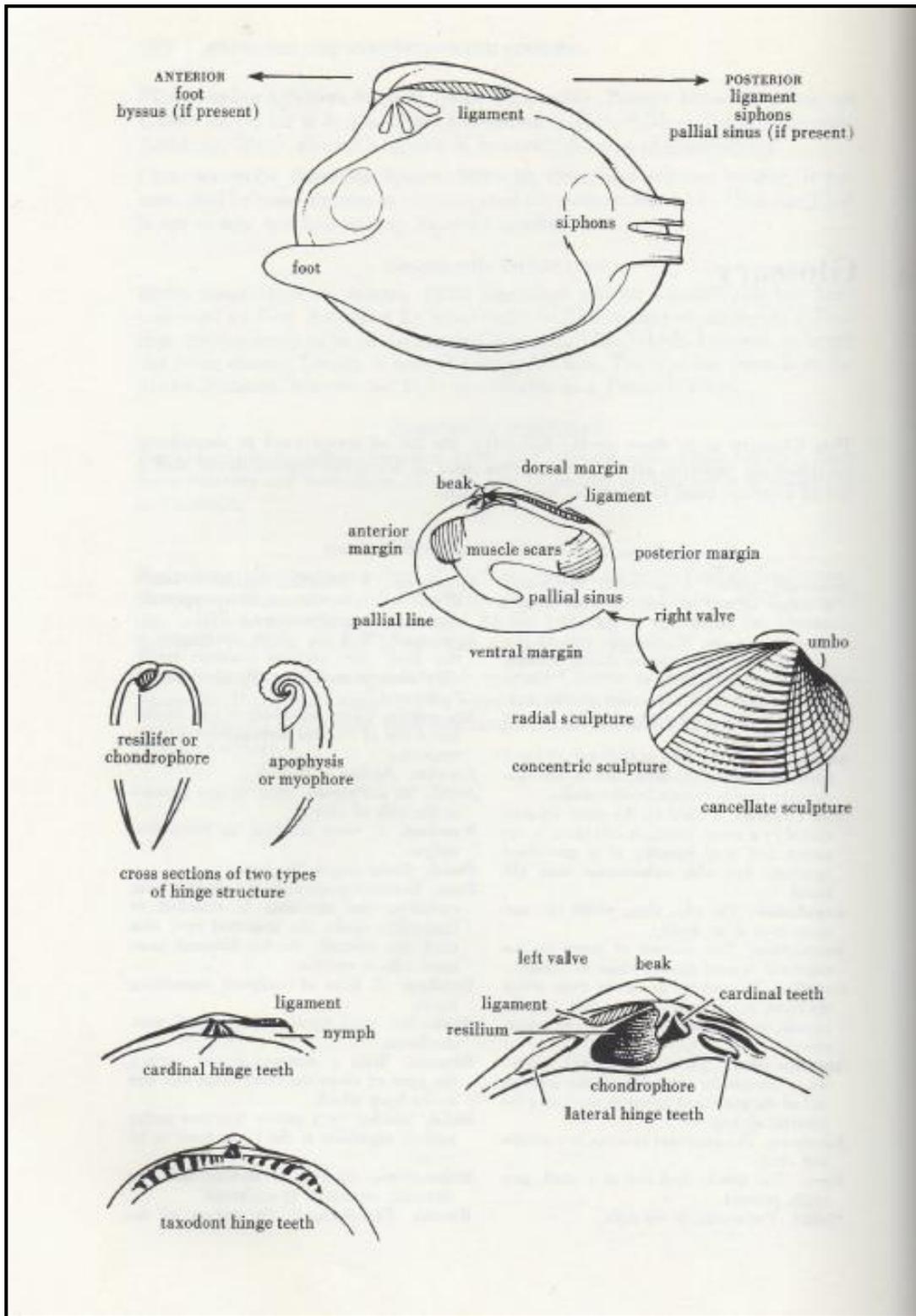


SP013B

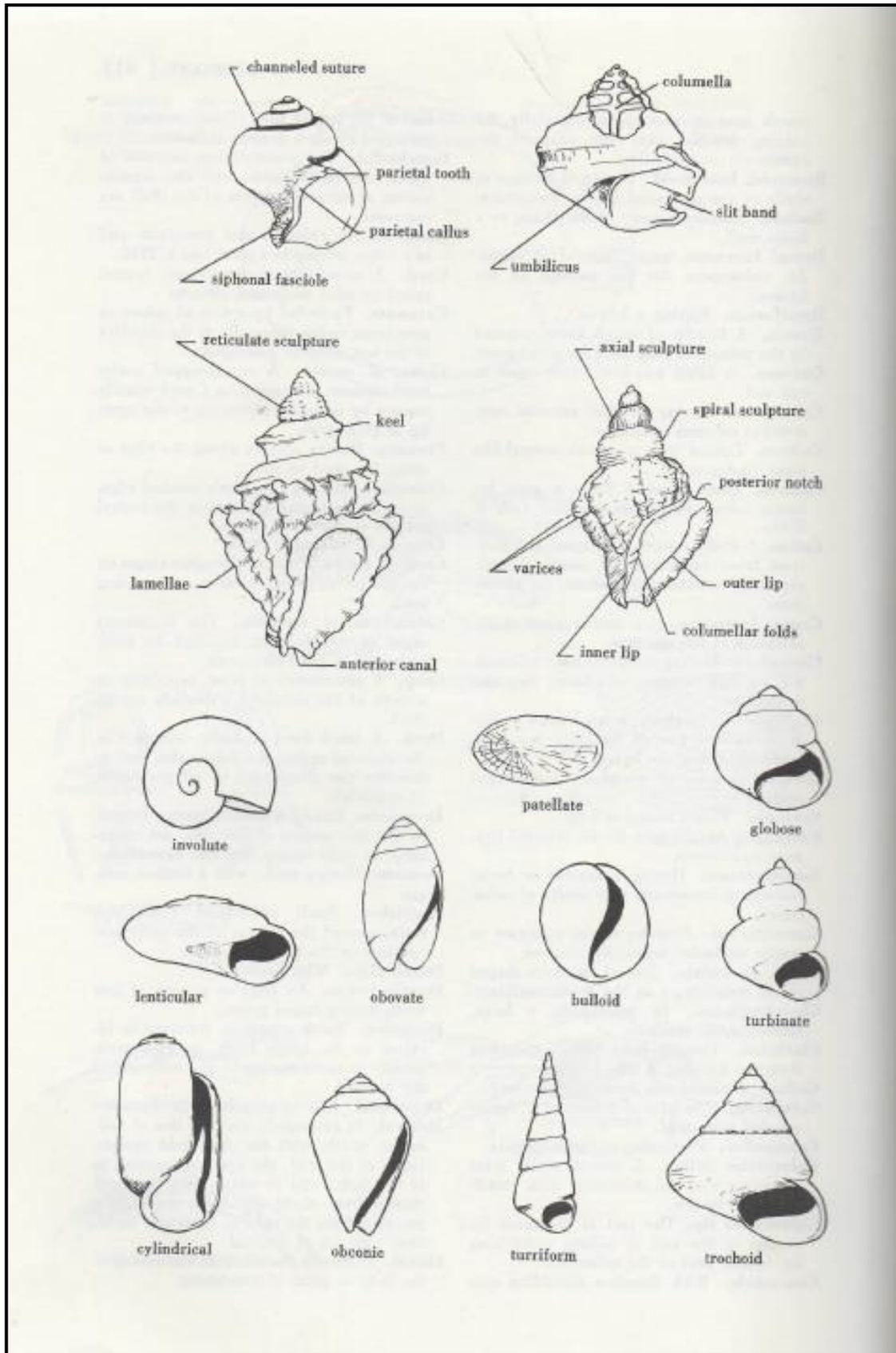


A3. Fotografía de las muestras para la descripción de los granos y minerales.

