

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**INFLUENCIA DE LA MINERALOGÍA, REDONDEZ, ESFERICIDAD Y  
RUGOSIDAD DE LOS GRANOS DE ARENA EN LA LICUEFACCIÓN  
DE SUELOS: ANÁLISIS MINERALÓGICO Y MORFOLÓGICO DE  
ARENAS DE CANCHAMANÁ, TAMBO DE MORA Y PARACAS (ICA –  
PERÚ)**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo**

**AUTOR:**

Richard Alexander Salazar Palomino

**ASESORA:**

Blanca Silvia Rosas Lizárraga


Lima, 2026

## Informe de Similitud

Yo, **Silvia Rosas Lizárraga**, docente de la **Facultad de Ciencias e Ingeniería** de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesora de la tesis titulada: **Influencia de la Mineralogía, Redondez, Esfericidad y Rugosidad de los Granos de Arena en la Licuefacción de Suelos: Análisis Mineralógico y Morfológico de Arenas de Canchamaná, Tambo De Mora y Paracas (Ica – Perú)**, del autor **Richard Alexander Salazar Palomino**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 13/1/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

San Miguel, Lima, miércoles 14 de enero de 2026

Apellidos y nombres de la asesora: Silvia Rosas Lizárraga	
DNI 06987148	Firma
ORCID: /0000-0002-9791-9499	

## DEDICATORIA

A mis padres, Diana y Robert, por su amor incondicional, por creer siempre en mí y por ser mi mayor fuente de apoyo y fortaleza.



## AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al equipo de Ingeniería Civil por su valioso apoyo y colaboración durante el desarrollo de esta tesis. En especial, agradezco al Dr. Guillermo Zavala y a su estudiante de maestría Dennys Taípe, quienes, en el marco de su investigación sobre la Evaluación de la resistencia a la licuación sísmica de arenas de distinta angularidad, rugosidad y mineralogía, facilitaron las muestras de campo estudiadas y brindaron el financiamiento para el ensayo de DRX. Esta colaboración permitió integrar el componente mineralógico y morfológico desarrollado en el presente trabajo dentro de su estudio principal.

Extiendo mi más profundo agradecimiento a la Dra. Silvia Rosas por depositar su confianza en mí, por su paciencia, sabiduría y constante acompañamiento a lo largo de este proceso. Sus valiosos consejos y orientación fueron fundamentales para la realización de esta investigación.

Asimismo, agradezco al ingeniero Pablo Valverde por el apoyo brindado en los análisis de SEM realizados en el Centro de Caracterización de Materiales de la PUCP, así como durante la preparación de las secciones delgadas y pulidas en el Laboratorio QEMSCAN de la PUCP. Su experiencia ha sido invaluable para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a la empresa BIZALAB, por su colaboración en el análisis de muestras mediante DRX,

A todos ustedes, muchas gracias por su apoyo y colaboración.

## RESUMEN

Las características morfológicas y mineralógicas de los suelos arenosos constituyen factores determinantes en su comportamiento geomecánico. Esta investigación emplea el análisis de imágenes bidimensionales para cuantificar la morfología de las partículas (redondez, esfericidad y textura superficial) de arenas provenientes de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora. Este análisis bidimensional se corroboró mediante imágenes tridimensionales obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM). Estos estudios se complementaron con análisis mineralógicos mediante difracción de rayos X (DRX) para determinar la composición mineral y evaluar la influencia conjunta de estos parámetros en el potencial de licuefacción medido a través de ensayos triaxiales cíclicos manteniendo una densidad uniforme y aplicando diferentes presiones de confinamiento para las arenas de cada localidad. Las arenas de Paracas, con mayor redondez, esfericidad y menor rugosidad, mostraron una menor resistencia a la licuefacción debido a una fricción intergranular reducida y un número limitado de puntos de contacto. En contraste, las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora, con una morfología más irregular, presentaron una mayor resistencia a este proceso. El análisis mineralógico destacó la relevancia de la predominancia de cuarzo como factor que incrementa la resistencia a la licuefacción de los suelos arenosos, siendo Paracas la zona con mayor proporción de este mineral (36%). A su vez, se demostró una consistencia entre los resultados mineralógicos, morfológicos y mecánicos de laboratorio y se subrayó la importancia de replicar los ensayos considerando la densidad de campo *in situ* propia de cada localidad, la cual varía tanto espacial como verticalmente. De esta manera, el presente estudio resalta la integración de análisis morfológicos y mineralógicos para el desarrollo de modelos más completos que permitan evaluar el comportamiento de suelos en regiones sísmicas.

Palabras clave: Redondez, Esfericidad, Textura superficial, Mineralogía, Análisis de imágenes, Licuefacción

## ABSTRACT

The morphological and mineralogical characteristics of sandy soils are determining factors in their geomechanical behavior. This research employs two-dimensional image analysis to quantify particle morphology (roundness, sphericity, and surface texture) of sands from Paracas, Canchamana, and Tambo de Mora. This two-dimensional analysis was corroborated through three-dimensional images obtained by scanning electron microscopy (SEM). These studies were complemented with mineralogical analyses by X-ray diffraction (XRD) to determine mineral composition and to evaluate the combined influence of these parameters on the liquefaction potential, assessed through cyclic triaxial tests conducted at a uniform density and under different confining pressures for the sands from each locality. The sands from Paracas, characterized by higher roundness, greater sphericity, and lower roughness, exhibited lower resistance to liquefaction, due to reduced intergranular friction and a limited number of contact points. In contrast, the sands from Canchamana and Tambo de Mora, with more irregular morphology, showed greater resistance to this process. The mineralogical analysis highlighted the relevance of quartz predominance as a factor that increases the liquefaction resistance of sandy soils, with Paracas presenting the highest proportion of this mineral (36%). Moreover, this research demonstrated consistency among mineralogical, morphological, and laboratory mechanical results, and emphasized the importance of replicating the tests considering the in situ field density of each locality, which varies both spatially and with depth. Thus, this study underscores the integration of morphological and mineralogical analyses for the development of more comprehensive models to evaluate soil behavior in seismic regions.

**Keywords:** Roundness, Sphericity, Surface Texture, Mineralogy, Image Analysis, Liquefaction.

## Tabla de contenidos

1. Introducción .....	1
2. Problemática y Justificación .....	2
3. Hipótesis .....	3
4. Objetivo del trabajo.....	3
5. Situación Geográfica y Geológica.....	5
5.1. Situación Geográfica.....	5
5.2. Situación Geológica.....	6
6. Definición de parámetros .....	8
6.1. Licuefacción de suelos.....	8
6.2. Distribución del tamaño de las partículas.....	8
6.3. Mineralogía de arenas.....	10
6.4. Estudio Morfológico de arenas .....	10
6.4.1. Redondez y Esfericidad: Fundamentos y Adaptaciones Metodológicas .....	10
6.4.2. Redondez.....	12
6.4.3. Esfericidad 2D .....	12
6.4.4. Rugosidad .....	13
6.4.5. Análisis digital de imágenes .....	13
7. Muestreo y Técnicas Analíticas.....	16
7.1. Muestreo .....	16
7.2. Preparación de las muestras.....	16
7.3. Técnicas analíticas.....	18
7.3.1. Microscopio petrográfico.....	18
7.3.2. Análisis de Imagen.....	19
7.3.2.1. Análisis en AutoCAD .....	20
7.3.2.2. Image J.....	23
7.3.3. Difracción de Rayos X - DRX.....	24
7.3.4. SEM-EDS .....	24
7.3.5. Equipo de ensayos triaxiales cíclicos.....	25
8. Resultados.....	26
8.1 Distribución de tamaño de partículas.....	26
8.1.1. Tamizaje Estándar.....	26
8.1.2. Diámetro del EQPC .....	27

8.2. Mineralogía de muestras – Microscopia óptica y DRX.....	30
8.3. Parámetros morfológicos .....	32
8.3.1. Redondez y esfericidad .....	32
8.3.2. Textura superficial .....	34
8.4. Ensayo triaxial cíclico.....	35
9. Discusión de resultados.....	36
9.1. Potencial de licuefacción de arenas de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora .....	36
9.2. Relación entre parámetros morfológicos y el potencial de licuefacción de arenas .....	37
9.2.1. Correlación de Redondez y Potencial de Licuefacción .....	37
9.2.2. Correlación de Esfericidad y Potencial de Licuefacción .....	38
9.2.2.1 Correlación de parámetros de Esfericidad .....	40
9.2.3. Correlación de Rugosidad y Potencial de Licuefacción .....	42
9.3. Correlación de Potencial de Licuefacción, Mineralogía y Parámetros Morfológicos. .	42
9.4. Implicancia de la Densidad de Campo.....	43
10. Validación de parámetros morfológicos – SEM.....	45
11. Conclusiones.....	48
12. Referencias.....	50
13. Anexos .....	55

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Licuefacción de suelos a causa del terremoto en Niigata (1964). Fuente web: <a href="https://www.sol-solution.com/es/article/prevencion-de-los-fenomenos-de-licuefaccion/">https://www.sol-solution.com/es/article/prevencion-de-los-fenomenos-de-licuefaccion/</a> .....	2
Figura 5.1: Mapa de Ubicación de las tres localidades de estudio. Mapa base tomado de Bing Satellite.....	5
Figura 5.2: Mapa de Calificación de Provincias según Niveles de Peligros Sísmicos. Tomado de Ministerio del Ambiente – MINAM (2003). Fuente web: <a href="https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-calificacion-provincias-segun-niveles-multiplicidad-peligros-peru">https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-calificacion-provincias-segun-niveles-multiplicidad-peligros-peru</a> .....	6
Figura 5.3: Mapa geológico 1:50000 de provincias de Pisco y Chincha. Modificado de Monge y Montoya (2003).....	7
Figura 6.1: Esquema de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). G = Grava. S = Arena. C = Arcillas. M = Limos. F = Finos. IPA = Índice de Plasticidad. LL = Límite Líquido. H = Alta compresibilidad. L = Baja compresibilidad. W = Bien gradadas. P = Mal gradadas. Fuente: <a href="https://ingeotecnica.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs">https://ingeotecnica.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs</a> .....	9
Figura 6.2: Diámetro del EQPC. Modificado de Altuhafi et al. (2013).....	10
Figura 6.3: Influencia de la distancia de transporte en la redondez y esfericidad de partículas. Fuente web: <a href="https://www.academia.edu/102587407/Understanding_Earth_Jhon_P_Grotzinger_7th_Edition">https://www.academia.edu/102587407/Understanding_Earth_Jhon_P_Grotzinger_7th_Edition</a> .....	11
Figura 6.4: Descriptores de la morfología de la partícula. A) Área proyectada de la partícula (A) y área de su envoltura convexa (Ac). B) Perímetro de círculo con área equivalente a la partícula. C) Área de un círculo con diámetro igual al diámetro máximo de Feret (dF) de la partícula. ....	16
Figura 7.1: Muestras de arena para estudio.....	16
Figura 7.2: A) Horno de secado. B) Tamizador Riffler. C) Endurecedor (izquierda) y Resina EpoFix (derecha). D, E) Bombas de vacío. F) Pulidora metalográfica “Struers”. G) Briquetas pegadas a porta objetos. H) Sierra de precisión. I) Carburo de silicio #600 y #1000. J) Microscopio Leica DM6000 B. K) Secciones delgado-pulidas.....	18
Figura 7.3: Microscopio Leica DM6000 B.....	19
Figura 7.4: Ilustración de los pasos utilizados en el proceso de análisis de imágenes.....	20
Figura 7.5: Partículas poligonizadas de Arena TM-01-M5 y sus respectivas capas.....	21
Figura 7.6: Partículas poligonizadas de Arena CM-01-M2 y sus respectivas capas.....	22
Figura 7.7: Ejecución del comando Threshold en partículas de la capa 4 poligonizadas de la Arena TM-01-M3.....	23
Figura 7.8: A) Micro Riffler rotatorio. B) Mortero de ágata. C) Difractómetro Bruker D4 Endeavor.....	24

Figura 7.9: A) Preparación de muestras para análisis por SEM. B) Microscopio electrónico de barrido (SEM) Quanta 650 .....	25
Figura 7.10: Equipo GDS Enterprise Level Dynamic Triaxial Testing System.....	26
Figura 8.1: Histogramas asimétricos de Diámetros EQPC para cada ubicación.....	29
Figura 8.2: Micrografías en modo nícoles cruzados. A) Arena TM-01-M5: Plagioclasas (plg) con colores de interferencia correctos. Cuarzos con interferencias variables: desde blanco esperado hasta colores anómalos. B) Arena CM-01-M2: Plagioclasa con color de interferencia adecuado. Cuarzo con color correcto, rodeado por otros con colores anómalos.....	30
Figura 8.3: Análisis DRX de arena CM-01-M3 realizado en el laboratorio BIZALAB.....	31
Figura 8.4: Análisis DRX de arena PA-01-M3 realizado en el laboratorio BIZALAB.....	32
Figura 8.5: Análisis DRX de arena TM-01-M5 realizado en el laboratorio BIZALAB.....	32
Figura 8.6: Gráfico de Perímetro vs. Área para cada ubicación.....	35
Figura 8.7: Curva CRR (Ratio de Resistencia cíclica) para presión de 200 kPa (10 m. de profundidad en esfuerzos totales y 20 m. de esfuerzo efectivo). CSR = Ratio de esfuerzos cíclicos.....	36
Figura 9.1: Datos estadísticos de redondez de arenas de Tambo de Mora, Canchamaná y Paracas.....	38
Figura 9.2: Datos estadísticos de esfericidad de arenas de Tambo de Mora, Canchamaná y Paracas.....	39
Figura 9.3: Diagrama de dispersión de parámetros de esfericidad utilizados. A = Partícula de arena TM-01-M5 (Cox = 0.4994; ASTM = 0.2747). B = Partícula de arena CM-01-M1 (Cox = 0.5162; ASTM = 0.29994). C = Partícula de arena TM-01-M2 (Cox = 0.64; ASTM = 0.9053). D = Partícula de arena PA-01-M1 (Cox = 0.6728; ASTM = 0.9133).....	41
Figura 9.4: Gráfica de número promedio de ciclos equivalentes versus escala de momento de terremotos. Modificado de Inris y Boulanger (1995).....	44
Figura 9.5: A. Desplazamiento lateral en Canchamaná. Tomado de Rodríguez-Marek et al., 2007. B: Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral en la zona de la Bajada del Socorro, Canchamaná. Tomado de Zavala et al., 2007.....	44
Figura 9.6: Curva CRR (Ratio de Resistencia cíclica) para presión de 200 kPa. Aumento de resistencia a la licuefacción de la arena de Paracas con una densidad media ( $D_r = 60\%$ ).....	45
Figura 10.1: Imagen SEM de arena de Paracas (PA-01-M3).....	46
Figura 10.2: Imagen SEM de arena de Canchamaná (CM-01-M3).....	47
Figura 10.3: Imagen SEM de arena de Tambo de Mora (TM-01-M5).....	47

## Índice de Tablas

Tabla 6.1: Parámetros morfológicos a analizar junto a su expresión matemática, rango y autor.....	15
Tabla 8.1: Tabla de resultados de tamizado de arenas por localidad (integrando las muestras de cada profundidad). Gs = Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo. SUCS = Sistema unificado de clasificación de suelos. D50 = Diámetro medio. Cu = Coeficiente de uniformidad. Cc = Coeficiente de curvatura. LL = Límite líquido. LP = Límite plástico.....	27
Tabla 8.2: Tabla con datos estadísticos de resultados de diámetro EQPC.....	28
Tabla 8.3: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Paracas.....	33
Tabla 8.4: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Canchamaná..	33
Tabla 8.5: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Tambo de Mora.....	34



## 1. Introducción

Las características morfológicas y mineralógicas de los suelos arenosos influyen directamente en el comportamiento de las estructuras terrestres, constituyendo un aspecto relevante en los campos de geología e ingeniería geotécnica. En este contexto, la licuefacción de suelos representa un fenómeno recurrente en diversas zonas del Perú, principalmente en zonas cercanas a afluentes naturales, donde se encuentran grandes depósitos de suelos granulares con niveles freáticos cercanos a la superficie. Debido a la licuefacción de suelos, pueden ocurrir grandes hundimientos del terreno, desplazamientos laterales, fallas de talud e incluso el colapso total de las estructuras construidas sobre dichos suelos (Figura 1.1). Para la comprensión y evaluación de este fenómeno, se han realizado numerosas investigaciones, principalmente a través de ensayos cíclicos de laboratorio que simulan el movimiento sísmico y permiten estudiar la resistencia de los suelos a la licuefacción.

En los últimos años, el estudio de las características morfológicas de las partículas se ha realizado mediante el uso de análisis de imágenes. Este término se refiere al análisis computacional y evaluación detallada de imágenes escaneadas. Según Chermant (2001), esta metodología integra diversos procesos como el procesamiento de señales, el reconocimiento de patrones, la inteligencia artificial y la estereología, siendo esta última crucial para inferir características tridimensionales a partir de mediciones bidimensionales. Estos avances han facilitado la evaluación precisa de la forma de los granos, mediante programas informáticos, tanto en dos dimensiones, como demuestran Mertens y Elsen (2006), como en tres dimensiones, según los estudios de Fernlund (2005).



Figura 1.1: Licuefacción de suelos a causa del terremoto en Niigata (1964). Fuente web: <https://www.sol-solution.com/es/article/prevencion-de-los-fenomenos-de-licuefaccion/>

## 2. Problemática y Justificación

Perú se ubica en la costa occidental de Sudamérica, en una zona de intensa actividad tectónica conocida como parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. Esta zona se caracteriza por la convergencia de la placa de Nazca y la placa Sudamericana, lo que provoca una alta frecuencia de sismos. A lo largo de su historia, el país ha experimentado numerosos terremotos devastadores que han desencadenado fenómenos secundarios como deslizamientos de tierra y licuefacción de suelos. Este último fenómeno, particularmente peligroso en zonas costeras y valles aluviales, ha causado daños significativos en infraestructura y edificaciones. Dada esta realidad, comprender la influencia de las propiedades de los granos de arena en la susceptibilidad a la licuefacción resulta fundamental para la evaluación y mitigación del riesgo sísmico en el territorio peruano.

En relación a este tema, tradicionalmente, las características morfológicas de las partículas, como esfericidad, redondez y relieve, se evalúan mediante observación visual y comparación con gráficos estandarizados como los de Krumbein (1951) y Powers (1953), resultando en una descripción cualitativa de la forma de los granos. Este método, aunque común, es laborioso, subjetivo y difícil de automatizar. En este contexto, el análisis de imagen bidimensional ha

surgido como una alternativa superior, ofreciendo, según Maerz (2004), ventajas significativas sobre los métodos físicos convencionales: mayor eficiencia en costos y tiempo, menor subjetividad y la capacidad de generar datos cuantitativos robustos para análisis estadísticos detallado. Así, evaluar las características morfológicas bajo esta metodología proporciona una herramienta más precisa y confiable para evaluar los parámetros de los suelos susceptibles a licuefacción.

### **3. Hipótesis**

Se postula que la resistencia a la licuefacción de un suelo depende de tres características fundamentales: su composición mineralógica, la morfología de sus partículas y su distribución granulométrica. No obstante, la densidad relativa del suelo constituye un factor crucial en dicha resistencia; por ello, es fundamental utilizar suelos con densidades relativas similares al realizar comparaciones y evaluar la influencia de estas tres propiedades.

Diversos estudios sugieren que los factores que aumentan esta resistencia incluyen un alto contenido de cuarzo y buena clasificación (Kramer, 1996), menor redondez (Kramer, 1996; Santamarina y Cho, 2004), mayor tamaño de grano, baja esfericidad y alta rugosidad (Lakkimsetti y Latha, 2023). Por el contrario, suelos con bajo contenido de cuarzo, mayor redondez, alta esfericidad, baja rugosidad y mala clasificación presentarían menor resistencia a la licuefacción, siendo esta aún más reducida cuando existe un alto contenido de arcillas (Idriss y Boulanger, 2006). Por lo tanto, se espera que las arenas que presenten una combinación de alto contenido de cuarzo, partículas con menor redondez, baja esfericidad y alta rugosidad, junto con una buena graduación, exhiban una mayor resistencia al fenómeno de licuefacción.

### **4. Objetivo del trabajo**

El objetivo principal de este estudio es evaluar la influencia de la mineralogía y las características morfológicas de arenas de Canchamaná, Tambo de Mora y Paracas, como

factores influyentes en la licuefacción de suelos en zonas de riesgo sísmico, mediante el análisis mineralógico y de imágenes bidimensionales.

Objetivos específicos:

- Caracterizar mineralógica y morfológicamente las arenas en estudio, bajo microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX).
- Analizar y comparar diversos métodos cuantitativos de medición de esfericidad, redondez y relieve de granos, planteados por diversos autores en la literatura científica.
- Presentar una metodología simple, confiable, relativamente económica y reproducible que pueda identificar, desde el análisis 2D, parámetros representativos de la morfología de suelos arenosos.
- Corroborar la precisión y fiabilidad de los parámetros obtenidos mediante el análisis de imágenes 3D, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) como método de validación.