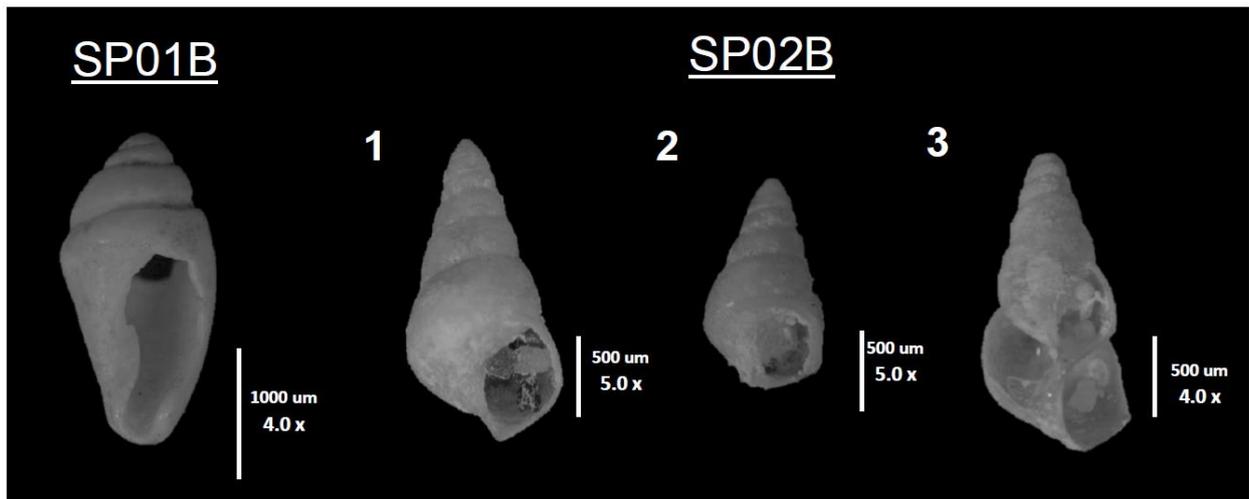
ANEXO C



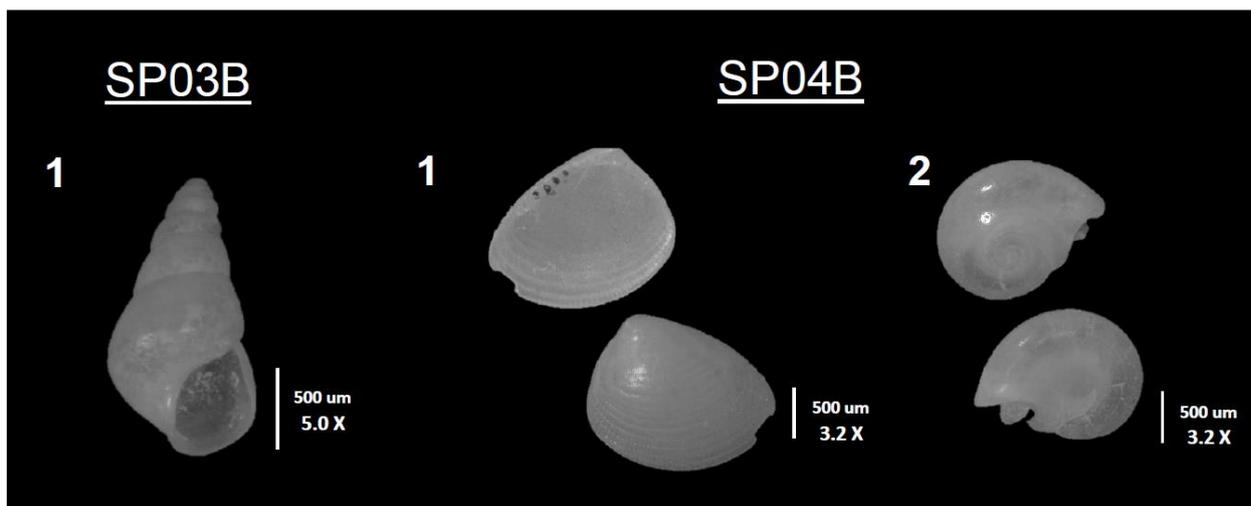
C1. Características morfológicas de los bivalvos (Keen, 1971).



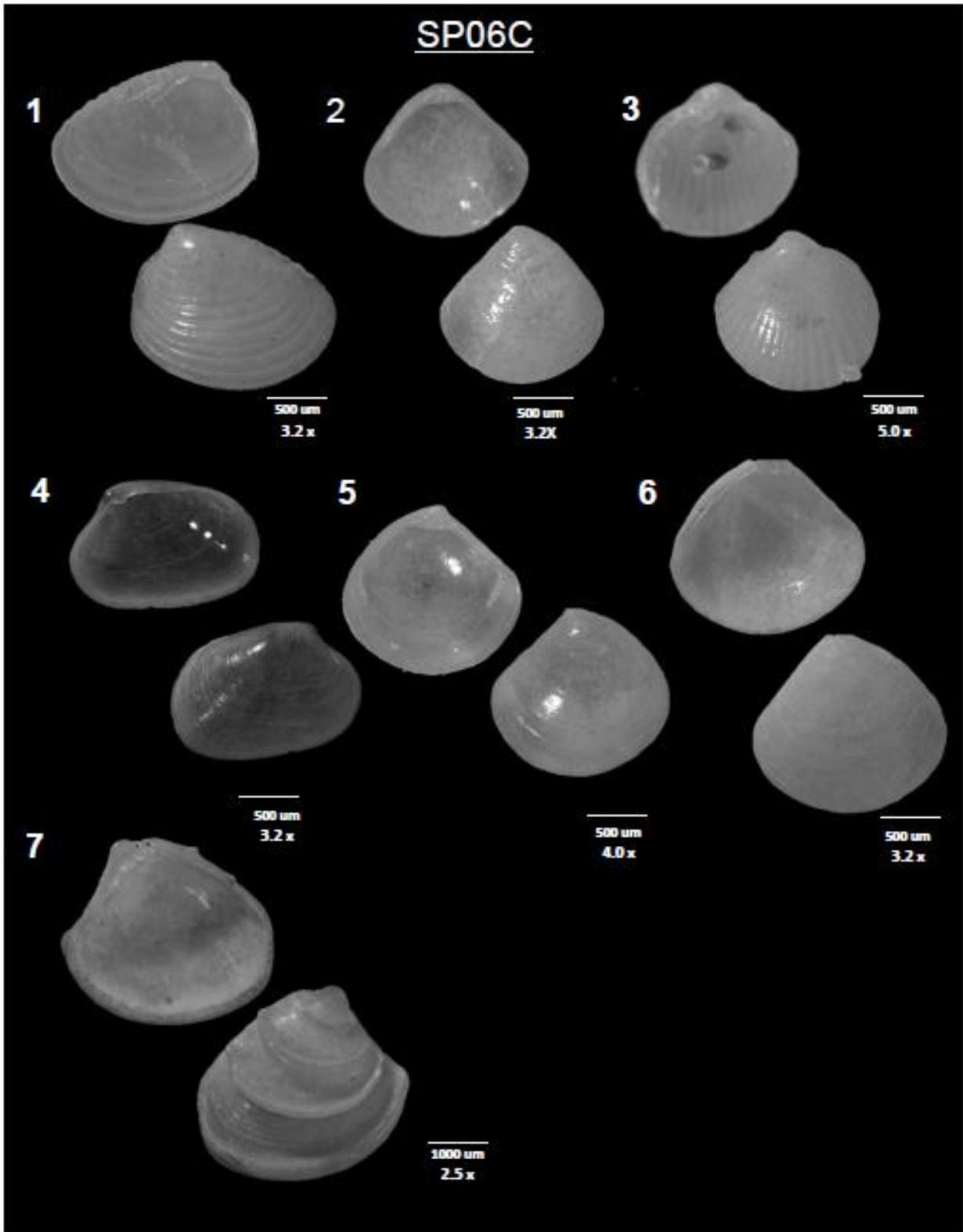
C2. Características morfológicas de los gasterópodos (Keen, 1971).



C3. Galería de moluscos gasterópodos o univalvos.