## 5. Situación Geográfica y Geológica

### 5.1. Situación Geográfica.

El estudio se centra en tres localidades costeras ubicadas en el departamento de Ica, Perú (Figura 5.1). En la provincia de Chincha, distrito de Tambo de Mora, se localizan las zonas de Canchamaná ( $13^{\circ}26'22.3''S$ ,  $76^{\circ}10'53.7''O$ ) y Tambo de Mora ( $13^{\circ}27'23.5''S$ ,  $76^{\circ}10'58.7''O$ ). En la provincia de Pisco, distrito de Paracas, se ubica la localidad de Paracas ( $13^{\circ}50'30.4''S$ ,  $76^{\circ}15'20.1''O$ ). El acceso a estas zonas desde Lima se realiza a través de la Carretera Panamericana Sur, recorriendo 176 km hasta Canchamaná, 180 km hasta Tambo de Mora, y 247 km hasta el desvío hacia Paracas, donde se gira al oeste recorriendo 12 km adicionales.

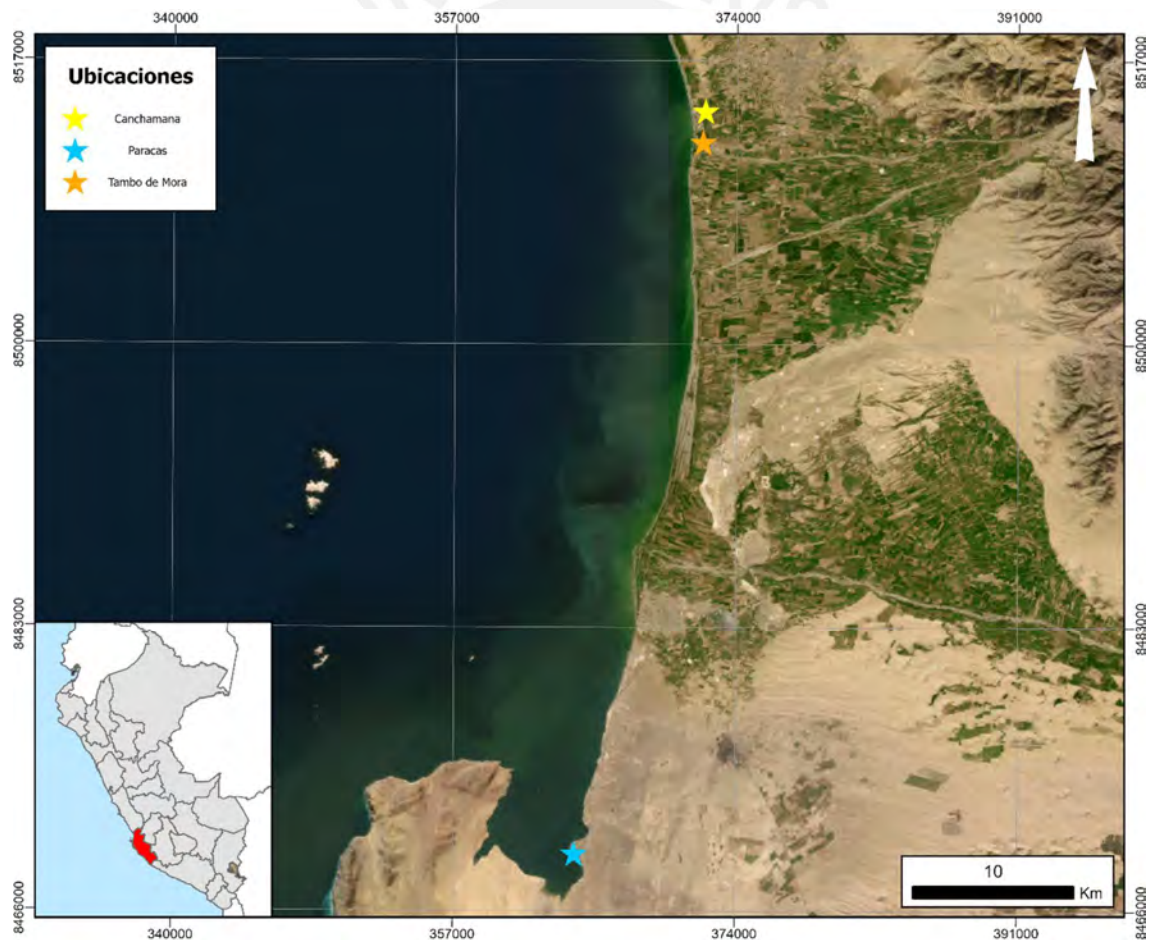


Figura 5.1: Mapa de Ubicación de las tres localidades de estudio. Mapa base tomado de Bing Satellite.

Las tres ubicaciones se sitúan en la línea costera y están clasificadas en un nivel de peligro sísmico alto según el Mapa de Calificación de Provincias según Niveles de Peligros Sísmicos

(Figura 5.2). Cabe destacar que, durante el terremoto de Pisco en 2007, tanto Canchamaná como Tambo de Mora experimentaron licuefacción de suelos.

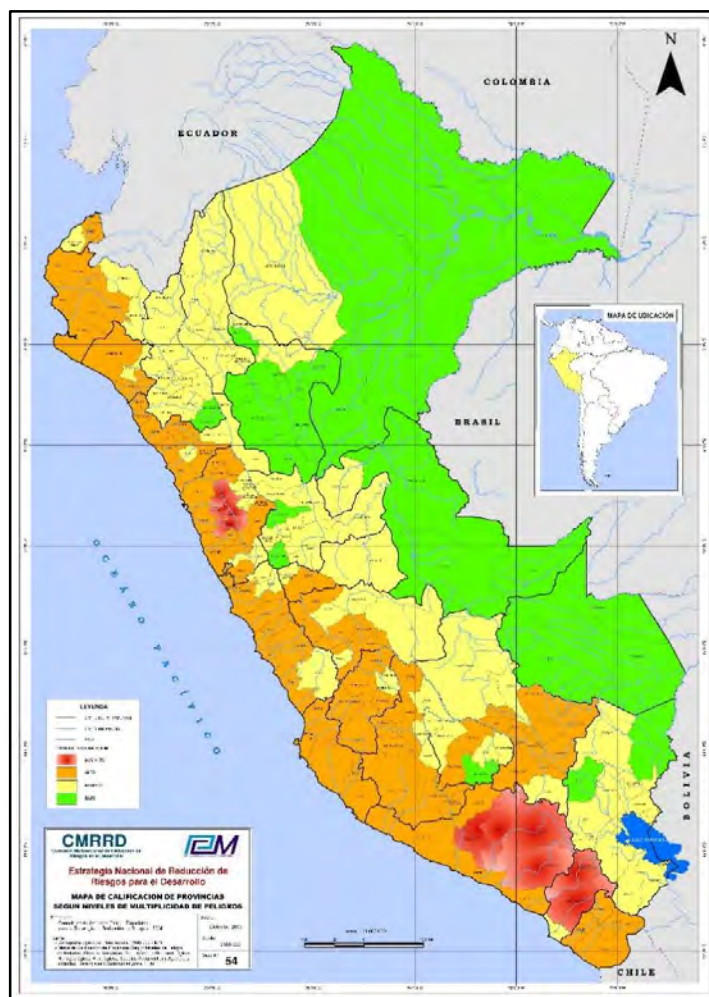


Figura 5.2: Mapa de Calificación de Provincias según Niveles de Peligros Sísmicos. Tomado de Ministerio del Ambiente – MINAM (2003). Fuente web: <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-calificacion-provincias-segun-niveles-multiplicidad-peligros-peru>

## 5.2. Situación Geológica

Según el Monge y Montoya (2003), las arenas de Paracas se clasifican como depósitos residuales y eólicos (Qh-re) pertenecientes a depósitos cuaternarios recientes (Figura 5.3). Estos depósitos se forman a partir de la intensa meteorización de la roca madre, que implica su descomposición física y química *in situ*. El resultado es un material no consolidado que cubre extensas áreas de la región. Cronológicamente, se estima que estos depósitos datan de un período comprendido entre el Holoceno-Megalayiano, como edad mínima, y el Pleistoceno-

Gelasiano, como edad máxima (hace aproximadamente 2.58 millones de años). Por otro lado, las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora se clasifican como depósitos aluviales (Qh-al) (Figura 5.3). Estos depósitos están compuestos principalmente por sedimentos finos como limos y arenas. Al igual que los depósitos de Paracas, su edad oscila entre el Holoceno-Megalayiano y el Pleistoceno-Gelasiano.

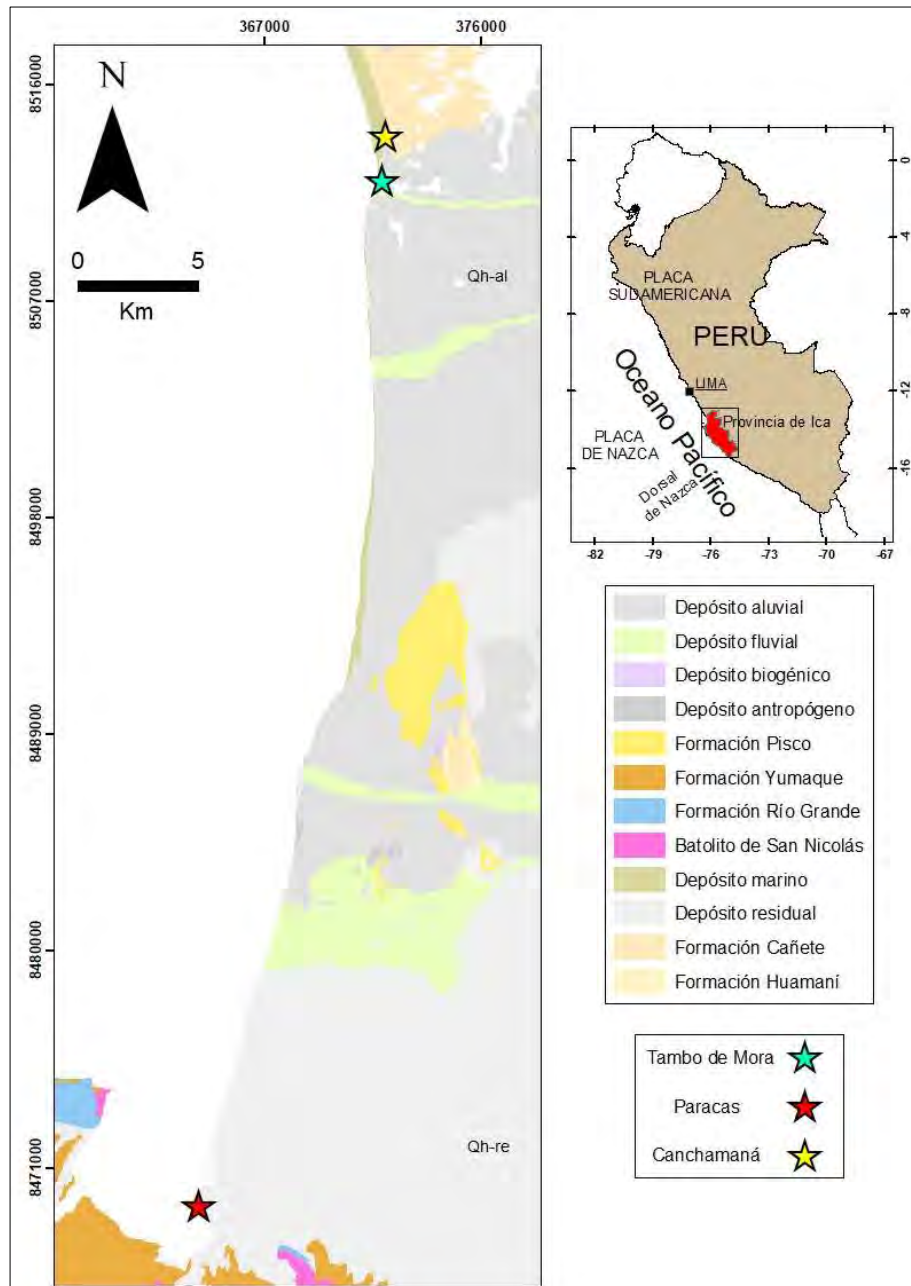


Figura 5.3: Mapa geológico 1:50000 de provincias de Pisco y Chincha. Modificado de Monge y Montoya (2003).

## **6. Definición de parámetros**

### **6.1. Licuefacción de suelos**

La licuefacción de suelos es un fenómeno que ocurre cuando el terreno experimenta una pérdida de resistencia al corte debido a la acción de cargas monotónicas o cíclicas, como las generadas por sismos. Durante este proceso, el suelo transita de un estado sólido a uno líquido por el aumento de la presión del agua intersticial entre sus granos, lo que reduce la tensión efectiva de confinamiento de las partículas a valores bajos o casi nulos. Los suelos más propensos a licuarse son limos y arenas finas de baja densidad con mala gradación. Esta última característica, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se refiere a una distribución similar del tamaño de partículas, o una buena clasificación desde el enfoque sedimentario. Este proceso de licuefacción se presenta especialmente cuando estos suelos se encuentran en zonas con un nivel freático cercano a la superficie y en áreas de actividad sísmica (Sladen et al., 1985). Según Nichols (2009), la susceptibilidad a la licuefacción de depósitos de suelo más antiguos es generalmente menor que la de depósitos más recientes.

### **6.2. Distribución del tamaño de las partículas**

La distribución de los tamaños de partículas influye en las características de respuesta del suelo, incluyendo el ángulo de resistencia al corte (Holtz y Kovacs, 1981), su capacidad de compresión y su susceptibilidad a la erosión interna (Kenney y Lau, 1985). Tradicionalmente, se utilizan tamices estandarizados para el análisis de esta distribución del tamaño de granos; sin embargo, esta técnica puede presentar limitaciones como la falta de información detallada entre los intervalos de los tamices (Allen, 1997). En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado métodos alternativos más avanzados para medir el tamaño de las partículas de arena. Estos incluyen técnicas como la difracción láser y la medición óptica de partículas individuales. Además, la automatización de los microscopios ha permitido analizar un número estadísticamente significativo de partículas.

Para evaluar la distribución de las dimensiones de las partículas, esta investigación empleó dos métodos complementarios. En primer lugar, se utilizó el método de tamizaje estándar para obtener la distribución granulométrica, a partir de la cual se calcularon el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ). Estos parámetros permiten clasificar a los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Según este sistema, un suelo se considera bien graduado si en el caso de las gravas presenta un  $C_u > 4$  y  $1 \leq C_c \leq 3$ ; y para las arenas,  $C_u > 6$  y  $1 \leq C_c \leq 3$ . De esta manera, los suelos granulares limpios (con menos de 5% de finos pasantes por tamiz N°200) se clasifican en cuatro tipos distintos: GW (gravas bien graduadas), GP (gravas mal graduadas), SW (arenas bien graduadas) y SP (arenas mal graduadas) (Figura 6.1). En segundo lugar, se aplicó el análisis de imágenes mediante el software ImageJ para determinar el diámetro del EQPC (Equivalent Projected Circle). Este parámetro corresponde al diámetro de un círculo cuya área es igual al área proyectada de la partícula (Figura 6.2), y es considerado una de las mejores medidas del tamaño global de la partícula (Altuhaf et al., 2013).

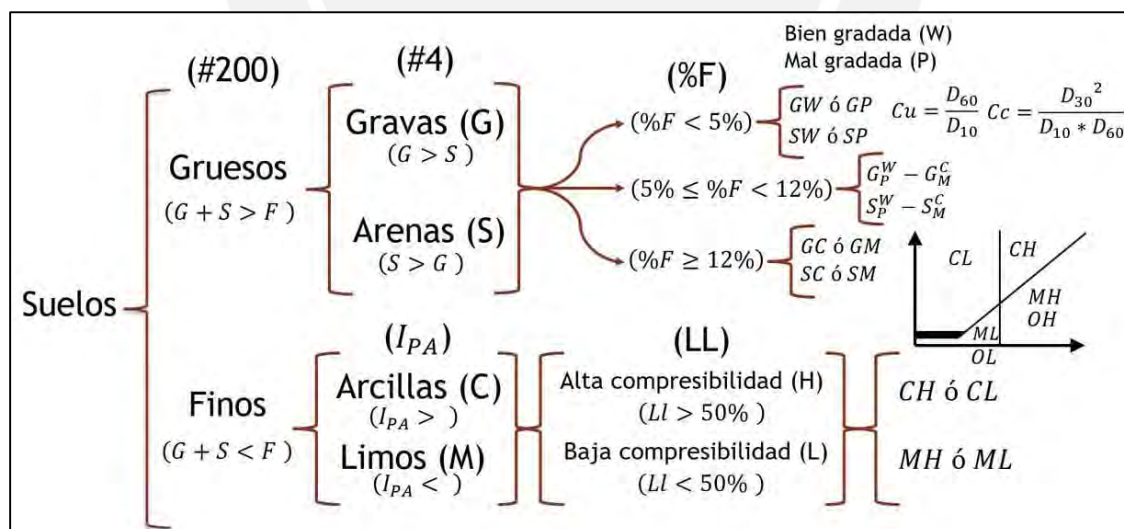


Figura 6.1: Esquema de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). G = Grava. S = Arena. C = Arcillas. M = Limos. F = Finos.  $I_{PA}$  = Índice de Plasticidad. LL = Límite Líquido. H = Alta compresibilidad. L = Baja compresibilidad. W = Bien graduadas. P = Mal graduadas. Fuente: <https://ingetecnica.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs>

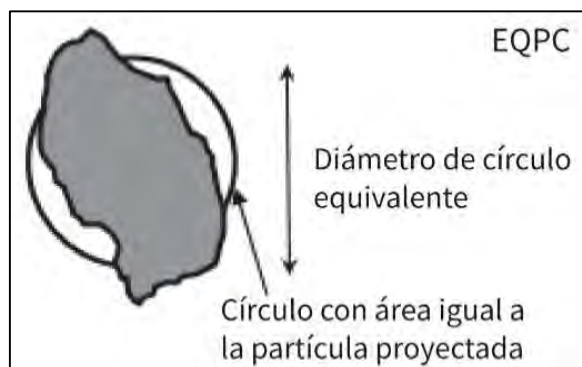


Figura 6.2: Diámetro del EQPC. Modificado de Altuhafi et al. (2013).

### 6.3. Mineralogía de arenas

Los granos de arenas se forman por la descomposición de rocas preexistentes, mediante la meteorización y erosión de estas, tratándose de arenas propias de sedimentos clásticos. Partículas de tamaño arena se forman también dentro del ambiente de deposición, principalmente en el caso de origen biogénico (Nichols, 2009). En cuanto a la composición mineralógica, Nichols señala que los minerales más abundantes en las arenas clásticas son cuarzo, feldspatos y micas, acompañados por minerales pesados como zircón, turmalina, rutilo y apatito, además de fragmentos líticos, en menor proporción. En el caso de origen biogénico, se observan bioclastos mineralógicamente compuestos por carbonatos. La caracterización mineralógica de las muestras se llevó a cabo mediante el análisis por difracción de rayos X (DRX).

### 6.4. Estudio morfológico de arenas

#### 6.4.1. Redondez y Esfericidad: Fundamentos y Adaptaciones Metodológicas

En el estudio morfológico de partículas, la redondez y la esfericidad se consideran características fundamentales. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas ecuaciones con distintas denominaciones para describir estas propiedades, lo cual puede generar confusión terminológica al momento de definir los parámetros de análisis. Para los propósitos de esta investigación, se considera a las definiciones de redondez que mejor nos indique el aspecto de la superficie en sus bordes. Una partícula se consideró como muy redondeada cuando sus

bordes estén totalmente pulidos. En cuanto a la esfericidad, este estudio buscó analizar todas las definiciones que mejor describan el grado de desarrollo equitativo en las tres direcciones espaciales de la partícula. Sin embargo, dado que se trabajó con imágenes proyectadas, se evaluó la esfericidad 2D o circularidad, referida a que tanto desarrollo se tiene en las dos direcciones de la partícula, donde una partícula esférica tendrá un mayor desarrollo en sus dos direcciones. Es importante destacar que estos parámetros son independientes entre sí, ya que puede existir una partícula elongada (poco esférica) con muy buena redondez (Figura 6.3).