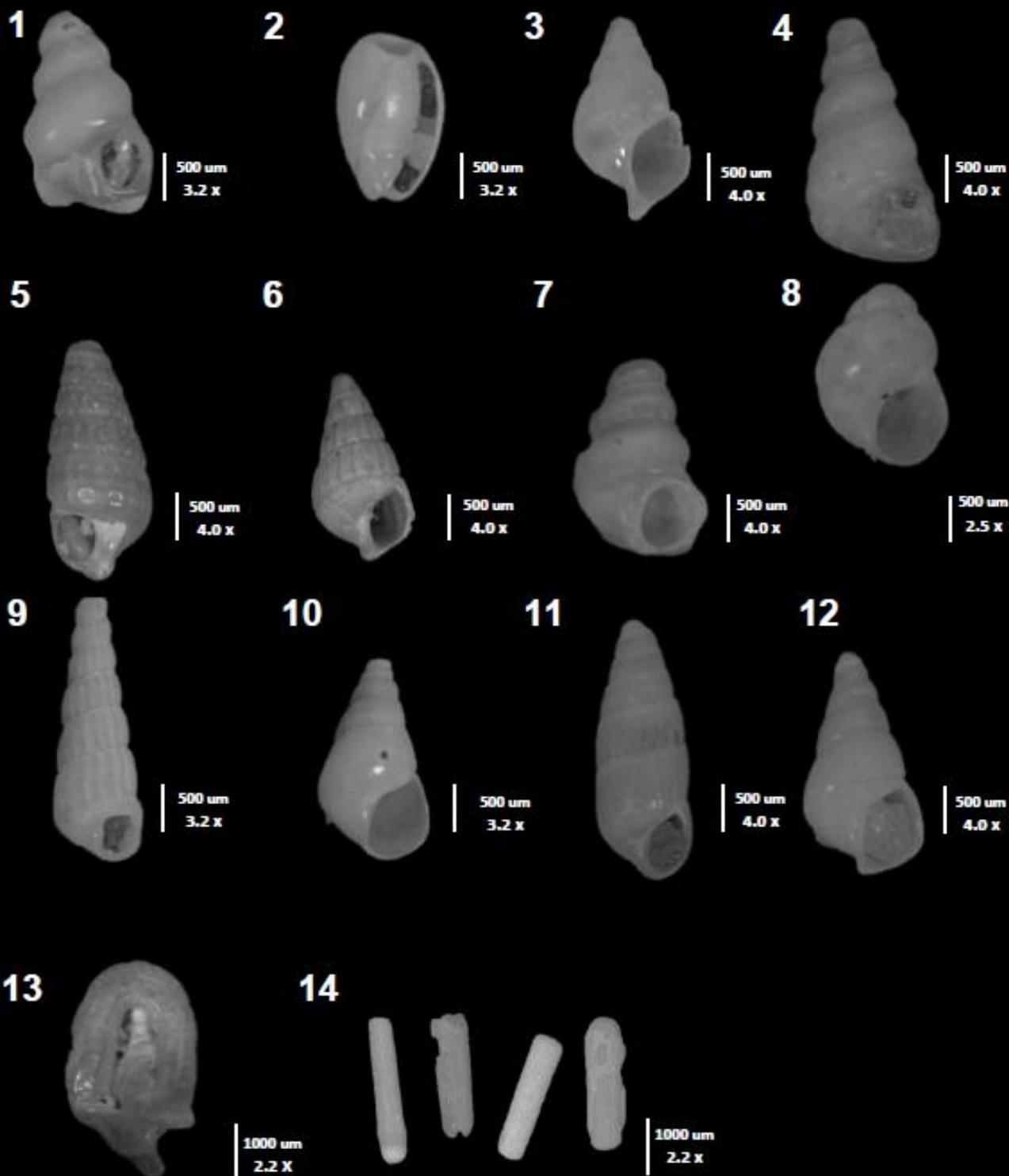


C4. Galería de bivalvos y gasterópodos. SP04B, 1: *Núcula exigua*.



C5. Galería de Bivalvos. SP06C: 1: *Núcula exigua*; 3: *Glycymeris sp.*; 2,5y6: *Crassinella varians*; 4: *Abra sp.*; 7: *Chione (Lirophora) sp.*

SP06C



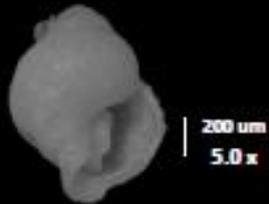
C6. Galería de Gasterópodos.

SP06B

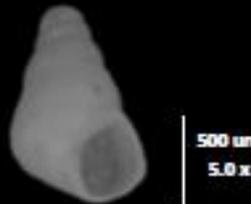
1



2



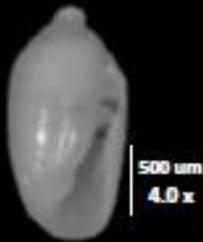
3



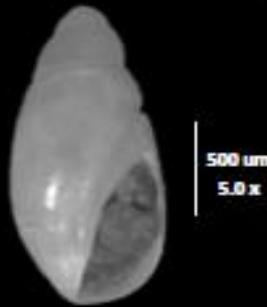
4



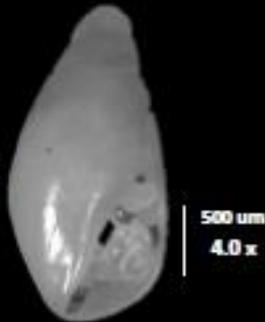
5



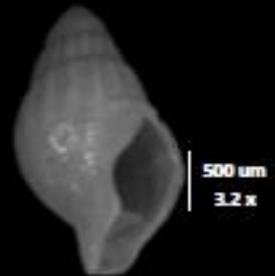
6



7



8



9



10



11



12



13



14

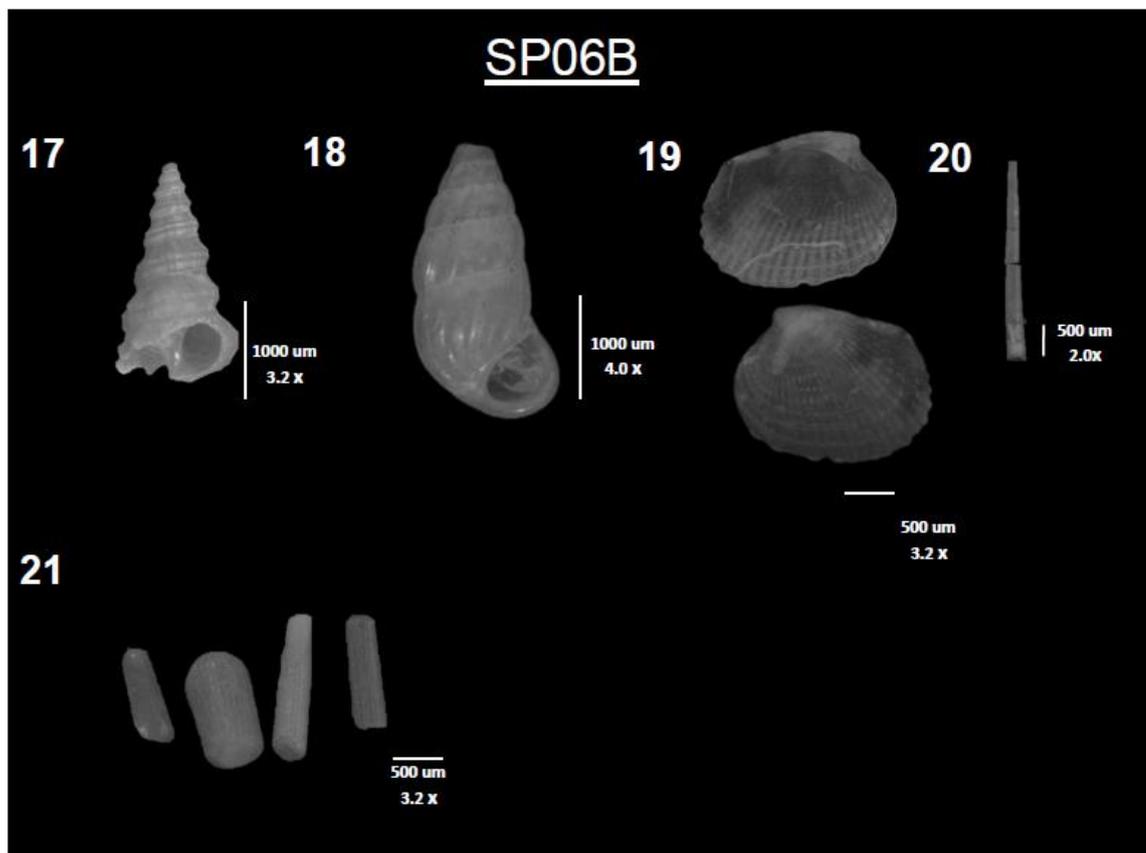


15

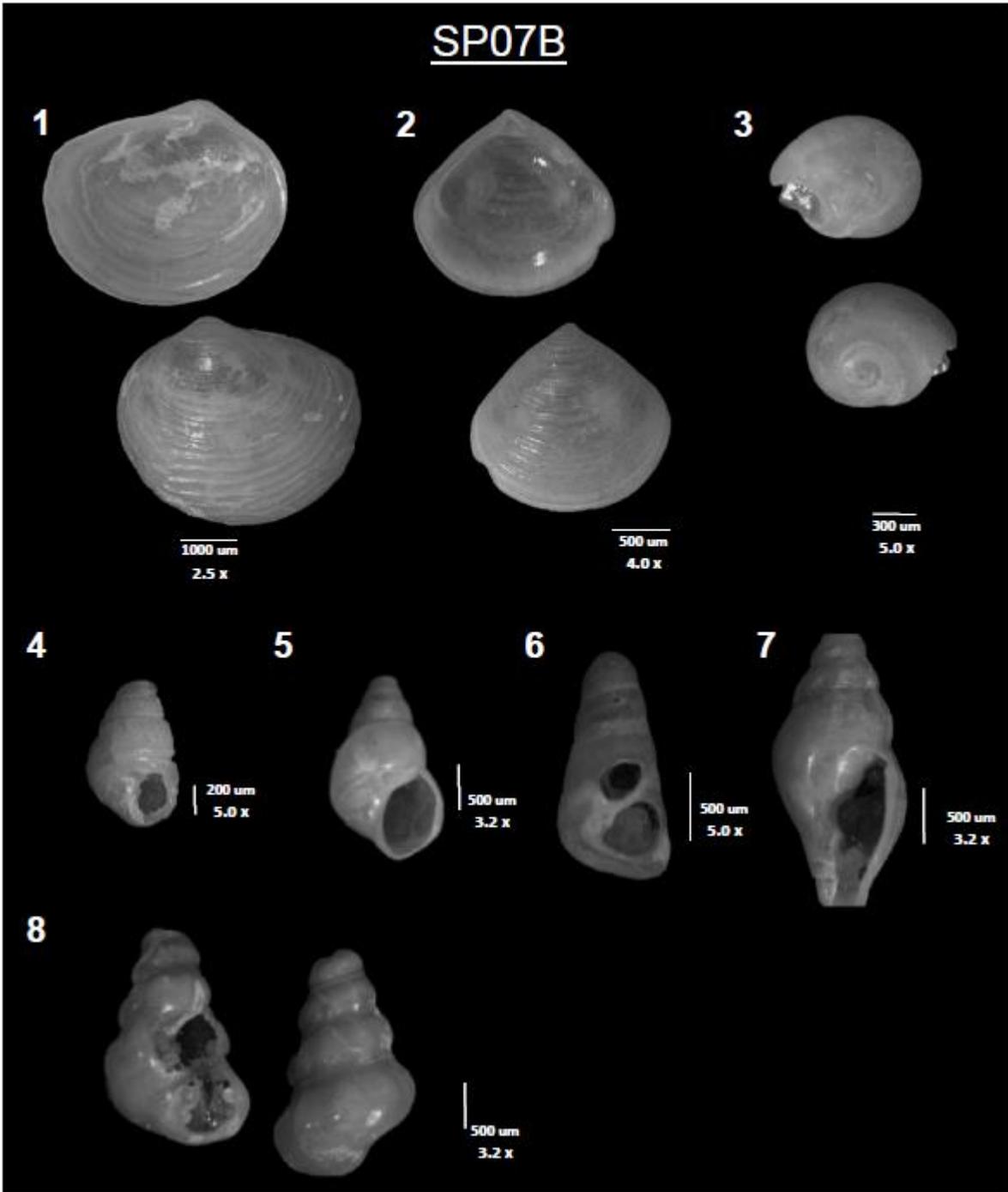