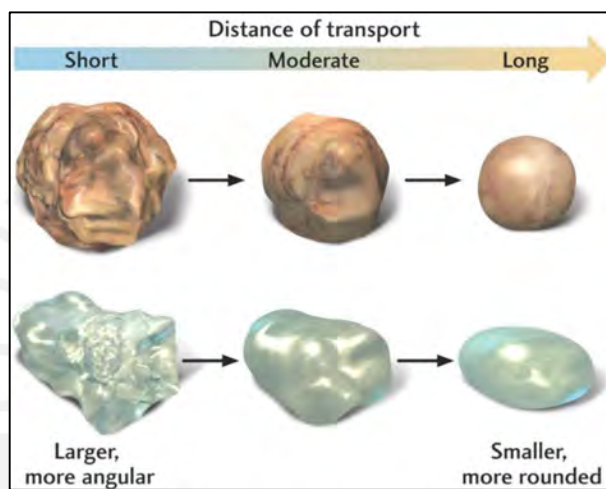


Figura 6.3: Influencia de la distancia de transporte en la redondez y esfericidad de partículas. Fuente web: [https://www.academia.edu/102587407/Understanding\\_Earth\\_Jhon\\_P\\_Grotzinger\\_7th\\_Edition](https://www.academia.edu/102587407/Understanding_Earth_Jhon_P_Grotzinger_7th_Edition)

A continuación, se detallarán los parámetros de redondez y esfericidad que se ajustan a los objetivos de esta investigación. Es relevante señalar que algunos parámetros que ciertos autores utilizan para evaluar la redondez, en el contexto de este estudio se interpretarán como medidas de esfericidad. Un ejemplo de esto es la circularidad de Cox, cuya fórmula mide cuánto se asemeja la partícula a un círculo perfecto, lo cual, para los propósitos de este estudio, se considera una medida de esfericidad. De manera similar, la redondez ASTM, que también cuantifica la semejanza de una partícula con un círculo, será tratada como una medida de esfericidad en este análisis.

### 6.4.2. Redondez

Una primera definición de la redondez se plantea como la relación entre el radio de la esquina más aguda y el radio de la esfera circunscrita mínima (Wentworth, 1922). Otra definición se basa en la relación del promedio de los radios de curvatura de las esquinas y el radio máximo de la esfera circunscrita (Wadell, 1932). Posteriormente, Krumbein (1951) y Powers (1953) desarrollaron tablas de comparación con límites de clase para determinar la redondez, proporcionando un método visual.

En cuanto a la angulosidad, mientras que muchos autores consideran a la angulosidad como el opuesto de la redondez, Lees (1964) la definió como una combinación de la relación angular entre los planos que delimitan una esquina y la distancia de la esquina al centro de la partícula, presentando un cuadro comparativo para su determinación visual. Mora y Kwan (2000) plantearon el parámetro de Convexidad. Este indicador ofrece una medición precisa de la concavidad general de una partícula, estableciendo una relación entre el área proyectada de la misma y el área de su envoltura convexa (Figura 6.4 A). En términos prácticos, una partícula con alto grado de redondez debería exhibir escasas esquinas cóncavas, lo que se traduciría en un valor de Convexidad (Cx) próximo a 1.

Más recientemente, Sukumaran y Ashmawy (2001) introdujeron dos nuevos factores basados en la segmentación de las partículas y sus ángulos: el factor de forma, que cuantifica la desviación del contorno general de la partícula respecto a un círculo perfecto, y el factor de angularidad, definido en función del número y la agudeza de las esquinas del polígono inscrito discretizado de la partícula.

### 6.4.3. Esfericidad 2D

El parámetro de esfericidad 2D, también denominado circularidad 2D, ha sido definido de diversas maneras por varios autores a lo largo del tiempo. Cox (1927) introdujo la “Circularidad de rite”, definida como el área de la partícula multiplicada por  $4\pi$  y dividida por

el cuadrado de su perímetro, aplicada al análisis de granos deformados en rocas. Posteriormente, Rittenhouse (1943) propuso considerarla como la relación entre el diámetro del círculo con área igual a la proyección de la partícula y el diámetro del círculo más pequeño circunscrito a esta. Krumbein (1951) simplificó el concepto a la relación entre el ancho y el largo de la partícula, incorporando cuadros de comparación visual. Recientemente, se define el factor de redondez ASTM, establecido en la norma ISO 9276-6 (ISO 2008), como la relación entre el área de la partícula y el área de un círculo cuyo diámetro es igual al diámetro máximo de Feret de la partícula (Figura 3.4 C). En las definiciones de Cox, Rittenhouse y la norma ISO, la relación oscila entre 0 y 1, donde 0 representa una partícula alargada y 1 indica una partícula muy esférica o un círculo ideal.

#### **6.4.4. Rugosidad**

La textura superficial o rugosidad se refiere a las minúsculas irregularidades que presenta una superficie en comparación con una superficie totalmente lisa y uniforme.

Para la medición de este parámetro, Carr et al. (1992) utilizaron la teoría de la dimensión fractal propuesta por Mandelbrot (1977). Estos autores, desarrollaron ecuaciones específicas para calcular formas de granos esféricos, cúbicos y piramidales.

Posteriormente, Hyslip y Vallejo (1997) introdujeron el método de área-perímetro para evaluar la dimensión fractal de rugosidad (DR) de los materiales granulares. Este método se fundamenta en el análisis de imágenes para obtener el área y el perímetro de las proyecciones de las partículas. La DR se calcula como  $2/m$  donde  $m$  es el coeficiente angular o pendiente del gráfico Área vs. Perímetro de las partículas proyectadas. Un valor más elevado de DR indica una mayor rugosidad en la superficie de la partícula.

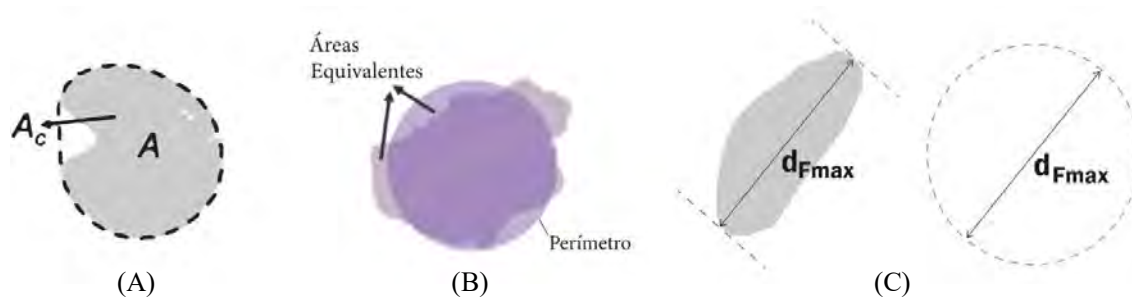


Figura 6.4: Descriptores de la morfología de la partícula. A) Área proyectada de la partícula (A) y área de su envoltura convexa ( $A_c$ ). B) Perímetro de círculo con área equivalente a la partícula. C) Área de un círculo con diámetro igual al diámetro máximo de Feret ( $d_F$ ) de la partícula.

#### 6.4.5. Análisis digital de imágenes

La integración de tecnologías de imagen digital en la mayoría de los microscopios electrónicos y ópticos ha incrementado significativamente la accesibilidad de los procesos de cuantificación morfológica de partículas y materiales granulares en la actualidad (Anselmetti, 1998). La cuantificación y el análisis de las dimensiones, formas y distribución de partículas se han abordado eficazmente mediante tres enfoques principales: (i) la implementación de programación avanzada utilizando lenguajes especializados como C++ y Visual Basic o softwares con módulos específicos de procesamiento de imágenes como Matlab; (ii) la utilización de softwares comerciales de procesamiento de imágenes como Image-Pro Plus® que incorporan funciones morfológicas y capacidades de programación para la automatización de procedimientos; y (iii) el empleo de programas de procesamiento de imágenes de código abierto y acceso gratuito, destacando entre ellos ImageJ. Este último ofrece la ventaja significativa de realizar mediciones automatizadas en múltiples imágenes mediante la ejecución de macros, los cuales consisten en comandos específicos y variables ajustables a protocolos establecidos, permitiendo generar mediciones precisas de diversos parámetros de las partículas, como el área, el perímetro, y las dimensiones del rectángulo delimitador (ancho y alto). La elevada precisión de las escalas de imagen y la alta densidad de datos obtenidos permiten realizar observaciones y mediciones que integran parámetros de redondez, esfericidad

y rugosidad, proporcionando una caracterización morfológica consistente de las partículas analizadas.

En el marco de esta investigación, se realizó un análisis morfológico de las arenas mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Este estudio abarcó tres aspectos fundamentales de las partículas: la redondez, evaluada a través del parámetro de Convexidad propuesto por Mora y Kwan (2000); la esfericidad 2D, analizada mediante la circularidad de Cox y el factor de redondez ASTM; y la textura superficial, examinada con el método de área-perímetro desarrollado por Hyslip y Vallejo (1997). La Tabla 6.1 proporciona una síntesis detallada de estos parámetros, incluyendo sus fórmulas correspondientes, los autores que los propusieron y sus respectivos rangos de evaluación.

Tabla 6.1: Parámetros morfológicos a analizar junto a su expresión matemática, rango y autor.

Propiedad	Expresión matemática	Autor	Rango
<b>Redondez</b>	$C_x = A/A_c$ (A = Área de la partícula; A <sub>c</sub> = Área de la envoltura convexa)	Mora y Kwan, 2000	0 - 1
<b>Esfericidad-2D</b>	$E_w = \frac{\text{Perímetro de la partícula}}{2 \times \pi \times \sqrt{\frac{\text{Área de partícula}}{\pi}}}$	Wadell, 1932	0 - 1
	$S_f = 4\pi A/P^2$ (A = Área de la partícula; P = Perímetro)	Cox, 1927	0 - 1
	$R_{ASTM} = A/A_{fmax}$ (A = Área de la partícula; A <sub>fmax</sub> = Área de un círculo con un diámetro igual al diámetro máximo de Feret)	ASTM F1877, ISO 9276-6	0 - 1
<b>Textura Superficial</b>	$D_r = 2/m$ (m = Coeficiente angular o pendiente de la línea log(área)-log(perímetro))	Hyslip y Vallejo (1997)	0 - ∞

## 7. Muestreo y Técnicas Analíticas

### 7.1. Muestreo

Para esta investigación, se tomaron un total de diez muestras de arena: tres muestras de Canchamaná, cuatro de Tambo de Mora y tres de Paracas (Figura 7.1). El anexo I presenta la lista de muestras estudiadas, especificando su procedencia y la profundidad de extracción.



Figura 7.1: Muestras de arena para estudio.

### 7.2. Preparación de las muestras

Para el análisis mineralógico y morfológico de las arenas, se fabricaron un total de diez secciones delgado-pulidas en las instalaciones del laboratorio QEMSCAN de la carrera de Ingeniería de Geológica en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

El proceso de preparación de las secciones delgado-pulidas se dio de la siguiente manera:

- a. Las muestras recolectadas de los sitios de estudio presentaban un exceso de humedad, por ello se sometieron a un proceso de secado a 70°C durante 24 horas (Figura 7.2A).

- b. Se seleccionó una porción representativa de cada muestra utilizando un cuarteador rotatorio Riffler (Figura 7.2B). Los pesos exactos de cada muestra se encuentran en el Anexo II.
- c. Cada porción, se mezcló con resina y endurecedor en una copa como recipiente (Figura 7.2C). La proporción de estas sustancias debe estar en relación de 7 a 1 (resina: endurecedor) y la mezcla se deberá realizar a una velocidad lenta y de manera uniforme formando figuras de 8 en la base por un periodo de cinco minutos.
- d. La copa se insertó en una bomba de vacío en la que se liberan las burbujas de aire que se formaron durante la mezcla (Figura 7.2D). Esta liberación de burbujas se debe supervisar constantemente por 10 minutos. Se dejará reposar la muestra en otra bomba de vacío por 24 horas (Figura 7.2E).
- e. El proceso de pulido se realizó utilizando la pulidora metalográfica de marca “Struers” (Figura 7.2F) utilizando los discos de categoría MD-System. Primero con el MD-Piano 220, luego con el MD-Piano 1200.
- f. Las briquetas obtenidas se pegaron a un portaobjeto y se dejaron reposar por 24 horas (Figura 7.2G).
- g. Se procedió a realizar el recorte de las briquetas en la sierra de precisión (Figura 7.2H). Cuando se obtuvo el resultado, se procedió a pulir manualmente las secciones con Carburo de silicio primero de #600 y luego de #1000 (Figura 7.2I).
- h. Como etapa pre-final del proceso, se realizó un control de calidad verificando en el microscopio petrográfico los colores de interferencia correctos para cada mineral (Figura 7.2J). Finalmente, se obtuvieron las secciones delgado-pulidas listas para su análisis e interpretación petrográfica (Figura 7.2K).

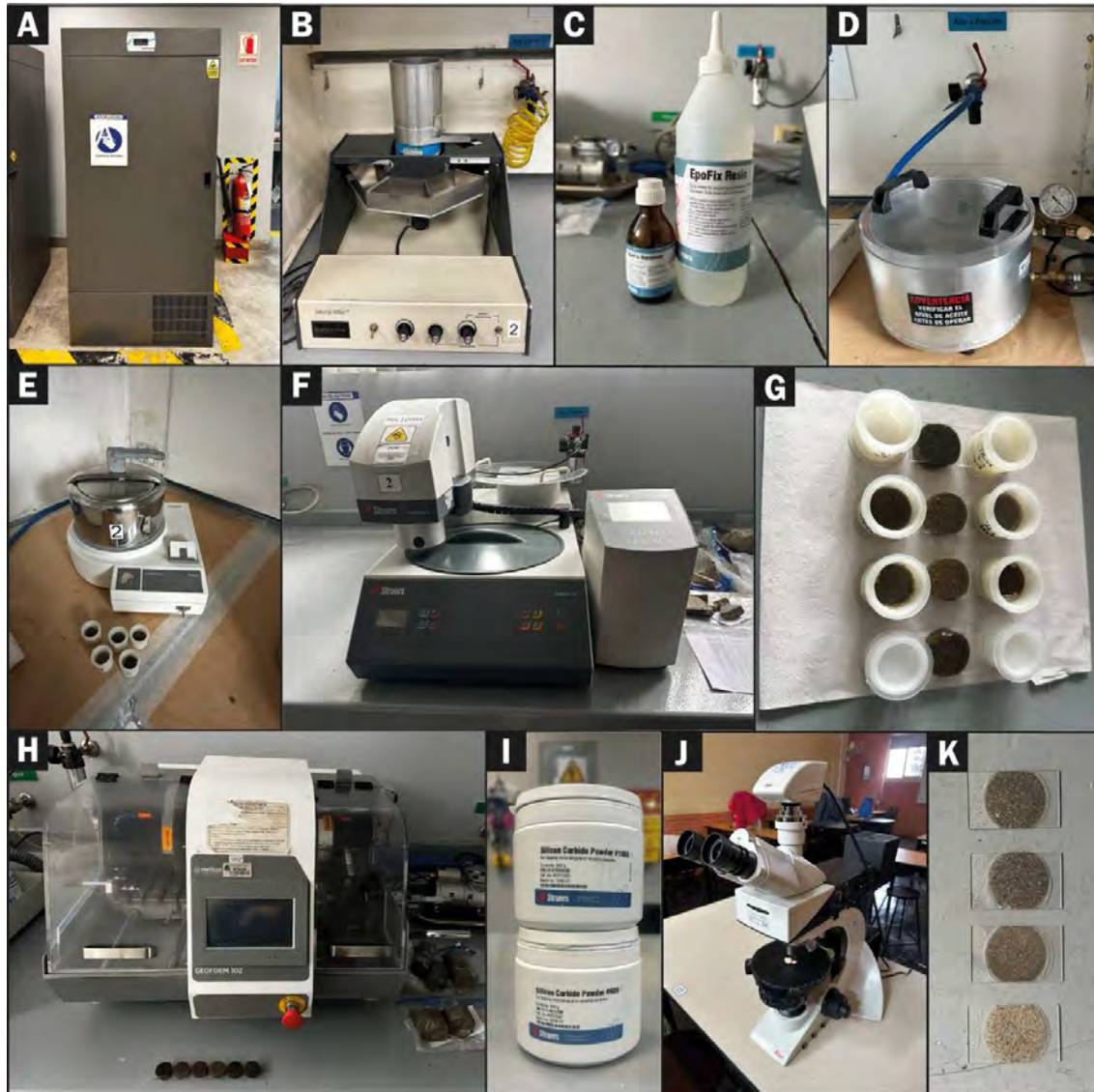


Figura 7.2: A) Horno de secado. B) Tamizador Riffler. C) Endurecedor (izquierda) y Resina EpoFIX (derecha). D, E) Bombas de vacío. F) Pulidora metalográfica “Struers”. G) Briquetas pegadas a porta objetos. H) Sierra de precisión. I) Carburo de silicio #600 y #1000. J) Microscopio Leica DM6000 B. K) Secciones delgado-pulidas.

### 7.3. Técnicas analíticas

#### 7.3.1. Microscopio petrográfico

Las secciones delgado-pulidas han sido analizadas utilizando un microscopio de polarización Leica modelo DM6000 B. Este equipo cuenta con capacidad para luz transmitida y reflejada, y está equipado con una cámara digital para la captura de imágenes (Figura 7.3).

Se describió introductoriamente la mineralogía de cada muestra y se tomaron fotomicrografías con nicoles paralelos. Posteriormente, para la caracterización morfológica, estas imágenes fueron procesadas en los softwares AutoCAD e ImageJ.



Figura 7.3: Microscopio Leica DM6000 B.

### 7.3.2. Análisis de Imagen

El análisis de imagen es un proceso estructurado que sigue una secuencia sistemática para evaluar exhaustiva y objetivamente las propiedades morfológicas de los materiales granulares. Esta metodología incluye varias etapas: preparación de la sección delgado-pulida, adquisición de la imagen en el microscopio, poligonización de los granos de arena, adquisición de características morfológicas y análisis de los datos obtenidos (Figura 7.4). La poligonización se realizó en el software AutoCAD, que permite separar manualmente los granos superpuestos y facilita el tratamiento posterior en el software ImageJ.

Para llevar a cabo el análisis de características morfológicas, se utilizó el software ImageJ, un software de código abierto, diseñado específicamente para el procesamiento y análisis de imágenes (Schneider et al., 2012).

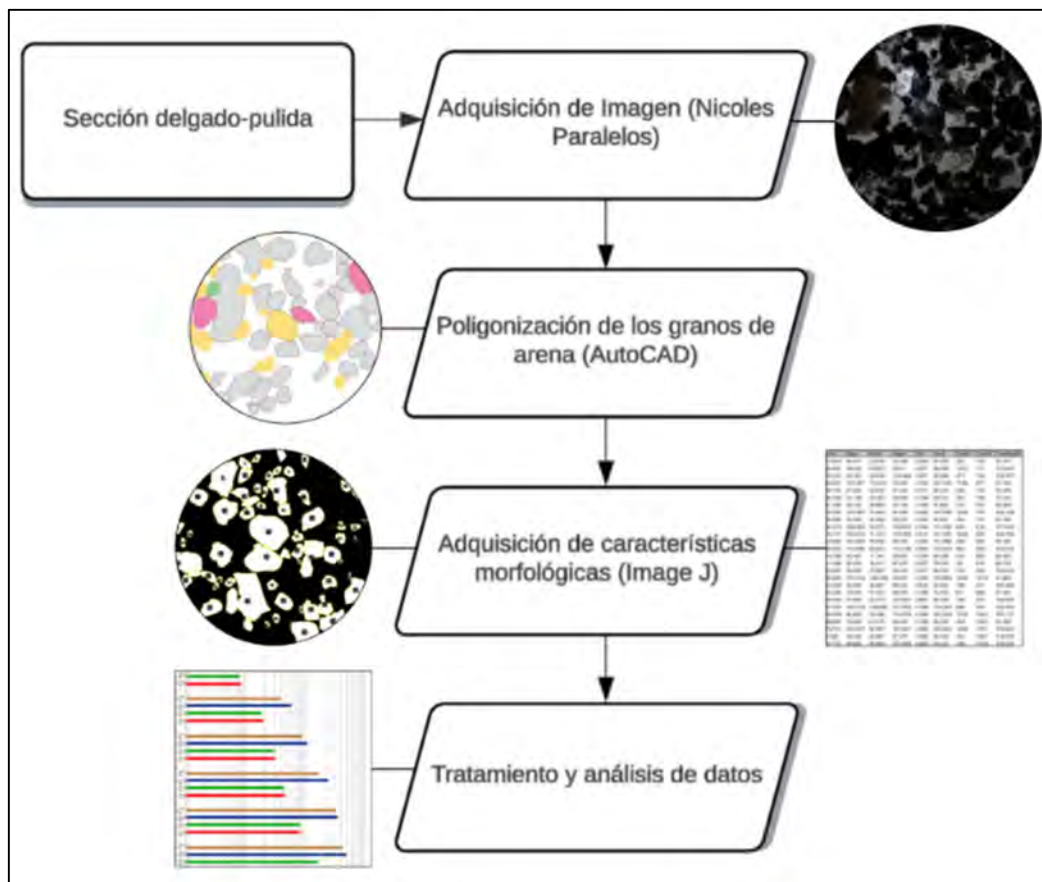


Figura 7.4: Ilustración de los pasos utilizados en el proceso de análisis de imágenes.