16

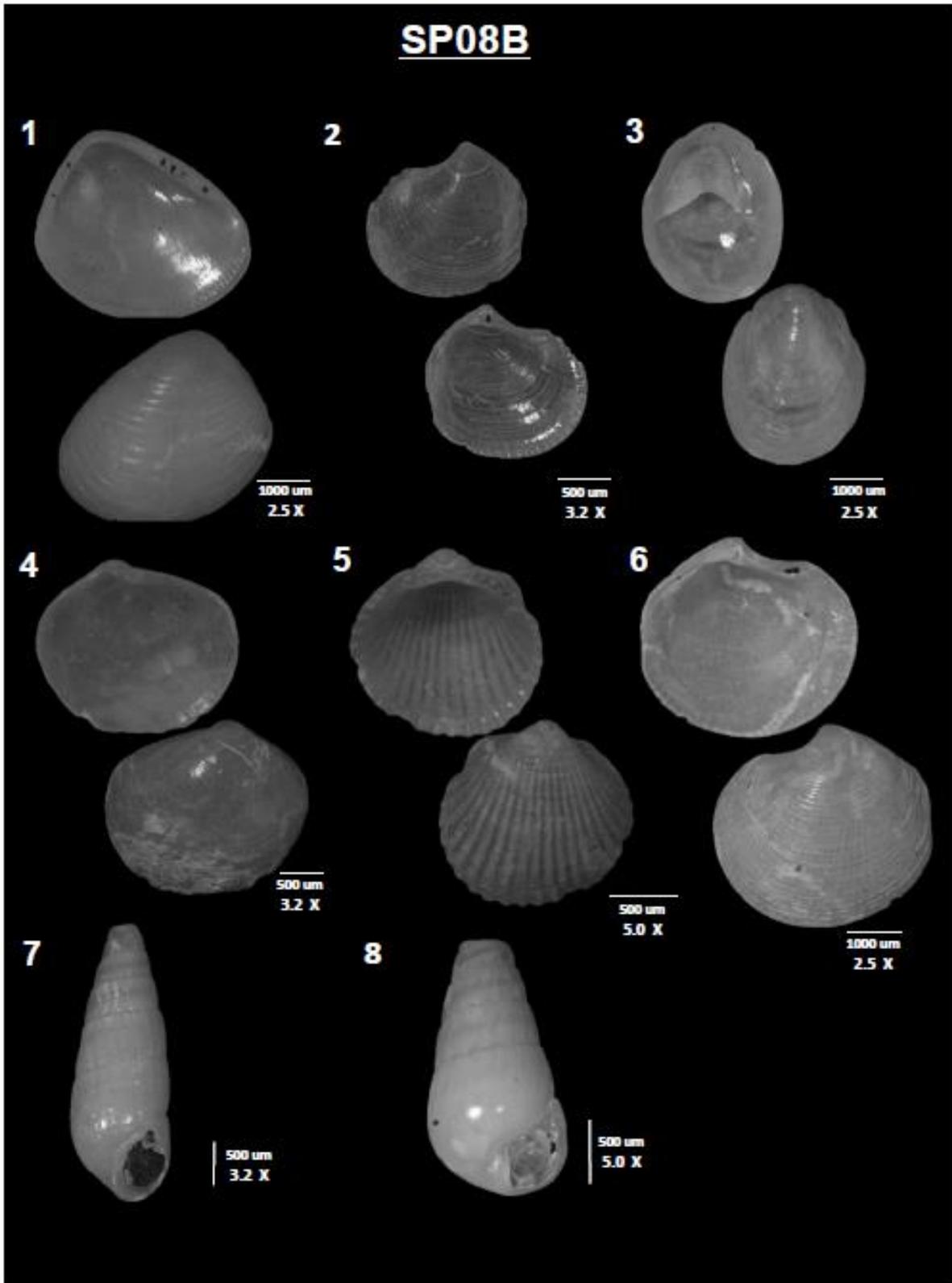




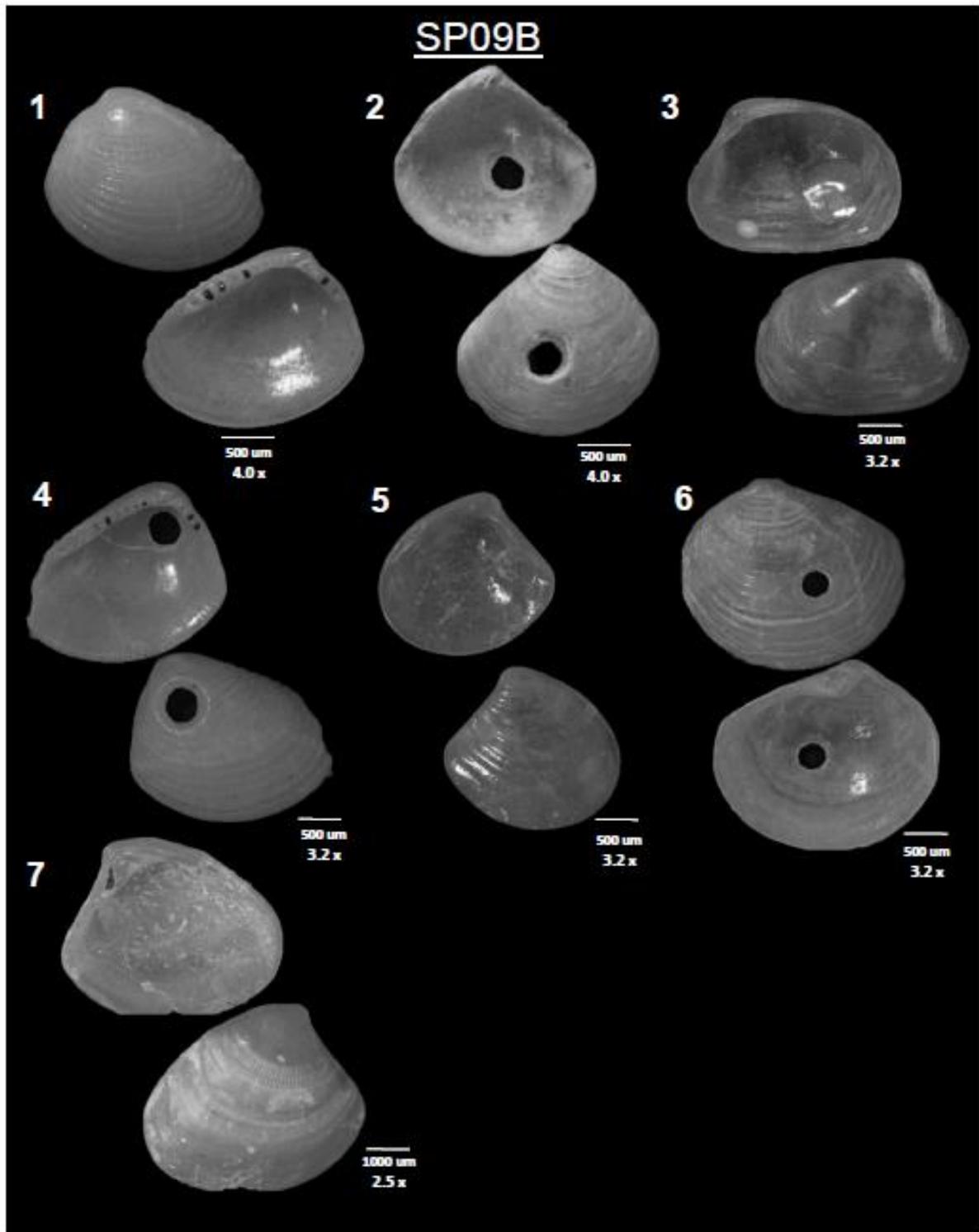
C7. Galería de gasterópodos, bivalvos y escafópodos. 20: *Dentalium cf. perstedii*.