### 7.3.2.1. Análisis en AutoCAD

La poligonización de los granos de arena se realizó importando la imagen en modo nicoles paralelos de cada muestra. Este modo permite una mejor observación de los bordes de las partículas. Mediante el comando polilínea, se procedió a delimitar el contorno de cada grano individualmente, separándolos en diferentes capas, cuando era necesario, para evitar interferencias en el análisis morfológico posterior, especialmente en casos donde los granos estaban muy próximos entre sí o superpuestos. Posteriormente, con el comando sombreado, se rellenó cada partícula como un sólido. Para asegurar una caracterización representativa, se analizó un mínimo de 65 granos por muestra distribuidas en diferentes capas (Figuras 7.5, 7.6 y Anexos III-X). Estas capas resultantes fueron exportadas en formato PNG para su posterior procesamiento en el software ImageJ.

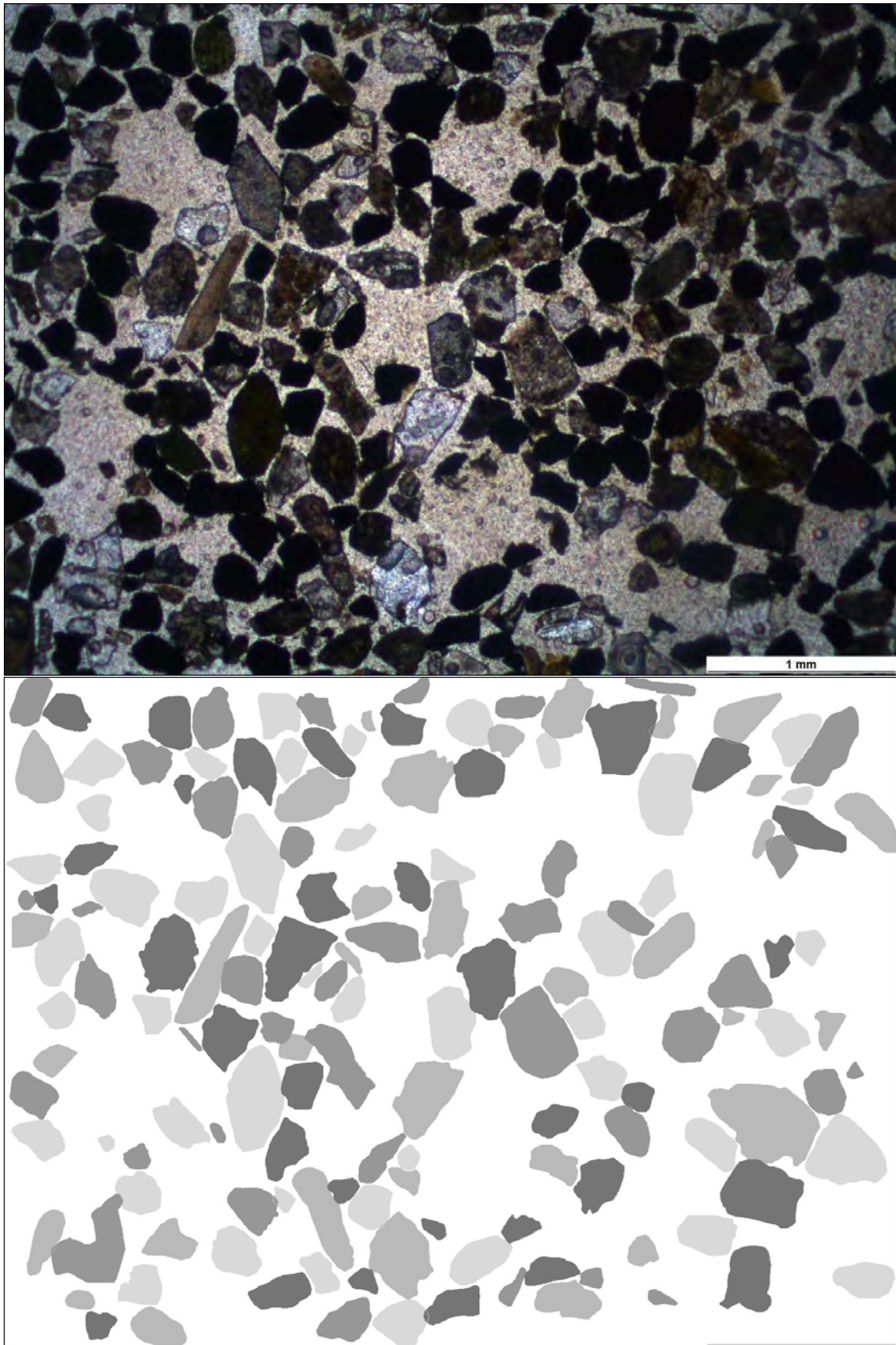


Figura 7.5: Partículas poligonizadas de Arena TM-01-M5 y sus respectivas capas.

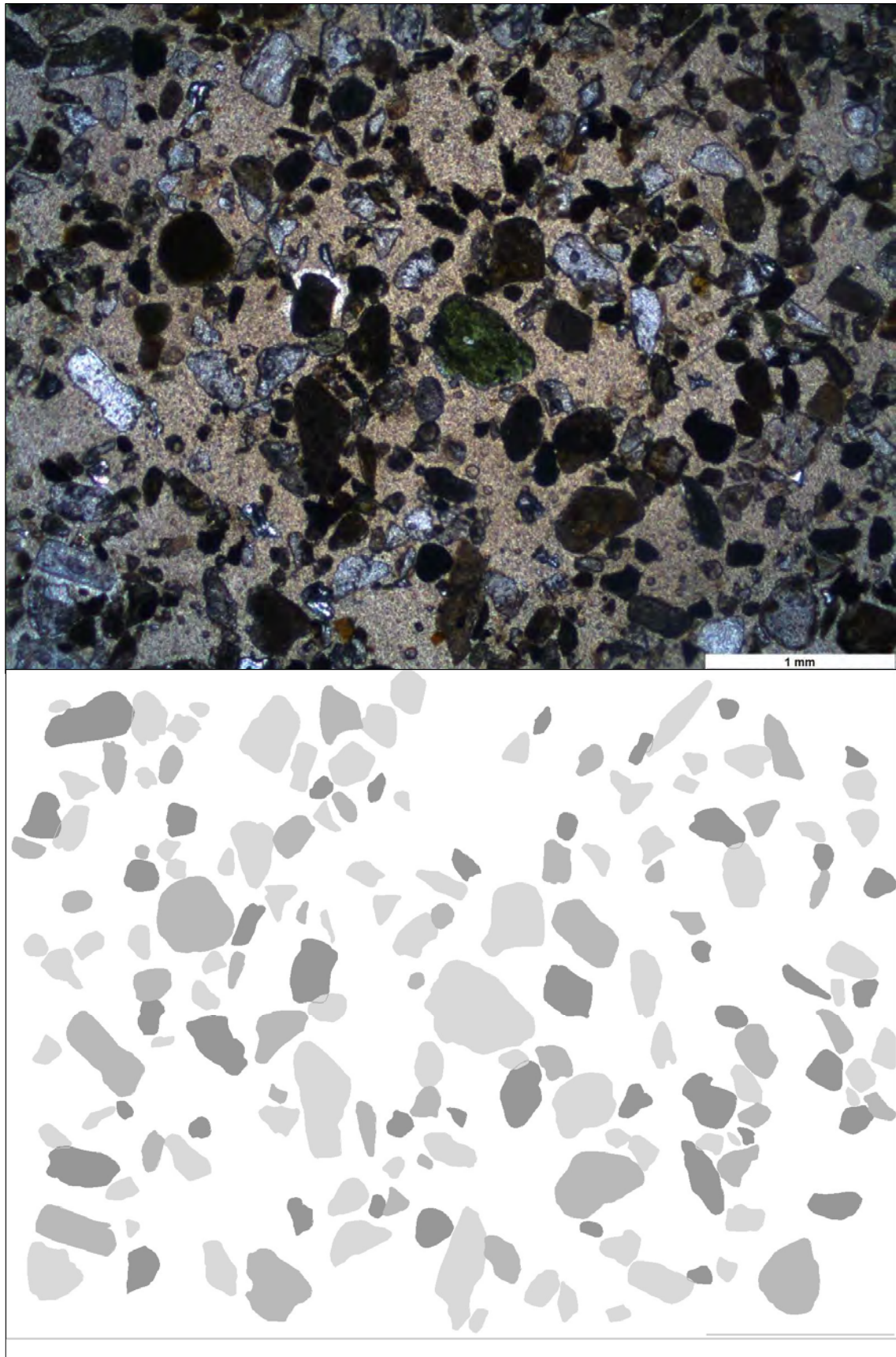


Figura 7.6: Partículas poligonizadas de Arena CM-01-M2 y sus respectivas capas.

### 7.3.2.2. ImageJ

Para el análisis morfológico de las partículas, se exportaron al software ImageJ las diferentes capas de cada muestra generadas en AutoCAD, estableciendo una escala de 337 píxeles por milímetro y convirtiendo las imágenes a formato de 16 bits. Mediante el comando "Threshold", se realizó una segmentación binaria de las imágenes, separando los píxeles correspondientes a las partículas (primer plano) de los píxeles de fondo, lo que permitió analizar exclusivamente a las partículas (Figura 7.7).

Utilizando la biblioteca de fórmulas del software, se ejecutó el comando "Analyze Particles" para evaluar tres parámetros morfológicos. Estos parámetros fueron adaptados a las definiciones y objetivos de esta investigación:

- Circularidad: Parámetro de esfericidad 2D planteado por Cox (1927).
- Redondez: Parámetro de esfericidad 2D definido por ASTM F1877 e ISO 9276-6.
- Solidez: Parámetro de redondez definido por Mora y Kwan (2000).

Los resultados obtenidos de cada capa de una muestra de arena se compilaron en una base de datos de Excel para su posterior análisis estadístico.



Figura 7.7: Ejecución del comando Threshold en partículas de la capa 4 poligonizadas de la Arena TM-01-M3.

### 7.3.3. Difracción de Rayos X - DRX

Para este estudio, al igual que en la fabricación de las secciones delgado-pulidas, se obtuvo una muestra representativa mediante el uso del cuarteador Riffler (Figura 6.2 B), pero, además, se utilizó el Micro-Riffler rotatorio (Figura 7.8A). Los pesos obtenidos para cada muestra se presentan en el Anexo II. Posteriormente, se realizó molienda en un mortero de ágata (Figura 6.8B). Las muestras CM-01-M3, PA-01-M3 y TM-01-M5 fueron analizadas en el difractómetro Bruker D4 Endeavor (Figura 7.8C) de la empresa BIZALAB. Se realizó un escaneo con rango de medida de 6 a 75° (2 $\theta$ ) con un filtro Kbeta de Fe, un detector LynxEye y condiciones de 35 kV–30 mA.

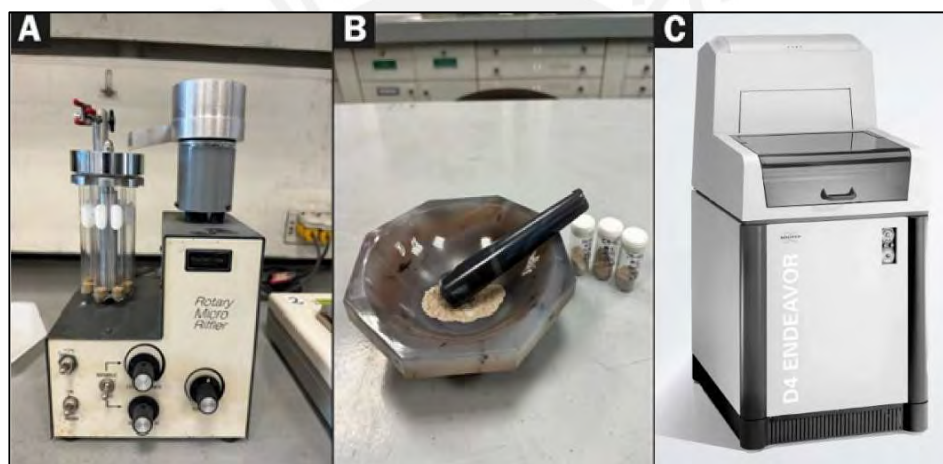


Figura 7.8: A) Micro Riffler rotatorio. B) Mortero de ágata. C) Difractómetro Bruker D4 Endeavor.

### 7.3.4. SEM-EDS

Se seleccionaron tres muestras representativas, una de cada zona de estudio: PA-01-M3, CM-01-M3 y TM-01-M5. La preparación de las muestras siguió un protocolo específico: se adhirió una cinta doble pegante a un poste de aluminio, sobre el cual se depositó la muestra de arena; posteriormente, se utilizó un soplador de goma exprimible para eliminar las partículas no adheridas (Figura 7.9A). El poste preparado se introdujo en la cámara de vacío para su análisis. El estudio se realizó utilizando el microscopio electrónico de barrido (SEM) Quanta 650 FEI, equipado con un sistema de microanálisis EDAX-Octane Pro EDS, en el laboratorio

CAM-PUCP (Figura 7.9B). La obtención de imágenes se realizó utilizando electrones secundarios, proporcionando información detallada sobre la topografía y morfología de las partículas, lo que permitió comparar y validar los resultados obtenidos en el análisis bidimensional.

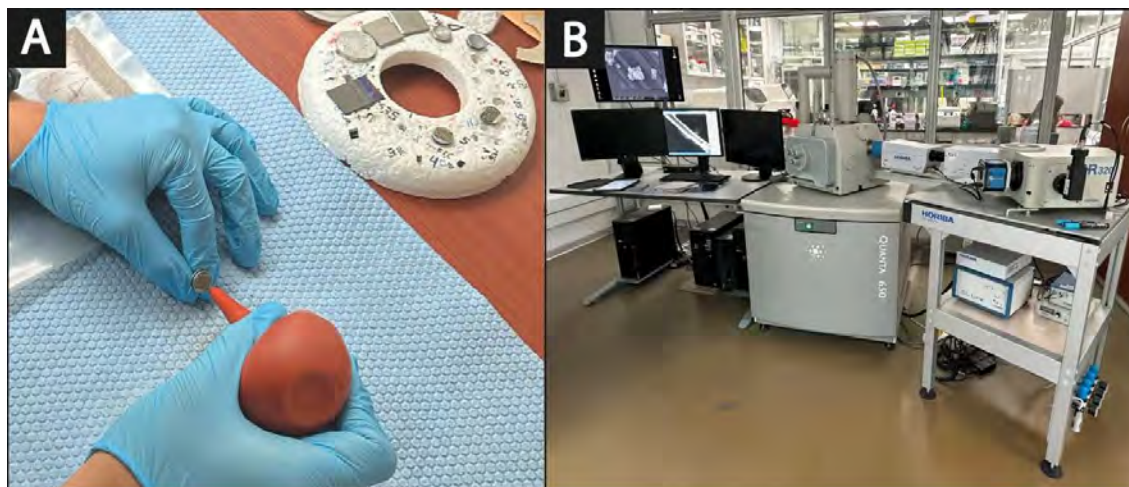


Figura 7.9: A) Preparación de muestras para análisis por SEM. B) Microscopio electrónico de barrido (SEM) Quanta 650.

### 7.3.5. Equipo de ensayos triaxiales cíclicos

El equipo de Ingeniería civil realizó ensayos triaxiales cíclicos con carga controlada utilizando el equipo GDS Enterprise Level Dynamic Triaxial Testing System (ELDYN) (Figura 7.10) en el laboratorio de Mecánica de Suelos – PUCP. Este equipo ofrece un sistema triaxial dinámico basado en un marco de carga con un actuador electromecánico. Posee la capacidad de realizar ensayos cíclicos a carga y desplazamiento controlado, así como la capacidad de poder simular señales a diferente amplitud de carga. El equipo presenta una capacidad máxima de 10 kN y una frecuencia de 5 Hz y cuenta con un sistema automatizado de adquisición de datos. Adicionalmente, permite someter a las muestras de suelo a presiones de confinamiento de hasta 1 MPa mediante un sistema neumático de control preciso.

Con los resultados de los ensayos se construyeron curvas CRR (Ratio de resistencia cíclica) que representan la resistencia a la licuefacción normalizada respecto a la presión de confinamiento efectiva inicial.

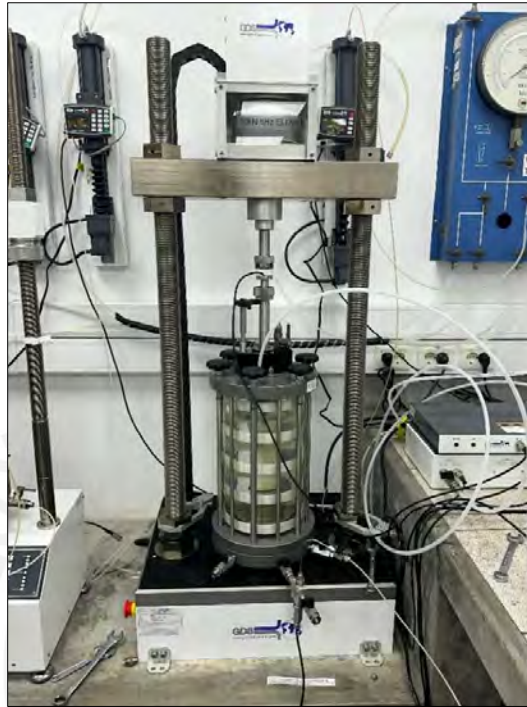


Figura 7.10: Equipo GDS Enterprise Level Dynamic Triaxial Testing System.

## 8. Resultados

### 8.1. Distribución de tamaño de partículas

#### 8.1.1. Tamizaje Estándar

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ilustrado anteriormente en la Figura 3.1, las muestras de arena de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora se califican como SP (arenas mal gradadas) o bien clasificadas desde el enfoque sedimentario. Esto debido a que, en la distribución de tamaños de las partículas, predomina un rango de tamaño específico. La Tabla 8.1 presenta los resultados del análisis granulométrico de las arenas por localidad, integrando las muestras de cada profundidad. Además, se incluye el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) definido como la relación entre  $D_{60}$  (diámetro de tamiz por el cual pasa el 60% del peso total de la muestra de arena) y  $D_{10}$  (diámetro de tamiz por el cual

pasa el 10% del peso total de la muestra de arena). Los valores de Cu obtenidos fueron: Tambo de Mora (3.40), Paracas (3.25) y Canchamaná (2.82). Cabe destacar que, según los criterios del SUCS, para que una arena se considere bien gradada (o mal clasificada), debe tener un  $Cu \geq 6$  y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3.

Tabla 8.1: Tabla de resultados de tamizado de arenas por localidad (integrando las muestras de cada profundidad). Gs = Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo. SUCS = Sistema unificado de clasificación de suelos. D50 = Diámetro medio. Cu = Coeficiente de uniformidad. Cc = Coeficiente de curvatura. LL = Límite líquido. LP = Límite plástico.

Tamiz ASTM	P% Paracas	P% Canchamaná	P% T. de Mora	Parámetros Geotécnicos	Ubicación de Arenas		
					Paracas	Canchamaná	T. de Mora
3"	100.0	100.0	100.0	Gs	2.66	2.74	2.90
2"	100.0	100.0	100.0	SUCS	SP	SP	SP
1 ½"	100.0	100.0	100.0	% Grava	2.4	0.9	0.2
1"	100.0	100.0	100.0	% Arena	95.9	95.6	97.5
¾"	100.0	100.0	100.0	% Finos	1.7	3.5	2.4
3/8"	98.4	100.0	100.0	D10, mm	0.12	0.11	0.15
#4	97.6	99.1	99.8	D30, mm	0.20	0.17	0.31
#10	96.0	97.7	99.3	D50, mm	0.32	0.26	0.44
#20	88.6	93.7	94.3	D60, mm	0.39	0.31	0.51
#40	64.5	80.6	48.5	Cu	3.25	2.82	3.40
#60	38.2	46.7	17.5	Cc	0.85	0.85	1.26
#140	3.7	8.6	4.1	LL	NP	NP	NP
#200	1.7	3.5	2.4	LP	NP	NP	NP

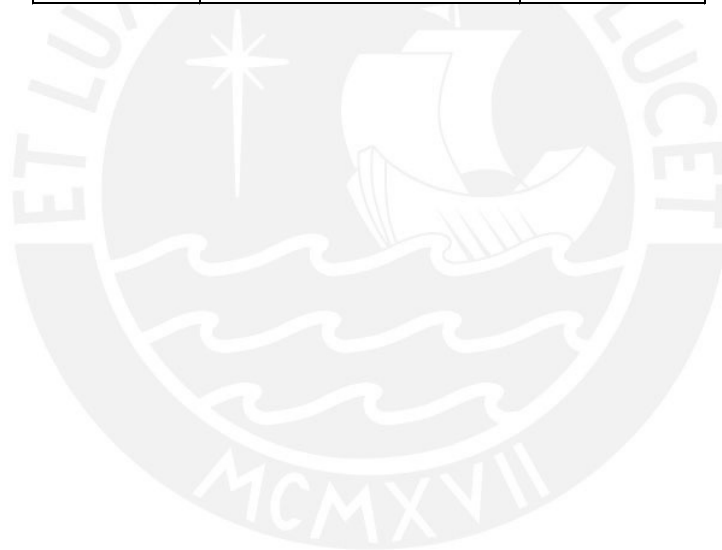
### 8.1.2. Diámetro del EQPC

Similarmente al proceso de tamizaje estándar, este parámetro se calculó agrupando todas las muestras tomadas a diferentes profundidades en cada ubicación. Los resultados muestran que, en promedio, las partículas de arena de Paracas disponen de un diámetro de 0.235 mm, las de Canchamaná 0.190 mm, y las de Tambo de Mora presentan las partículas más grandes con un diámetro promedio de 0.276 mm (Tabla 8.2). Además, en la figura 8.1, se observan los histogramas con los datos de los diámetros EQPC (ver capítulo 6.2) para cada ubicación. Los histogramas exhiben una distribución asimétrica con un rango de tamaños predominante, lo que indica una buena clasificación o mala gradación según el SUCS. En Paracas, el tamaño predominante de las partículas oscila entre 0.15 y 0.25 mm; en Canchamaná,

entre 0.10 y 0.225 mm; y en Tambo de Mora, entre 0.15 y 0.30 mm. En condiciones de buena gradación, se esperaría un histograma más uniforme.

Tabla 8.2: Tabla con datos estadísticos de resultados de diámetro EQPC.

<b>Arena analizada</b>	<b>Medidas estadísticas</b>	<b>EQPC</b>
<b>Paracas</b>	Promedio	0.235 mm
	Desviación Estándar	0.124
	Coficiente de Variación (%)	52.76%
<b>Canchamaná</b>	Promedio	0.190 mm
	Desviación Estándar	0.089
	Coficiente de Variación (%)	46.89%
<b>Tambo de Mora</b>	Promedio	0.276 mm
	Desviación Estándar	0.124
	Coficiente de Variación (%)	44.85%



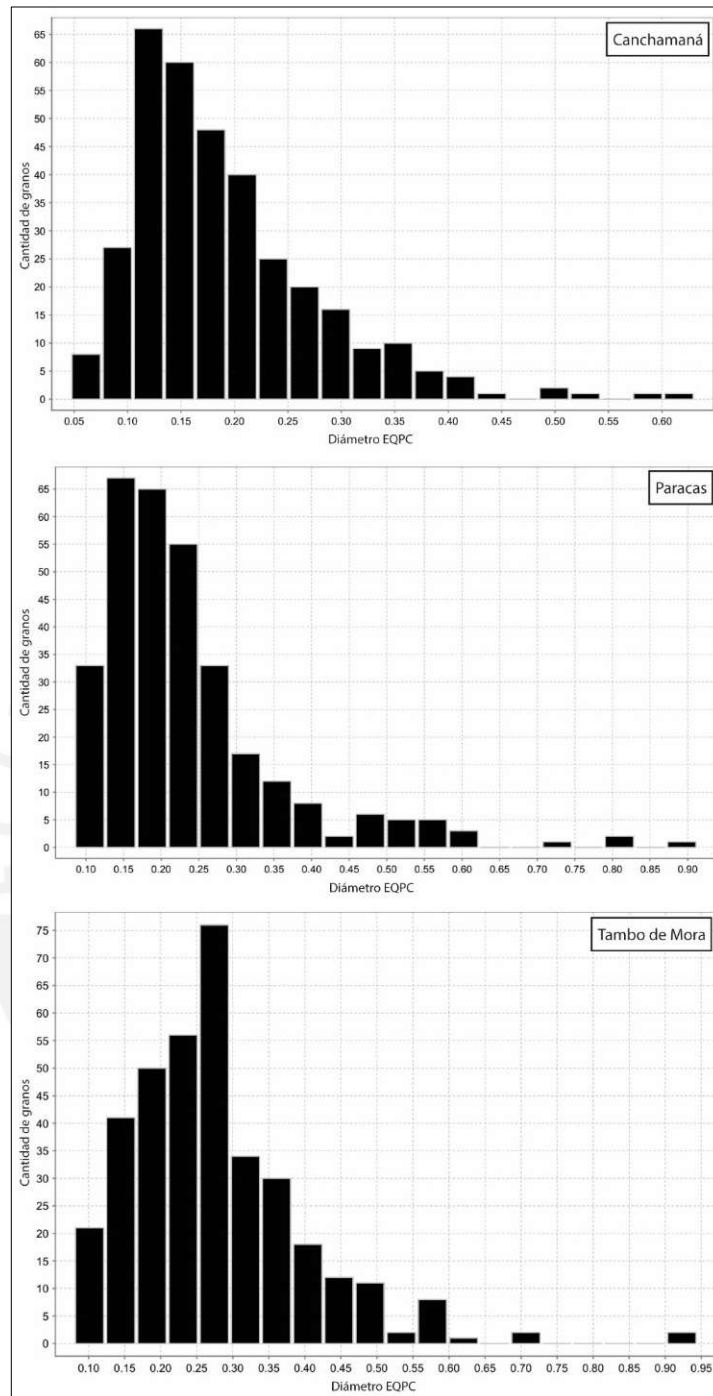


Figura 8.1: Histogramas asimétricos de Diámetros EQPC para cada ubicación.

## 8.2. Mineralogía de muestras – Microscopía óptica y DRX

Para la descripción mineralógica de las muestras se realizó inicialmente una caracterización introductoria en secciones delgadas pulidas. Sin embargo, esta técnica presentó limitaciones: los granos de arena individuales, al estar envueltos en resina y endurecedor, impidieron obtener el color de interferencia correcto para todos los granos en una misma sección (Figuras 8.2A y B). Debido a estas limitaciones técnicas y con el objetivo de obtener una descripción semi-cuantitativa más precisa, se optó por emplear difracción de rayos X. Esta técnica se aplicó a las muestras más profundas de cada ubicación de estudio.

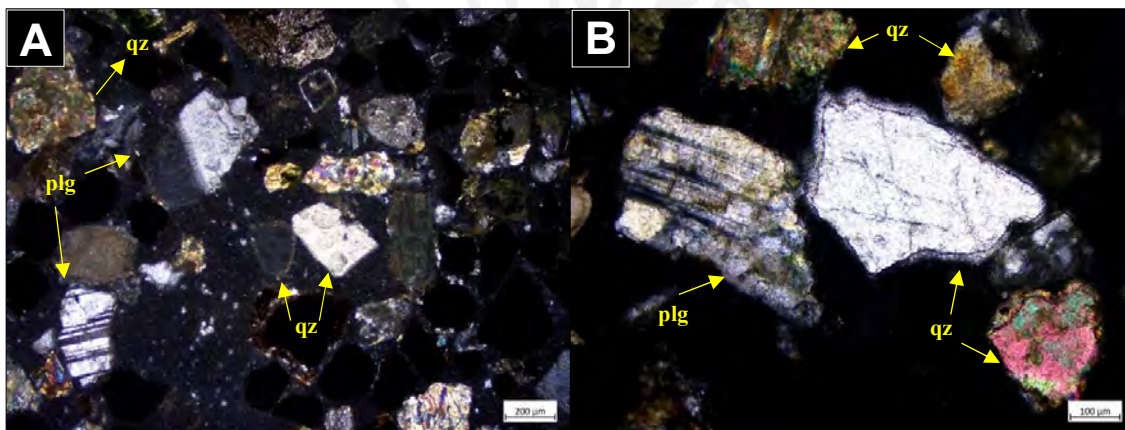


Figura 8.2: Micrografías en modo nícoles cruzados. A) Arena TM-01-M5: Plagioclasas (plg) con colores de interferencia correctos. Cuarzos con interferencias variables: desde blanco esperado hasta colores anómalos. B) Arena CM-01-M2: Plagioclasea con color de interferencia adecuada. Cuarzo con color correcto, rodeado por otros con colores anómalos.

Los resultados de DRX revelan que las arenas de Canchamaná (CM-01-M3), Paracas (PA-01-M3) y Tambo de Mora (TM-01-M5) presentan composiciones mineralógicas similares, aunque con variaciones en sus proporciones. En todas ellas predominan los silicatos, principalmente cuarzo y feldspatos (plagioclasas y ortoclasa).

En la arena CM-01-M3, el difractograma muestra como componentes principales a silicatos: andesina (25%), cuarzo (24%), oligoclasa (18%) y ortoclasa (12%). En menores proporciones se encuentran anfíbol (actinolita, 6%), mica (muscovita, 3%) y clinocloro del grupo de la clorita (3%). La muestra también contiene cantidades menores de minerales de hierro como magnetita

y hematita (2% cada uno), además de epidota (2%). Se detectaron trazas (< L.D.) de calcita y un mineral laminar no especificado (Figura 8.3)

Para la arena PA-01-M3, el cuarzo es el silicato más abundante con el 36%. Le siguen las plagioclasas oligoclasa (21%) y andesina (18%) y ortoclasa con el 13%. Otros minerales como actinolita, muscovita y clorita están presentes en menores cantidades (3%, 2% y 1% respectivamente). La muestra también contiene trazas de magnesita, magnetita, calcita y epidota (Figura 8.4).

Para la arena TM-01-M5, el cuarzo es el mineral más abundante con un 27%, seguido de andesina (18%) y oligoclasa (17%). La ortoclasa constituye el 14%. En menores proporciones se encuentran clorita (5%), anfíbol (actinolita, 4%), magnetita, mica (muscovita) y epidota (3% cada uno), calcita y hematita (2% cada uno). Se detectó también un mineral laminar cuya cantidad está por debajo del límite de detección (< L. D.) (Figura 8.5).

Para las muestras CM-01-M3 y TM-01-M5, en las cuales se identificó un "Mineral laminar", probablemente corresponde a una fase de mica y/o arcilla. La determinación precisa de este mineral requiere el uso de técnicas analíticas complementarias.

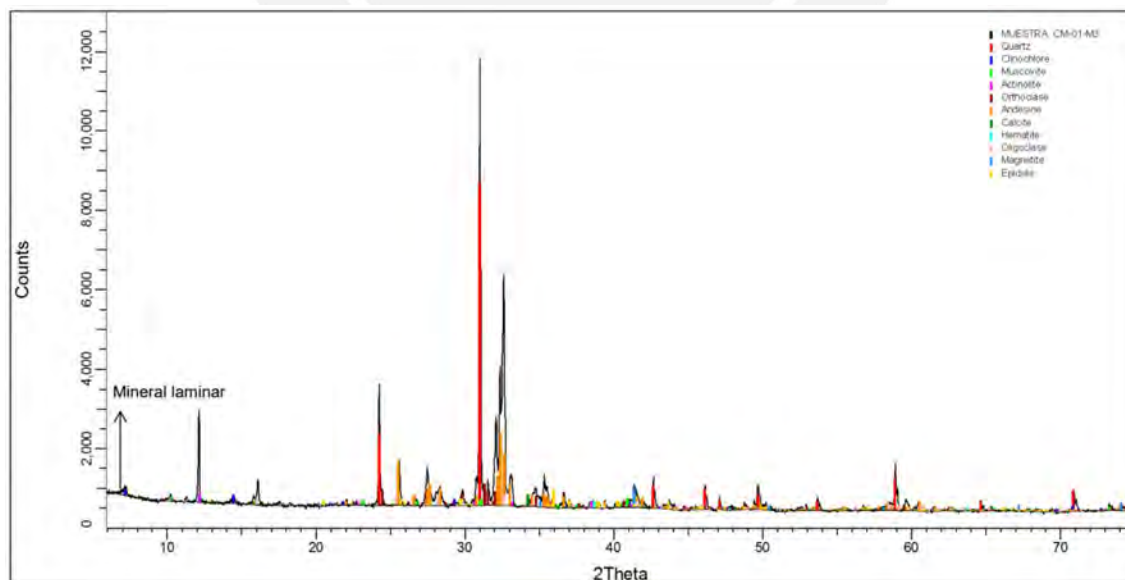


Figura 8.3: Análisis DRX de arena CM-01-M3 realizado en el laboratorio BIZALAB.

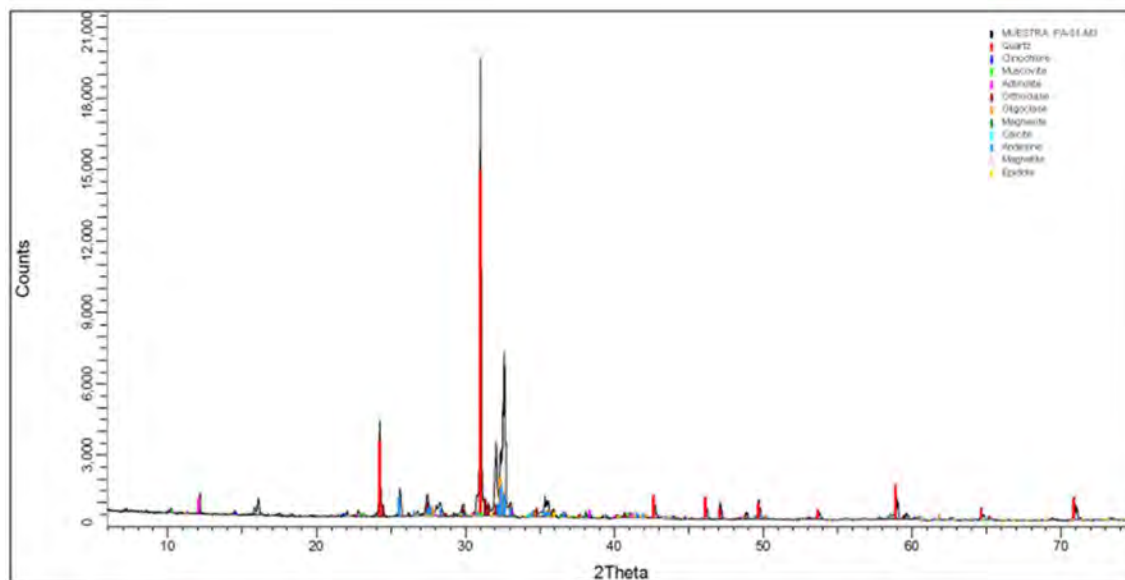


Figura 8.4: Análisis DRX de arena PA-01-M3 realizado en el laboratorio BIZALAB.

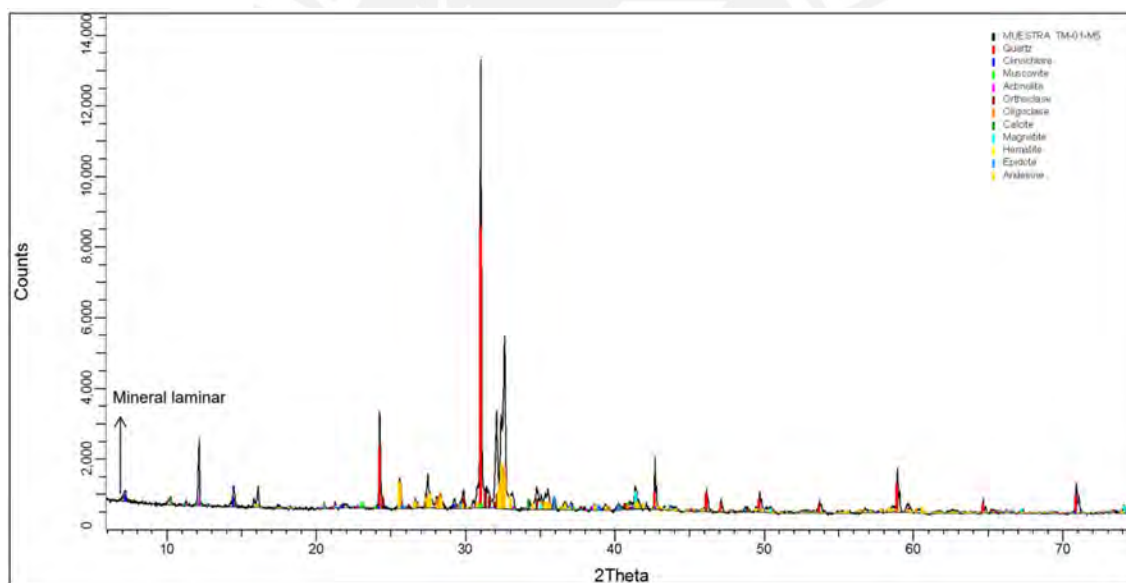


Figura 8.5: Análisis DRX de arena TM-01-M5 realizado en el laboratorio BIZALAB.

### 8.3 Parámetros morfológicos

#### 8.3.1 Redondez y esfericidad

##### Arenas de Paracas

Para la arena PA-01-M1 (profundidad de extracción 0.50 – 0.60 m.), se analizaron un total de 66 granos de arena. Para la arena PA-01-M2 (profundidad de extracción de 0.60 – 0.70

m.), se analizaron un total de 150 granos. Para la arena PA-01-M3 (profundidad de extracción 0.70-0.80 m.), se analizaron un total de 99 granos. Los resultados estadísticos de cada muestra se observan en la tabla 8.3.

Tabla 8.3: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Paracas.

Arena analizada	Medidas estadísticas	Redondez	Esfericidad	
		Mora y Kwan (2000)	Cox (1927)	ASTM F1877 e ISO 9276-6
		0 - 1	0 - 1	
PA-01-M1	Promedio	0.947	0.699	0.678
	Desviación Estándar	0.026	0.071	0.148
	Coefficiente de Variación (%)	2.72%	10.18%	21.83%
PA-01-M2	Promedio	0.953	0.778	0.666
	Desviación Estándar	0.020	0.068	0.148
	Coefficiente de Variación (%)	2.12%	8.76%	22.30%
PA-01-M3	Promedio	0.947	0.754	0.661
	Desviación Estándar	0.021	0.077	0.147
	Coefficiente de Variación (%)	2.27%	10.15%	22.16%

#### Arenas de Canchamaná

Para la arena CM-01-M1 (profundidad de extracción de 0.30 – 0.45 m.) se analizaron un total de 94 granos. Para la arena CM-01-M2 (profundidad de extracción de 0.45-0.60 m.) se analizaron un total de 169 granos. Para la arena CM-01-M3 (profundidad de extracción de 0.60-0.70 m.) se analizaron un total de 81 granos. Los resultados estadísticos de cada muestra se observan en la tabla 8.4.

Tabla 8.4: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Canchamaná.

Arena analizada	Medidas estadísticas	Redondez	Esfericidad	
		Mora y Kwan (2000)	Cox (1927)	ASTM F1877 e ISO 9276-6
		0 - 1	0 - 1	
CM-01-M1	Promedio	0.928	0.692	0.662
	Desviación Estándar	0.033	0.088	0.157
	Coefficiente de Variación (%)	3.53%	12.64%	23.74%
CM-01-M2	Promedio	0.939	0.742	0.635
	Coefficiente de Variación (%)	0.026	0.092	0.159
	C.V (%)	2.79%	12.39%	25.10%
CM-01-M3	Promedio	0.949	0.755	0.629
	Desviación Estándar	0.020	0.076	0.140
	Coefficiente de Variación (%)	2.15%	10.05%	22.23%

### Arenas de Tambo de Mora

Para la arena TM-01-M2 (profundidad de extracción de 0.40 – 0.50 m.) se analizaron un total de 69 granos. Para la arena TM-01-M3 (profundidad de extracción de 0.50 - 0.60 m.) se analizaron un total de 76 granos. Para la arena TM-01-M4 (profundidad de extracción de 0.60-0.70 m.) se analizaron un total de 65 granos. Para la arena TM-01-M5 (profundidad de extracción de 0.70-0.80 m.) se analizaron un total de 154 granos. Los resultados estadísticos de cada muestra se observan en la tabla 8.5.

Tabla 8.5: Resultados estadísticos de Redondez y Esfericidad para arenas de Tambo de Mora.

Arena analizada	Medidas estadísticas	Redondez	Esfericidad	
		Mora y Kwan (2000)	Cox (1927)	ASTM F1877 e ISO 9276-6
		0 - 1	0 - 1	
TM-01-M2	Promedio	0.934	0.667	0.668
	Desviación Estándar	0.034	0.083	0.151
	C.V (%)	3.65%	12.43%	22.58%
TM-01-M3	Promedio	0.950051316	0.743	0.695
	Desviación Estándar	0.0236	0.078	0.142
	C.V (%)	2.5%	10.55%	20.41%
TM-01-M4	Promedio	0.938	0.714	0.618
	Desviación Estándar	0.033	0.088	0.158
	C.V (%)	3.54%	12.37%	25.48%
TM-01-M5	Promedio	0.936	0.724	0.650
	Desviación Estándar	0.029	0.092	0.173
	C.V (%)	3.08%	12.69%	26.67%

### 8.3.2. Textura superficial

El análisis del parámetro de rugosidad se realizó considerando el conjunto completo de muestras de arena extraídas a diferentes profundidades en las tres ubicaciones. Para cada localización, se utilizaron las mediciones de área y perímetro de los granos, datos que fueron representados en un gráfico de perímetro versus área (Figura 8.6). A partir de estos gráficos, se obtuvieron líneas de tendencia con sus respectivas ecuaciones, permitiendo calcular el parámetro de dimensión fractal de rugosidad ( $D_r$ ) mediante la relación  $2/m$ , donde  $m$  representa la pendiente de cada línea. Paracas presentó un  $D_r$  de 13.13, Tambo de Mora obtuvo un  $D_r$  de 13.81 y Canchamaná registró un  $D_r$  de 19.18.