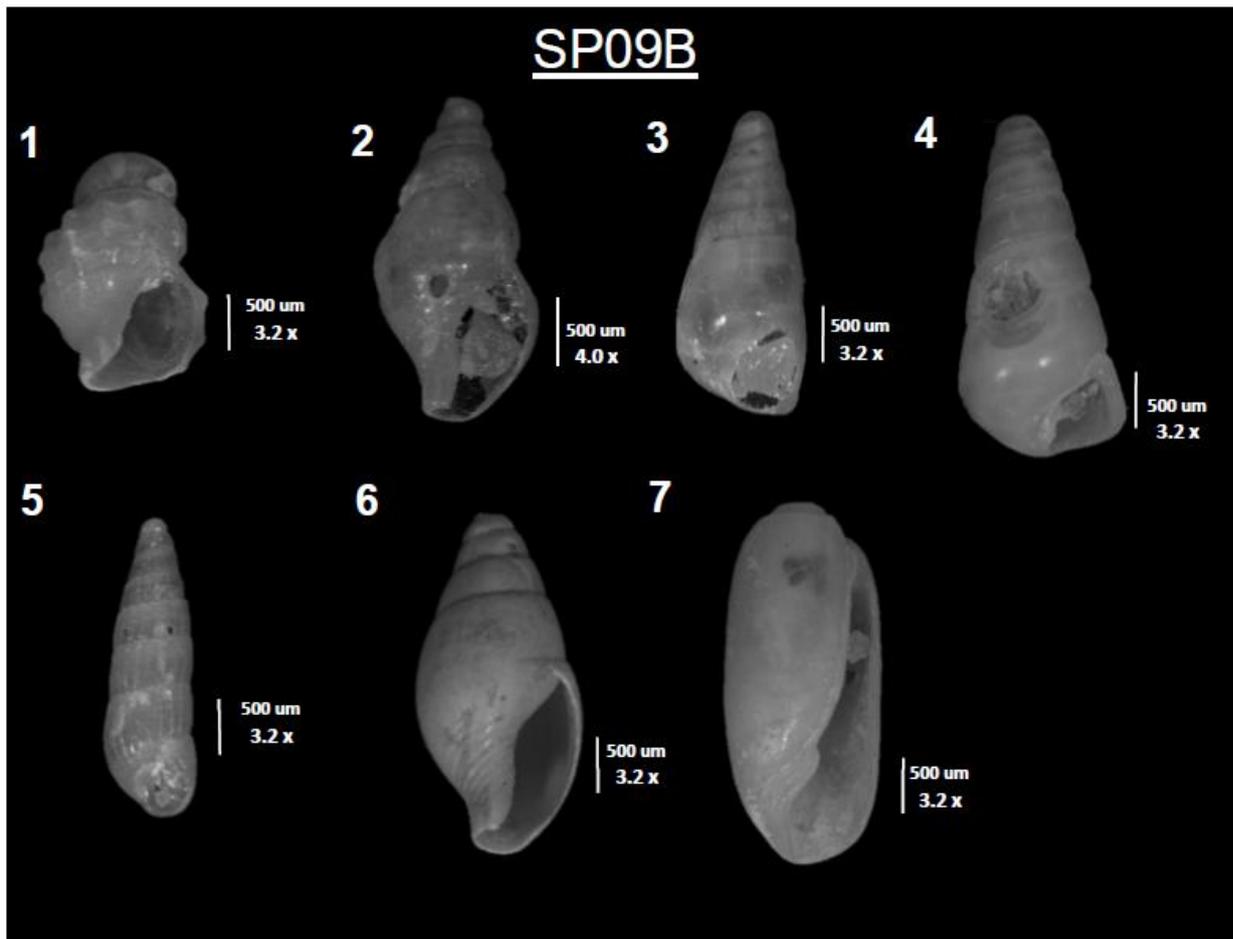
C8. Galería de bivalvos y gasterópodos. 1: *Odontogena* sp.; 2: *Crassinella varians*.



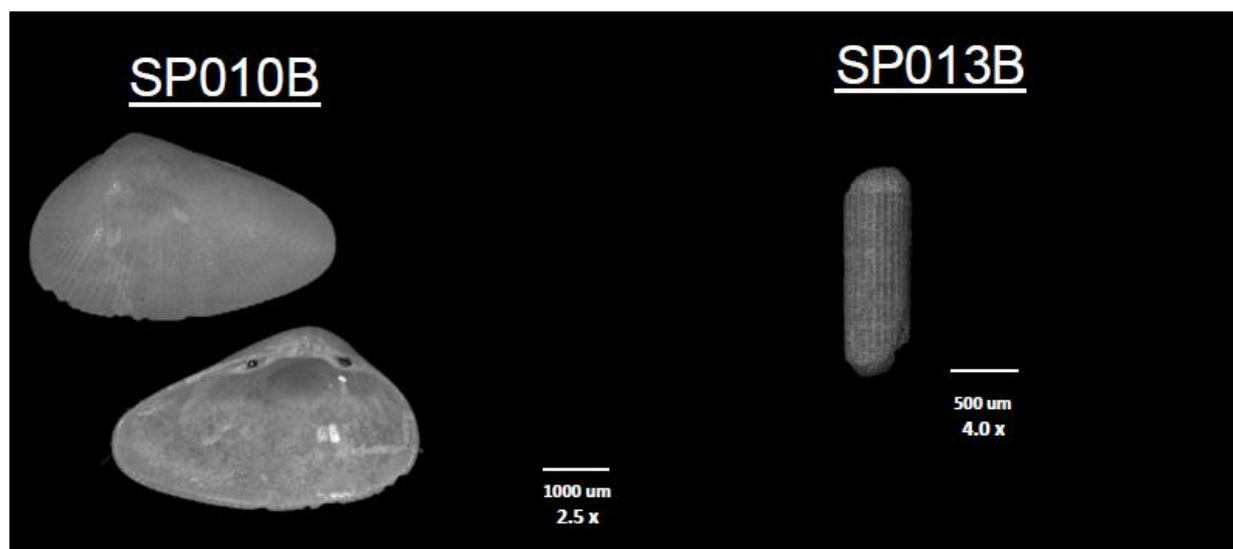
C9. Galería de bivalvos y gasterópodos. 1: *Núcula exigua*, 11 a 1900 m; 2, 6: *Lucina (Parvilucina) mazatlanica*, 4 a 1024 m; 5: *Glycymeris sp.*



C10. Galería de especímenes de bivalvos. 1y4: *Núcula exigua*; 2y5: *Crassinella varians*;
3: *Abra sp*; 6: *Odontogena sp*.



C11. Galería de especímenes de gasterópodos.



C12. Galería de moluscos. SP010B. 1: *Dónax* sp.