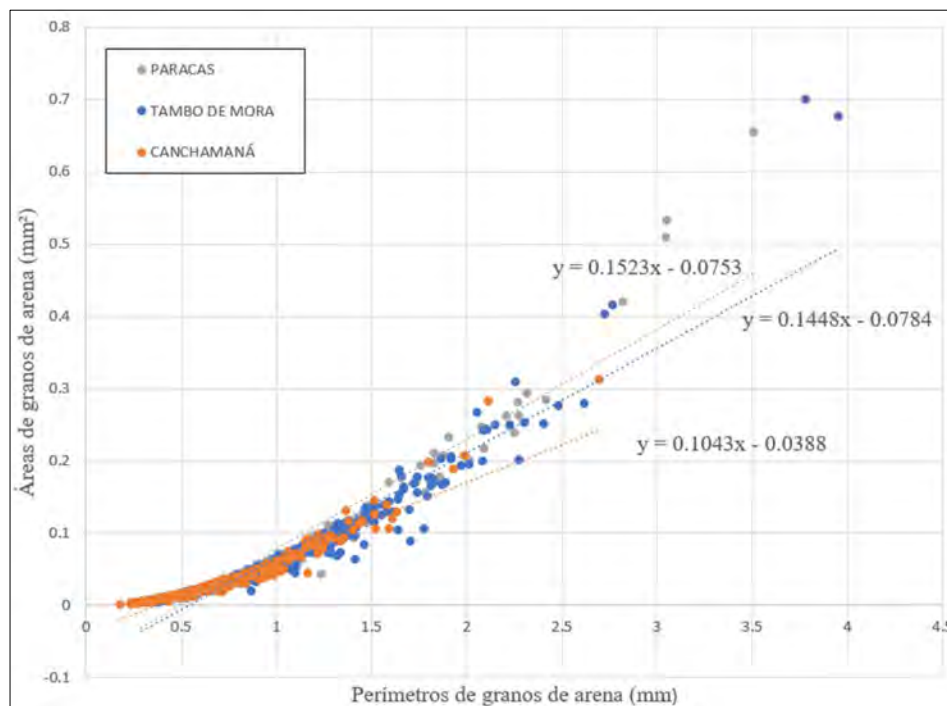


Figura 8.6. Gráfico de Perímetro vs. Área para cada ubicación.

#### 8.4 Ensayo triaxial cíclico

El estudio aplicó una densidad uniforme y una presión efectiva de confinamiento de 200 kPa para todas las arenas. Esta presión simula un esfuerzo total a una profundidad de aproximadamente 10 m. y un esfuerzo efectivo a una profundidad de aproximadamente 20 m. Se utiliza esta presión porque la licuefacción no ocurre a mayores profundidades. Esto se debe a que el mayor confinamiento densifica el material, haciéndolo más resistente y, simultáneamente, aumenta la presión efectiva, lo que requiere un incremento mayor de presión de poros para que ocurra la licuefacción.

Mediante la aplicación de una carga axial cíclica sinusoidal de amplitud controlada, se determinó el número de ciclos necesarios para alcanzar la licuefacción, definida como el punto en el que la presión de poros es igual a la presión efectiva de confinamiento inicial o se produce una deformación axial superior al 5%. Los resultados evidencian una relación inversa entre el número de ciclos y el ratio de resistencia cíclica (CRR), de modo que valores más elevados de ratio de esfuerzo cíclico (CSR) conducen a la ocurrencia de licuefacción en un menor número

de ciclos. La gráfica obtenida (Figura 8.7), ilustra el comportamiento de las arenas de las tres localidades tanto en estado suelto (L,  $D_r = 30\%$ ) como en estado medianamente densos (MD,  $D_r=60\%$ ).

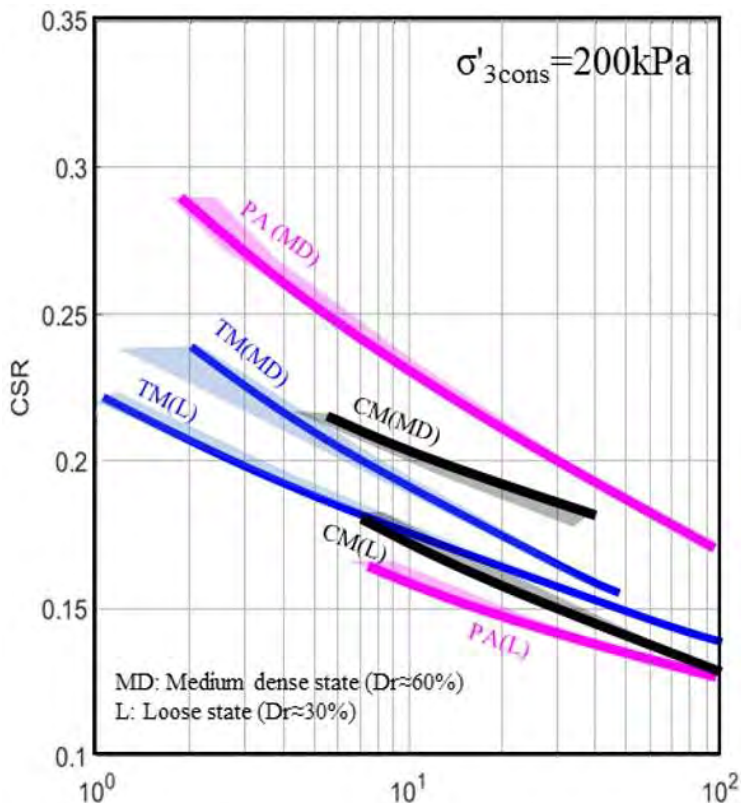


Figura 8.7: Curva CRR (Ratio de Resistencia cíclica) para presión de 200 kPa (10 m. de profundidad en esfuerzos totales y 20 m. de esfuerzo efectivo). CSR = Ratio de esfuerzos cíclicos.

## 9. Discusión de resultados

### 9.1. Potencial de licuefacción de arenas de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora

Con una densidad baja relativa de 30% unificada para las arenas de cada ubicación y una presión de 200 kPa, se observa que las curvas de ratio de resistencia cíclica a la licuefacción (CRR) de la arena de Paracas se encuentran por debajo y a la izquierda de las curvas correspondientes a las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora. Esto indica que la arena de Paracas, al estar sujeta al mismo esfuerzo cortante cíclico (CSR) que las otras arenas, necesitaría un menor número de ciclos para fallar por licuefacción. Por el contrario, las arenas

de Canchamaná y Tambo de Mora requieren una mayor cantidad de ciclos para llegar a fallar, en comparación con la arena de Paracas. Además, al comparar las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora, se observa que la arena de Tambo de Mora requiere un número aún mayor de ciclos de carga para fallar, lo que indica que esta arena presenta una resistencia a la licuefacción superior a la de Canchamaná. Es importante tener en cuenta que este análisis se realizó con una densidad relativa estandarizada para todas las ubicaciones. Sin embargo, en condiciones de campo, la densidad del suelo en su estado natural (densidad de campo) es un factor clave a considerar, ya que puede variar debido a factores como el grado de compactación, la humedad y la estructura del suelo. De hecho, en el terremoto de Pisco (2007), las arenas de Paracas, al disponer de una mayor densidad de campo, no presentaron licuefacción, a diferencia de las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora.

## **9.2. Relación entre parámetros morfológicos y el potencial de licuefacción de arenas**

### **9.2.1. Correlación de Redondez y Potencial de Licuefacción**

Para esta investigación, se utilizó el parámetro de redondez propuesto por Mora y Kwan (2000). Este parámetro se calcula dividiendo el área de la partícula por la envolvente que la rodea, de modo que una partícula perfectamente redonda no presentará esquinas cóncavas (Figura 3.4 A). Al comparar los datos de todas las profundidades de las tres ubicaciones, se observa que la arena de Paracas presenta el mayor valor promedio de redondez, con 0.950. Por otro lado, las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora muestran valores promedio muy similares, de 0.938 y 0.939 respectivamente (Figura 9.1). La cercanía geográfica entre las muestras de Canchamaná y Tambo de Mora, separadas por solo 1.87 km (Figura 5.1), sugiere que estas arenas presentan un origen y procesos de formación muy afines, lo que se refleja en la semejanza de sus valores de redondez.

Las tres arenas se clasificarían como redondeadas, siendo la arena de Paracas la que muestra el mayor grado de redondez. Esto se correlaciona con lo observado en las curvas de ratio de resistencia cíclica a la licuefacción (CRR), donde la arena de Paracas exhibe una menor resistencia a la licuefacción. La razón de esto es que las partículas redondeadas presentan una menor superficie de contacto entre sí y una menor capacidad de entrelazarse, lo que provoca que el suelo pierda su estructura con mayor facilidad cuando se le aplican cargas cíclicas o

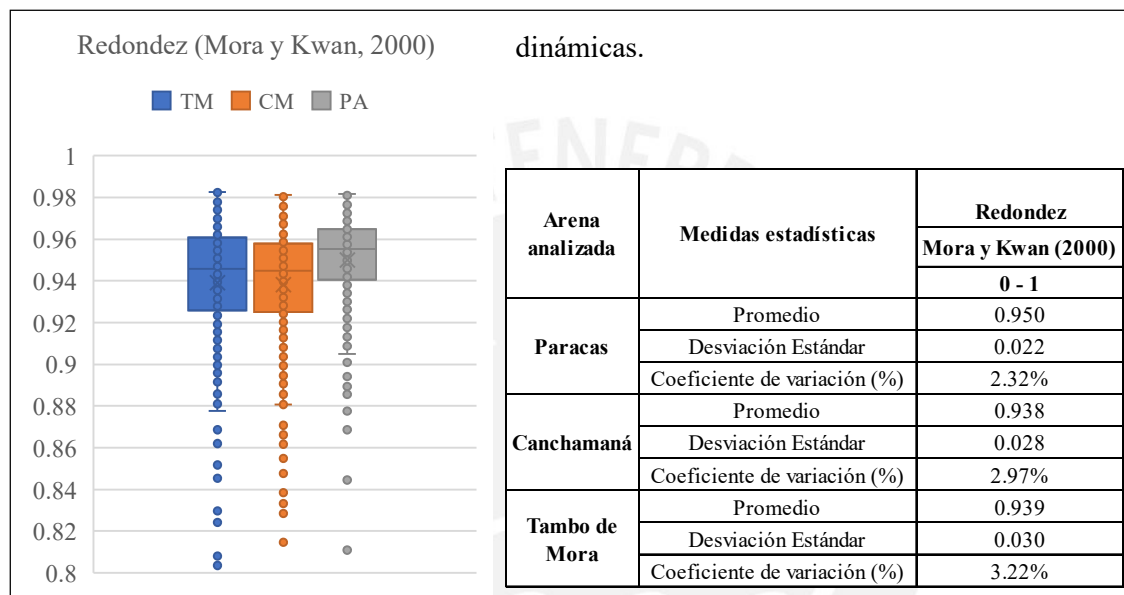


Figura 9.1: Datos estadísticos de redondez de arenas de Tambo de Mora, Canchamaná y Paracas.

### 9.2.2. Correlación de Esfericidad y Potencial de Licuefacción

Para medir la esfericidad de las muestras de arena se utilizó dos fórmulas: el parámetro de Cox (1927) y el parámetro de ASTM F1877 e ISO 9276-6. Ambos proporcionan una caracterización cuantitativa de la esfericidad de las partículas. Al igual que la medición de redondez, se utilizó los datos agrupados por ubicación (Figura 9.2). Según el parámetro de Cox, se evidencia que las arenas de Paracas presentan el valor más alto de esfericidad, con 0.754, seguida por la arena de Canchamaná con 0.732, y finalmente la arena de Tambo de Mora con 0.715. Al aplicar el parámetro ASTM F1877 e ISO 9276-6, se observó que la arena de Paracas mantiene su posición dominante con un valor de esfericidad de 0.667. Sin embargo, con esta

fórmula, la arena de Tambo de Mora se ubica en segundo lugar con 0.657, desplazando a la arena de Canchamaná, que ahora presenta el valor más bajo de 0.641. Con estos resultados, Paracas se distingue como la arena más esférica para ambos parámetros, pero debido a la sutil diferencia en la clasificación de Canchamaná y Tambo de Mora, se analizó la correlación entre ambos parámetros (Capítulo 9.2.2.1).

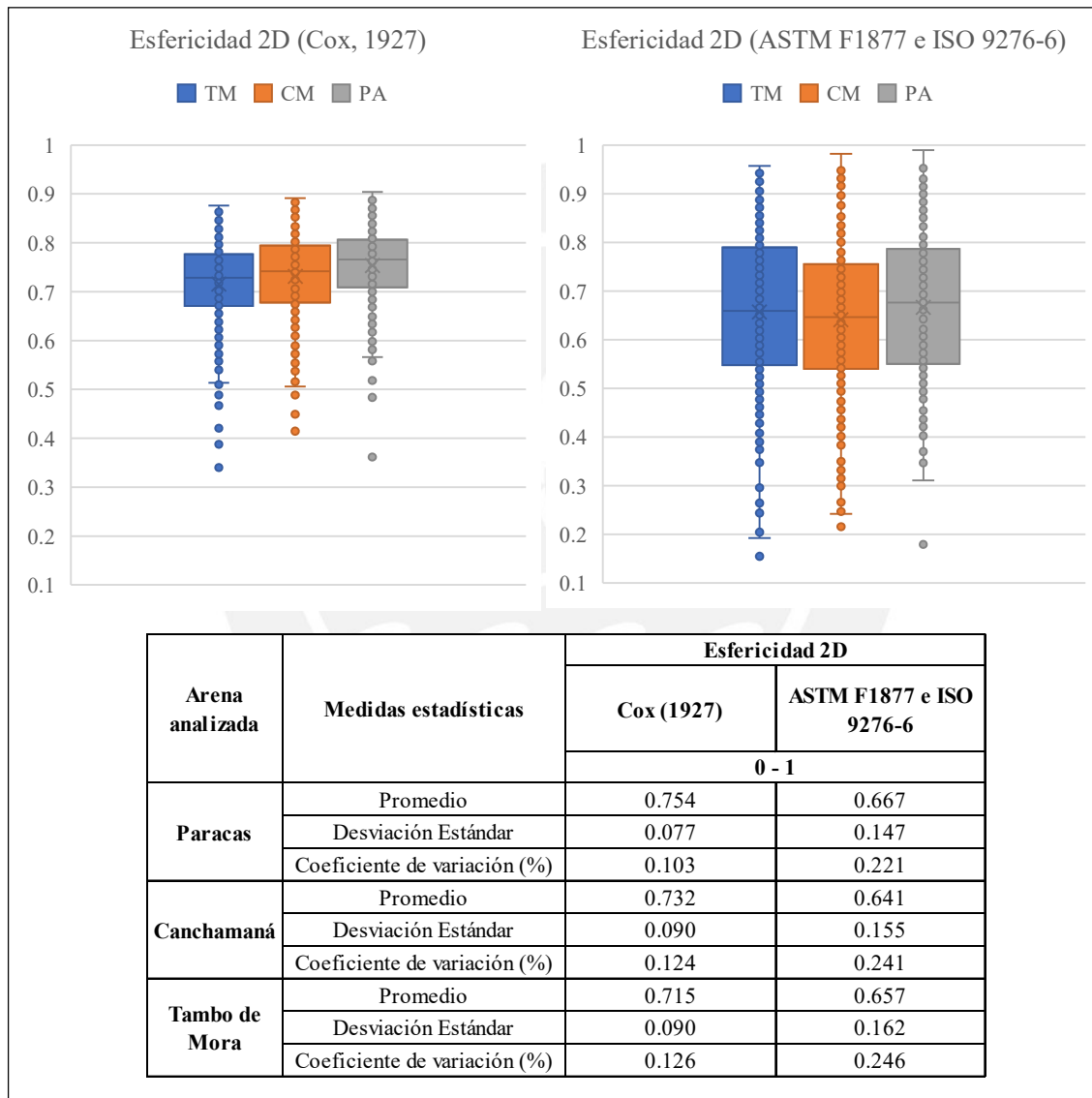


Figura 9.2: Datos estadísticos de esfericidad de arenas de Tambo de Mora, Canchamaná y Paracas.

### 9.2.2.1. Correlación de parámetros de Esfericidad

La mayor correlación entre los dos parámetros de esfericidad 2D estudiados en esta investigación se analizó usando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) en un diagrama de dispersión. El valor de  $r$ , planteado por Pearson (1896), es el siguiente:

$$R_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

donde  $\text{cov}$  es la covarianza de  $X$  e  $Y$ ,  $\sigma_X$  = desviación estándar de  $X$ , y  $\sigma_Y$  = desviación estándar de  $Y$ . Los valores de  $R$  oscilan entre  $-1$  y  $1$ , donde  $1$  indica una correlación lineal positiva total,  $-1$  es una correlación lineal negativa total, y  $0$  representa ausencia de correlación lineal. Una correlación positiva o negativa débil estaría en el rango de  $\pm 0.1$  a  $0.3$ , una correlación moderada de  $\pm 0.3$  a  $0.5$ , y una correlación fuerte de  $\pm 0.5$  a  $1.0$  (Cohen, 1988). En la Figura 9.3 se presenta el diagrama de dispersión que relaciona los parámetros de esfericidad correspondientes a la fórmula de Cox y la fórmula de ASTM (Figura 8.3). Para este análisis, se utilizó la unificación de los datos de esfericidad obtenidos para las tres arenas en sus distintas profundidades. La línea de tendencia de este diagrama formula una ecuación de  $y = 1.1848x - 0.2132$ , lo que indica una relación lineal positiva entre estas dos variables. Además, el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) calculado para estos datos es de  $0.6707$ . Este valor de  $r$  tan cercano a  $1$  demuestra que existe una fuerte correlación entre los parámetros de esfericidad representados. De esta manera, a medida que aumenta el valor del parámetro Cox, también tiende a aumentar el valor del parámetro ASTM. Sin embargo, se notó que el parámetro de esfericidad de Cox no califica tan bajo a partículas poco esféricas (prismáticas) como lo hace el parámetro de esfericidad ASTM F1877. Por ejemplo, la partícula A muestra un valor de esfericidad de Cox de  $0.4994$ , lo que la califica como de baja-mediana esfericidad, pero la esfericidad ASTM le otorga un valor más bajo de  $0.2747$ , indicando una esfericidad muy baja. De manera similar, para la partícula B, la esfericidad de Cox le da un valor de  $0.5162$  (baja-mediana esfericidad), pero la esfericidad ASTM le asigna un valor más bajo de  $0.29994$ .

Si bien este parámetro ASTM discrimina bien las partículas prismáticas, en partículas con buena esfericidad (redondez 2D) como las de la figura C (Cox: 0.64, ASTM: 0.9053) y D (Cox: 0.6728, ASTM: 0.9133) les otorga un valor más alto que el parámetro de Cox, aunque sigue guardando correlación y dando como resultado una partícula esférica. A pesar de las diferencias numéricas, ambos métodos mantienen una correlación consistente, identificando fundamentalmente que se trata de partículas esféricas. Sin embargo, el parámetro ASTM demostró una mayor capacidad para describir la esfericidad de las partículas en esta investigación.

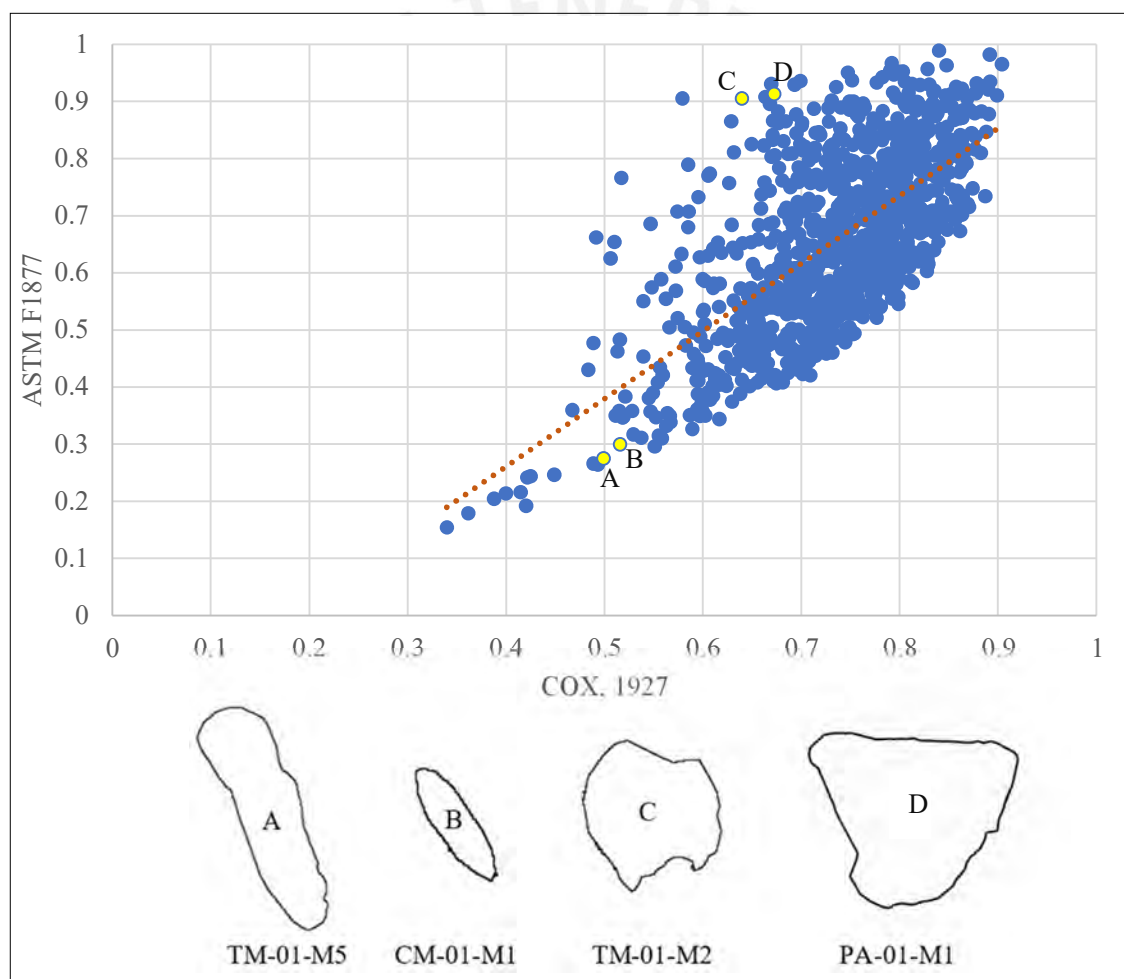


Figura 9.3: Diagrama de dispersión de parámetros de esfericidad utilizados. A = Partícula de arena TM-01-M5 (Cox = 0.4994; ASTM = 0.2747). B = Partícula de arena CM-01-M1 (Cox = 0.5162; ASTM = 0.29994). C = Partícula de arena TM-01-M2 (Cox = 0.64; ASTM = 0.9053). D = Partícula de arena PA-01-M1 (Cox = 0.6728; ASTM = 0.9133).

Las tres arenas se clasifican como medianamente esféricas, siendo la arena de Paracas la que muestra el mayor grado de esfericidad. Esta característica muestra una correlación directa con su comportamiento en la curva de Resistencia a la Licuefacción Cíclica (CRR). De esta manera, la alta esfericidad de las partículas implica una distribución más uniforme con mayores espacios intersticiales. Esta estructura menos compacta permite que las partículas se muevan con mayor libertad cuando se enfrentan a fuerzas externas como vibraciones sísmicas o presiones dinámicas. También, al igual que las partículas redondas, las partículas esféricas presentan menos puntos de contacto y fricción, reduciendo la resistencia a la licuefacción.

### **9.2.3. Correlación de Rugosidad y Potencial de Licuefacción**

El análisis de la dimensión fractal de rugosidad ( $D_r$ ) en las muestras presenta valores diferenciados para cada ubicación. La arena de Paracas presenta el menor  $D_r$  (13.13) seguido por Tambo de Mora (13.81) y Canchamaná ( $D_r$  de 19.18). Esto se correlaciona parcialmente con lo observado en las curvas, donde Paracas al presentar una superficie más lisa ( $D_r$  más bajo), mostró menor resistencia a la licuefacción debido a la reducida fricción intergranular y adherencia entre granos. Sin embargo, según este parámetro, Canchamaná de  $D_r$  más alto que Tambo de Mora debería ofrecer más resistencia a la licuefacción, pero en su curva CRR ofrece menor resistencia que Tambo de Mora. Esta discrepancia sugiere que la dimensión fractal de rugosidad no constituye un factor determinante único, sino que el comportamiento mecánico de las arenas ante esfuerzos cíclicos resulta de la interacción compleja de los múltiples parámetros morfológicos.

### **9.3. Correlación de Potencial de Licuefacción, Mineralogía y Parámetros Morfológicos**

El análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) revela que las tres arenas poseen composiciones mineralógicas similares, aunque presentan variaciones en sus proporciones. En todas predominan los silicatos, principalmente cuarzo, plagioclasa y ortoclasa. No obstante, la arena de Paracas destaca por contar con mayor contenido de cuarzo (36%) en comparación con

las arenas de Canchamaná (24%) y Tambo de Mora (27%). Este factor mineralógico mineralógico, le otorga una mayor resistencia a la arena de Paracas sobre la deformación y la ruptura bajo esfuerzos aplicados, en comparación con las otras dos arenas.

#### **9.4. Implicancia de la Densidad de Campo**

Según los resultados obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico (ver capítulo 8.4), la arena de Paracas, bajo una presión de confinamiento de 200 kPa y una densidad baja ( $D_r=30\%$ ), es la más susceptible a licuar. Esta susceptibilidad se correlaciona directamente con los parámetros morfológicos obtenidos mediante análisis de imágenes bidimensional (mayor redondez, esfericidad y menor textura superficial). Sin embargo, existe un factor fundamental que debe considerarse para explicar el comportamiento real en terreno: la densidad seca o *in situ*. Esta se refiere a la densidad del material en el campo y se expresa como la relación entre la masa de suelo seco y el volumen total que ocupa en su condición natural, y puede variar dependiendo de las condiciones de terreno (humedad y grado de compactación natural). Existen diversos métodos para su determinación, los cuales varían principalmente en la forma de determinar el volumen, como el método de cono y arena, el método volumétrico y el método nuclear (densímetro nuclear).

Para contextualizar este concepto en el proceso de licuefacción, es necesario analizar eventos sísmicos reales. Según la gráfica de correlación entre magnitud del sismo y número de ciclos equivalentes (Figura 9.4), el terremoto de Pisco (15/08/2007) de magnitud 7.0 ML (escala de Richter) y 7.9 Mw (Escala de Momento) generó aproximadamente una cantidad de 20 ciclos. Durante este evento, los suelos arenosos de Canchamaná y Tambo de Mora licuaron, mientras que el de Paracas no (Figura 9.5). Este comportamiento de Paracas se relaciona directamente a la densidad de campo o *in situ*. La arena de Paracas al haber sido remodelada a una densidad medianamente densa ( $D_r = 60\%$ , utilizado en esta investigación), incrementa notablemente su resistencia a la licuefacción en comparación con los resultados obtenidos a menor densidad ( $D_r$

= 30) (Figura 9.6). A esta mayor densidad, la arena de Paracas mostró mayor resistencia a la licuefacción que Canchamaná y Tambo de Mora, las cuales sí licuaron durante el terremoto. Esto sugiere que la arena de Paracas presenta una mayor densidad de campo que Canchamaná y Tambo de Mora, lo cual incrementó significativamente su resistencia a la licuefacción durante el evento sísmico. Estas descripciones de Paracas como arena medianamente densa se corroboran en el informe de Palomino (2021), cuyos ensayos se ubican a 14 km de las arenas estudiadas y pertenecen a la misma formación geológica de depósitos residuales (Qh-re).

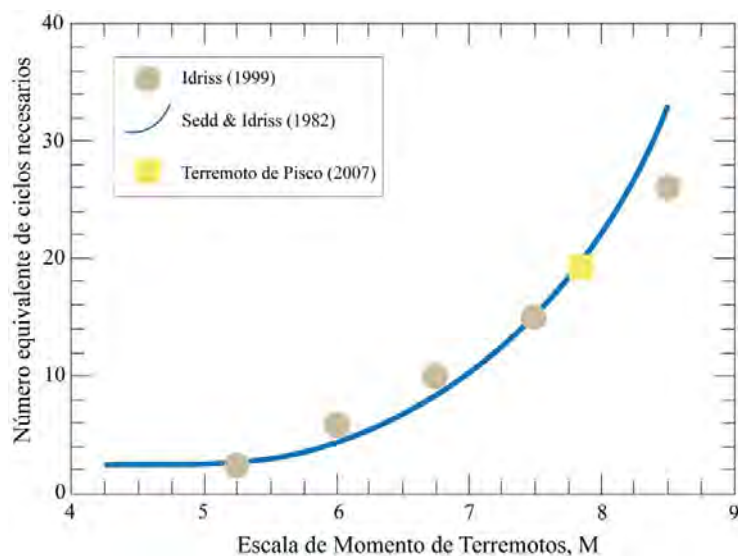


Figura 9.4: Gráfica de número promedio de ciclos equivalentes versus escala de momento de terremotos. Modificado de Inris y Boulanger (1995).

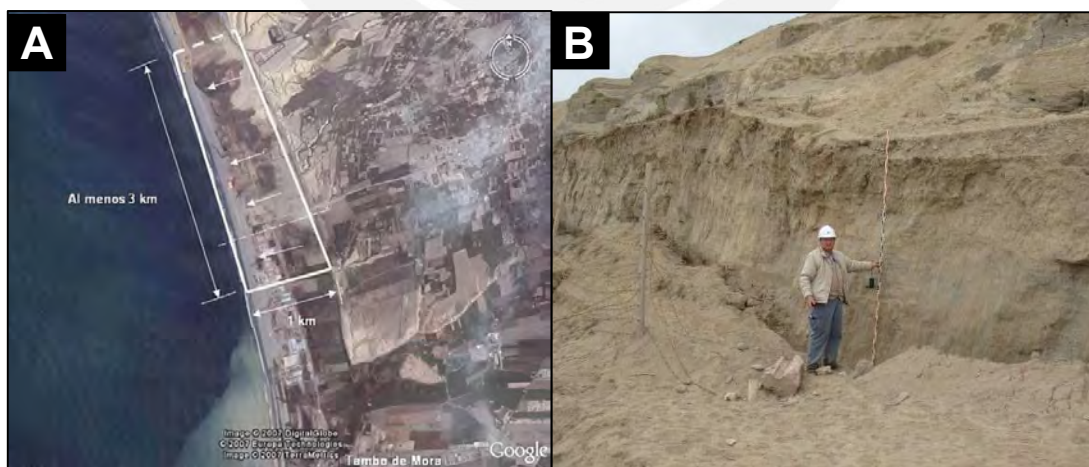


Figura 9.5: A. Desplazamiento lateral en Canchamaná. Tomado de Rodríguez-Marek et al., 2007. B: Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral en la zona de la Bajada del Socorro, Canchamaná. Tomado de Zavala et al., 2007.

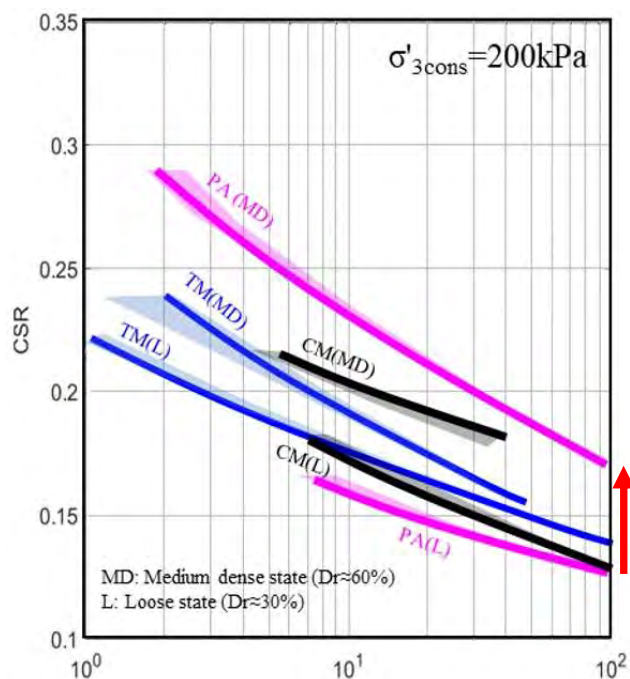


Figura 9.6: Curva CRR (Ratio de Resistencia cíclica) para presión de 200 kPa. Aumento de resistencia a la licuefacción de la arena de Paracas con una densidad media ( $D_r = 60\%$ ).

## 10. Validación de parámetros morfológicos – SEM

El análisis de las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitió validar los parámetros morfológicos medidos en dos dimensiones (2D) previamente, como la redondez, esfericidad y textura superficial, de las arenas de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora. Estas imágenes detalladas permiten observar las características microestructurales de los granos de arena y correlacionarlas con sus valores obtenidos.

En las imágenes por SEM de la arena de Paracas (PA-01-M3) (Figura 10.1), se identificó una alta proporción de partículas con formas más redondeadas y superficies lisas. Estas características coinciden con los valores elevados de redondez (0.947) y esfericidad (Cox: 0.754 y ASTM: 0.667), lo que indica partículas con bordes menos angulares.

Por otro lado, las imágenes de las arenas de Canchamaná (CM-01-M3) (Figura 10.2) revelan partículas con mayor textura superficial y formas más irregulares en comparación con Paracas.

Estas características se alinean con los valores más bajos de esfericidad (Cox: 0.732 y ASTM: 0.641) y redondez (0.938) observados en los análisis.

Las imágenes de Tambo de Mora muestran partículas que, si bien poseen formas más angulares que las de Paracas, presentan una rugosidad moderada. Este comportamiento es congruente con los valores intermedios de redondez (0.939) y esfericidad (Cox: 0.715 y ASTM: 0.657) obtenidos para esta muestra (Figura 10.3).

Estas observaciones confirman la validez de un análisis geomorfológico bidimensional como método representativo y replicable para caracterizar la morfología tridimensional de partículas de arena. Además, establece una base sólida para correlacionar las propiedades físicas de las partículas con su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga dinámica.

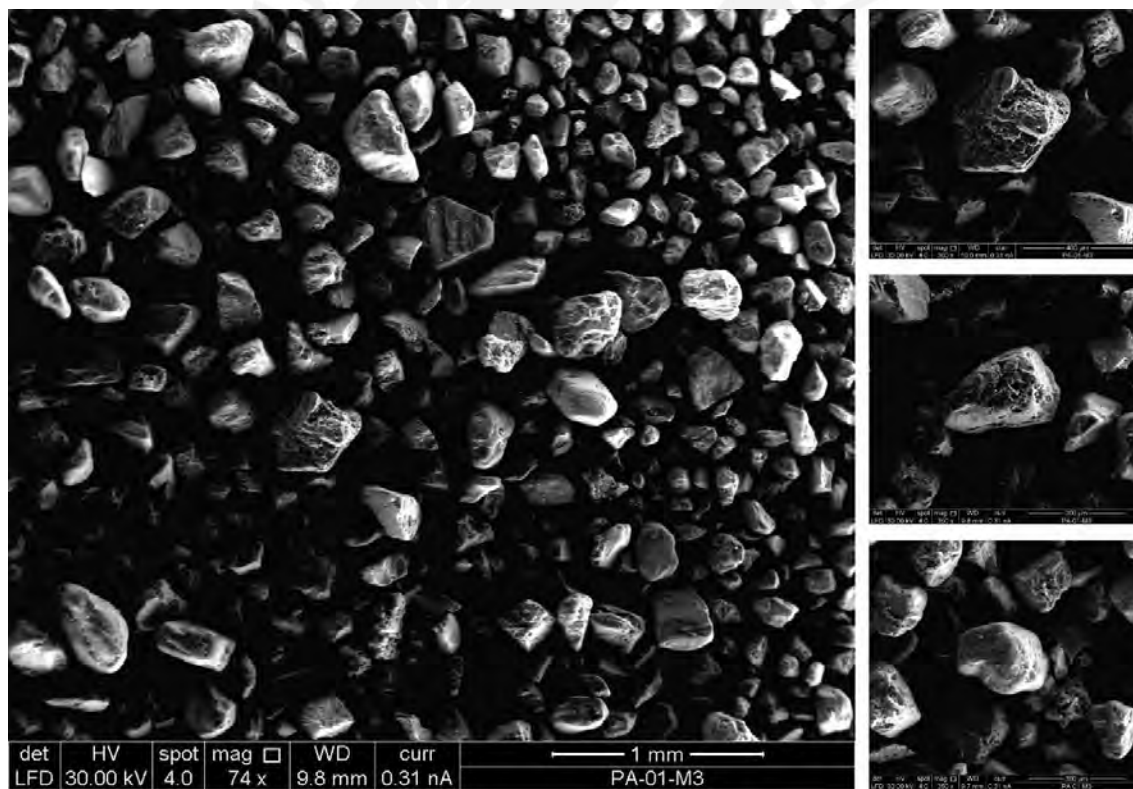


Figura 10.1: Imagen SEM de arena de Paracas (PA-01-M3).

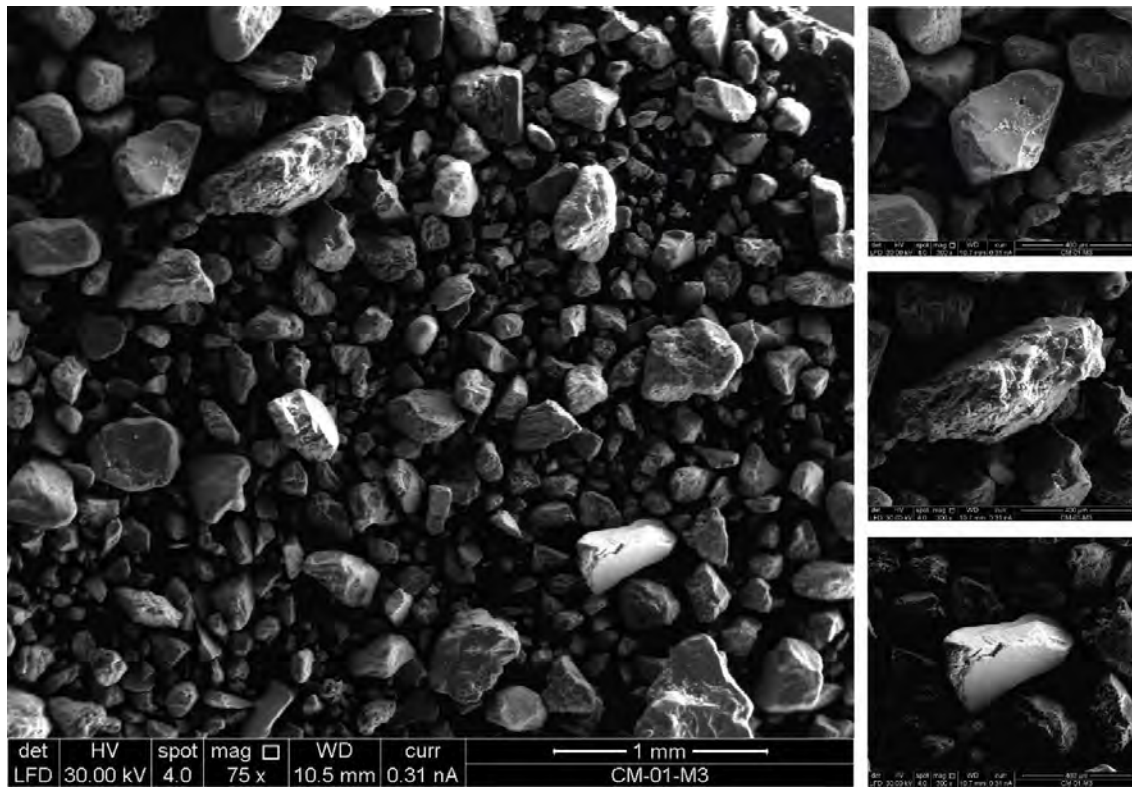


Figura 10.2: Imagen SEM de arena de Canchamaná (CM-01-M3).

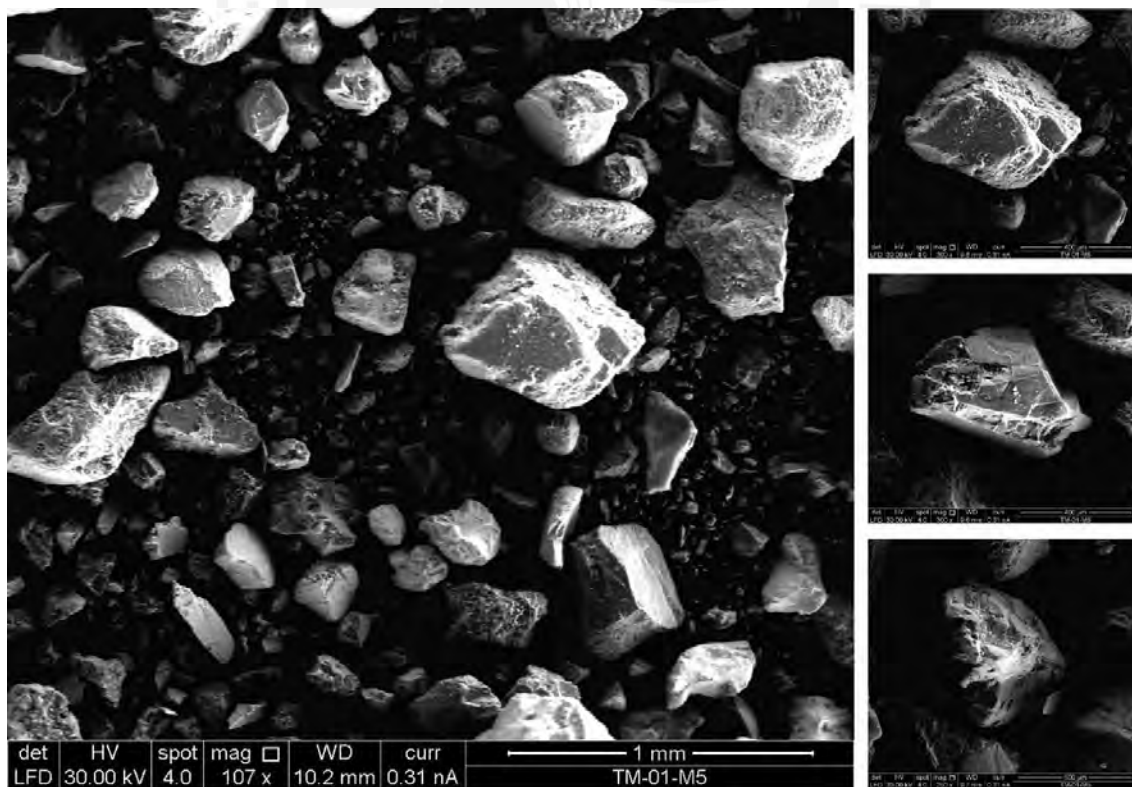


Figura 10.3: Imagen SEM de arena de Tambo de Mora (TM-01-M5).

## 11. Conclusiones

- El análisis comparativo de las curvas de resistencia cíclica a la licuefacción (CRR) bajo una densidad estandarizada y una presión de confinamiento efectiva de 200 kPa reveló diferencias significativas en el comportamiento geomecánico de las arenas de Paracas, Canchamaná y Tambo de Mora. Bajo estas condiciones, la arena de Paracas mostró la menor resistencia a la licuefacción, requiriendo el menor número de ciclos para fallar, mientras que la arena de Tambo de Mora exhibió la mayor capacidad de resistencia, seguida por Canchamaná. Sin embargo, es importante considerar que estos resultados corresponden a condiciones de laboratorio con una densidad equitativa. Las condiciones de campo pueden modificar significativamente el comportamiento del suelo arenoso como se evidenció en el terremoto de Pisco (2007), donde una mayor densidad de campo de la arena de Paracas previno su licuefacción, a diferencia de las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora. Esto demuestra que, aunque las características morfológicas de las partículas son indicadores importantes de la susceptibilidad a la licuefacción, la densidad de campo constituye un factor determinante que puede modificar significativamente el comportamiento real de los suelos granulares durante eventos sísmicos.
- Los resultados obtenidos muestran que la morfología de las partículas presenta un impacto significativo en el comportamiento mecánico de las arenas bajo condiciones de carga dinámica. En particular, la arena de Paracas, caracterizada por una alta redondez (0.950), alta esfericidad (Cox: 0.754 y ASTM: 0.667) y baja rugosidad ( $D_r = 13.13$ ), presenta menor resistencia a la licuefacción debido a su baja fricción intergranular y capacidad de entrelazado. Por el contrario, las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora que presentan menor redondez y esfericidad junto a una mayor rugosidad, exhiben mayor resistencia a este fenómeno.

- De los parámetros de esfericidad 2D utilizados, se evidenció diferencias significativas en la caracterización morfológica de partículas prismáticas. El parámetro de Cox tiende a asignar valores de esfericidad intermedios a estas geometrías. En contraste, el parámetro ASTM caracteriza estas partículas con valores de orden bajo demostrando una muestra mayor precisión.
- El análisis composicional por DRX evidencia una correlación directa entre el contenido de cuarzo y la resistencia a la licuefacción en arenas. En particular, la arena de Paracas, con un contenido de cuarzo del 36%, muestra una mayor capacidad de resistencia a la licuefacción, especialmente bajo condiciones de carga cíclica limitada (menos de 11 ciclos). En este contexto, la arena de Paracas requiere un esfuerzo cortante cíclico (CSR) significativamente más elevado para alcanzar la falla, en comparación con las arenas de Canchamaná y Tambo de Mora. Esto, evidencia la importancia de la composición mineralógica como factor determinante en la evaluación de la estabilidad geomecánica de los suelos arenosos.
- La presente investigación demuestra la eficacia de ejecutar un análisis morfológico bidimensional cuantitativo para caracterizar parámetros geotécnicos de las arenas, estableciendo una metodología reproducible para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción en diferentes contextos geológicos. Las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) corroboran los valores bidimensionales medidos.

## 12. Referencias

- Allen, T. (1997). Particle size measurement, Vol. 2. Surface area and pore size determination. Chapman and Hall, 5th edition, 252 p.
- Altuhafi, F., O'Sullivan, C. y Cavarretta, I. (2013). "Analysis of an image based method to quantify the size and shape of sand particles." *J. Geotech. Geoenviron, Eng.* 139 (8), 1290–1307. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000855>
- Anselmetti, F., Luthi, S. y Eberli, G. (1998). Quantitative characterization of carbonate pore systems by digital image analysis. *AAPG Bulletin*, 82, 1815-1836.
- ASTM International. (2010). Standard practice for characterization of particles (ASTM F1877-05R10). ASTM International, 15 p.
- Carr, A., Misra, M. y Litchfield, A. (1992). Estimating Surface Area for Aggregate in the Size Range 1 mm or Larger. *Transportation Research Record*, 20-27.
- Chermant, J.-L. (2001). Why automatic image analysis? An introduction to this issue. *Cement and Concrete Composites*, 23(2-3), 127-131. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00077-9)
- Cox, E. (1927). A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*, 1, 179-183. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-method-of-assigning-numerical-and-percentage-to-Cox/b4e1fca214f6a3d69ad0cc6a4b63ad9b97db6904>
- Fernlund, J. (2005). Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1629-1637. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.017>

- Hyslip, J. y Vallejo, L. (1997). Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. *Engineering Geology*, 48(3), 231-244.  
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00046-X)
- Holtz, R. y Kovacs, W. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering, 1, 733 p.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2517725>
- Idriss, I. y Boulanger, R. (1995). Soil liquefaction during earthquakes. 2, 264 p.  
<https://istasazeh-co.com/wp-content/uploads/2023/02/Soil-Liquefaction-During-Earthquakes-M.-Idriss-and-Ross-W.-Boulanger.pdf>
- Idriss, I. y Boulanger, R. (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 115-130). <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.023>
- International Organization for Standardization. (2008). ISO 9276-6: Representation of results of particle size analysis — Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology (ISO Standard No. 9276-6:2008). Ginebra, Suiza.  
<https://www.iso.org/standard/39389.html>
- Kenney, T. y Lau, D. (1985) Internal Stability of Granular Filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 215-225.  
<http://dx.doi.org/10.1139/t85-029>
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering* (653 p.). Prentice Hall.
- Krumbein, W. y Sloss, L. (1951). *Stratigraphy and Sedimentation*. *Soil Science*, 71, 401p.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-195105000-00019>
- Lakkimsetti, B. y Latha, G. (2023). Role of grain size and shape on undrained monotonic shear, liquefaction, and post-liquefaction behaviour of granular ensembles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, Article 108086, 1–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108086>

- Lees, G. (1964). A NEW METHOD FOR DETERMINING THE ANGULARITY OF PARTICLES. *Sedimentology*, 3(1), 2-21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1964.tb00271.x>
- Maerz, N. (2004). Technical and Computational Aspects of the Measurement of Aggregate Shape by Digital Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), 10-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(10))
- Mandelbrot, B. (1977). *Fractals: Form, chance, and dimension*. xvi, 265p. <http://www.gbv.de/dms/hbz/toc/ht000259020.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2003). Mapa de calificación de provincias según niveles de multiplicidad de peligros en el Perú. SINIA. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-calificacion-provincias-segun-niveles-multiplicidad-peligros-peru>
- Monge, R. y Montoya, A. (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Chincha (27-k) y Pisco (28-k), escala 1:50 000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Repositorio INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2077>
- Mertens, G. y Elsen, J. (2006). Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain-size distribution of sands used in mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1453-1459. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.004>
- Mora, C. y Kwan, A. (2000). Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing.” *Cement and Concrete Research*. 30 (3): 351–358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00259-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00259-8)
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy* (2nd ed). Wiley-Blackwell: Oxford, UK,

2009; 419p.

- Palomino, L. (2021). Servicio de consultoría para la Caracterización geotécnica-geofísica de dos zonas de estudio en el territorio nacional con depósitos de suelos blandos o sueltos ( $V_{s30} < 300$  m/s). 738 p. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/1981137-caracterizacion-geotecnica-geofisica-de-dos-zonas-de-estudio-en-el-territorio-nacional-con-depositos-de-suelos-blandos-o-sueltos-vs30-300-m-s>
- Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 187, 253–318. <https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007>
- Powers, M. (1953). A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. SEPM Journal of Sedimentary Research, 23 (2), 117-119 p. <https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Rittenhouse, G. (1943). A Visual Method of Estimating Two-Dimensional Sphericity. Journal of Sedimentary Petrology, 13(2), 79–81.
- Rodríguez-Marek, A., Alva Hurtado, J., Cox, B., Meneses, J., Montalva, G., Moreno, V., Olcese, M., Sancio, R. y Wartman, J. (2007). Aspectos geotécnicos del sismo de Pisco, Perú del 15 de agosto del 2007, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 7, No. 2-3, pp. 239-258.
- Santamarina, J. y Cho, G. (2004). “*Soil Behavior: The Role of Particle Shape*”. Conferencia sobre avances en Ingeniería Geotécnica. London, 29-31 de marzo, 604-617. [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2)
- Schneider, C., Rasband, W., y Eliceiri, K. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nature Methods, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

- Sladen, J., D'Hollander, R. y Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 564-578. <https://doi.org/10.1139/t85-076>
- Sukumaran, B. y Ashmawy, A. (2001). Quantitative characterisation of the geometry of discret particles. *Géotechnique*, 51(7), 619-627. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.7.619>
- Wadell, H. (1932). Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology*, 40(5), 443-451. <https://doi.org/10.1086/623964>
- Wentworth, K. (1922). The Shapes of Beach Pebbles; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1919; Volume 131, pp. 75–83.
- Zavala, G., Olcese, M., Zegarra, J. y Moreno, V. (2011). Caracterización geotécnica de localidades sujetas al fenómeno de licuefacción - El caso de Tambo de Mora. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 12(1). [https://www.scipedia.com/wd/images/8/8c/Draft\\_Content\\_279278715Zavala\\_et\\_al.pdf](https://www.scipedia.com/wd/images/8/8c/Draft_Content_279278715Zavala_et_al.pdf)
- [f](#)

### 13. Anexos

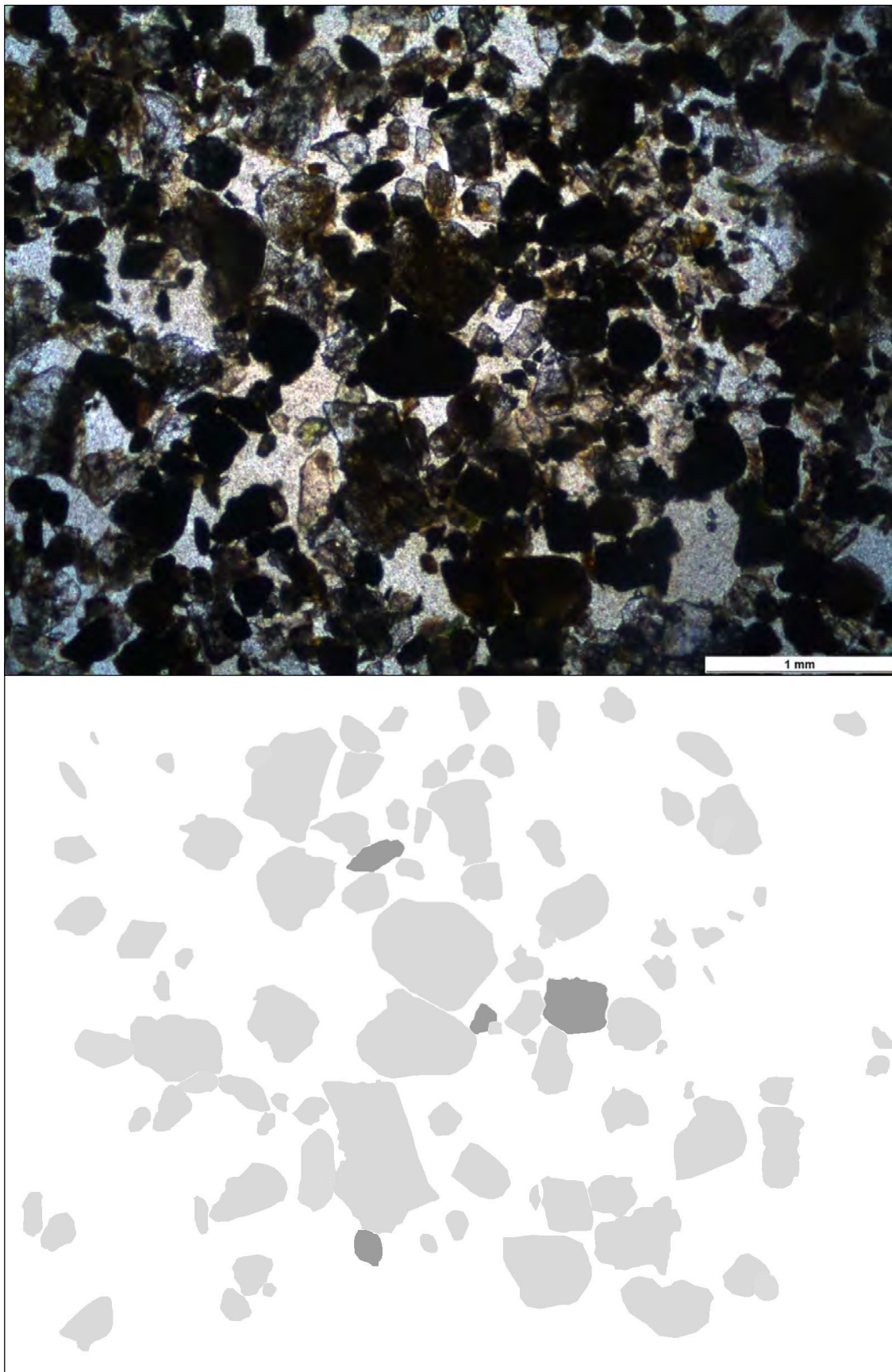
Anexo I: Nro. de Muestras estudiadas, ubicación, profundidad de procedencia. NF = Nivel Freático. SUCS= Sistema Unificado de Clasificación de suelos. SP= Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.

Ubicación	Muestra	Coordenadas UTM / Zona 18L (m)		Profundidad (m)		SUCS	Ensayo?	Observaciones
		X	Y	Desde	Hasta			
Canchamana	CM-01-M-1	372088 E	8513950 S	0.3	0.45	SP	Si	
	CM-01-M-2	372088 E	8513950 S	0.45	0.6	SP	Si	
	CM-01-M-3	372088 E	8513950 S	0.6	0.7	SP	Si	
Tambo de Mora	TM-01-M-2	371946 E	8512072 S	0.4	0.5	SP	Si	Saturado NF = 0.30 m
	TM-01-M-3	371946 E	8512072 S	0.5	0.6	SP	Si	Saturado NF = 0.30 m
	TM-01-M-4	371946 E	8512072 S	0.6	0.7	SP	Si	Saturado NF = 0.30 m
	TM-01-M-5	371946 E	8512072 S	0.7	0.8	SP	Si	Saturado NF = 0.30 m
Paracas	PA-01-M-1	364307 E	8469418 S	0.5	0.6	SP	Si	
	PA-01-M-2	364307 E	8469418 S	0.6	0.7	SP	Si	
	PA-01-M-3	364307 E	8469418 S	0.7	0.8	SP	Si	

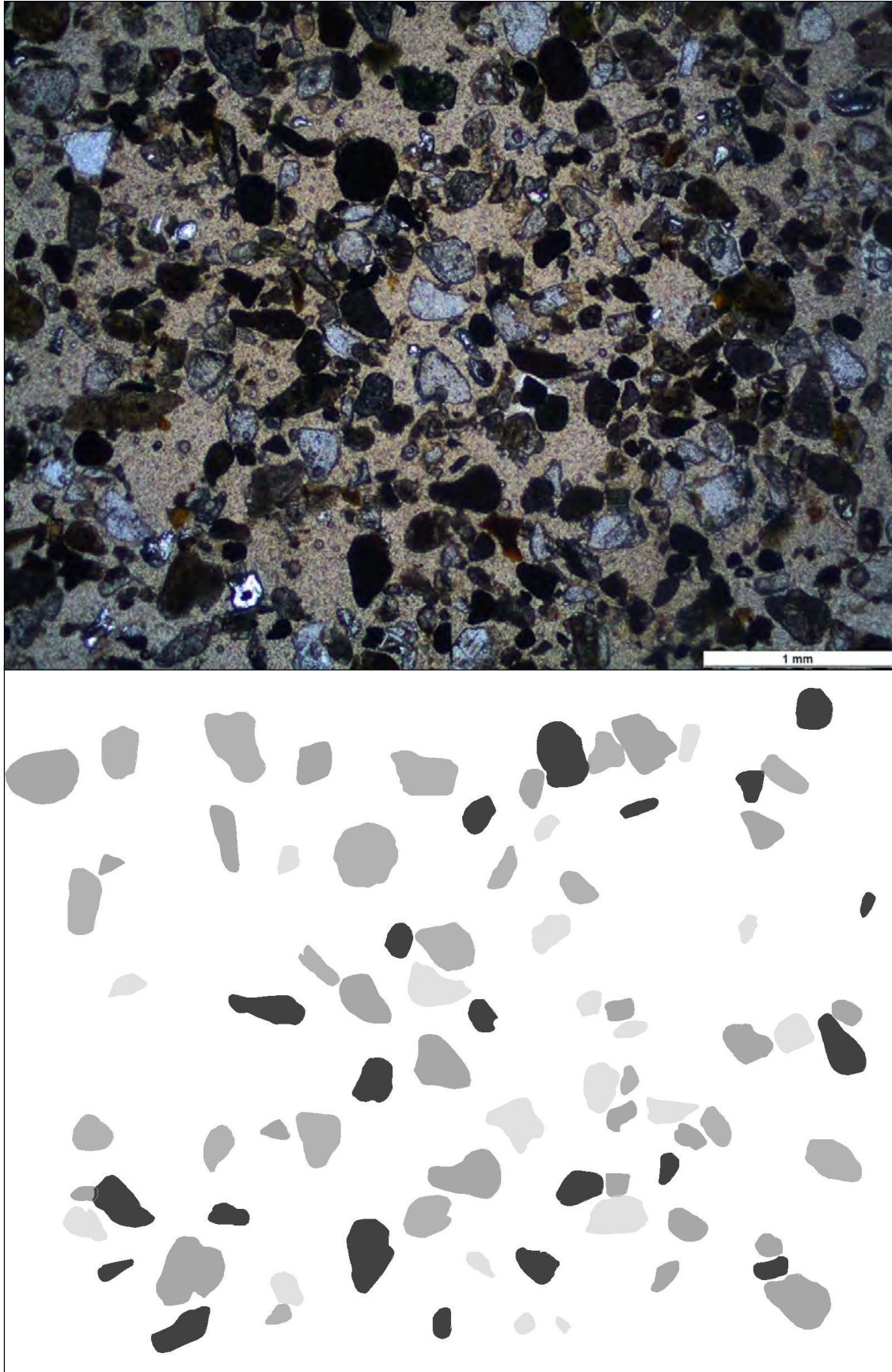
Anexo II: Pesos para la preparación de muestras para análisis en DRX y Microscopio Petrográfico.

Ubicación	Muestra	Coordenadas UTM / Zona 18L (m)		Profundidad (m)		Código	DRX (gr.)	Sección Delgado Pulida (gr.)
		X	Y	Desde	Hasta			
Canchamana	CM-01-M-1	372088 E	8513950 S	0.3	0.45	1644	3.066	5.205
	CM-01-M-2	372088 E	8513950 S	0.45	0.6	1645	3.277	5.565
	CM-01-M-3	372088 E	8513950 S	0.6	0.7	1646	3.058	5.397
Tambo de Mora	TM-01-M-2	371946 E	8512072 S	0.4	0.5	1647	3.158	5.687
	TM-01-M-3	371946 E	8512072 S	0.5	0.6	1648	3.191	5.858
	TM-01-M-4	371946 E	8512072 S	0.6	0.7	1649	3.283	5.46
	TM-01-M-5	371946 E	8512072 S	0.7	0.8	1650	3.372	5.997
Paracas	PA-01-M-1	364307 E	8469418 S	0.5	0.6	1635	3.353	5.954
	PA-01-M-2	364307 E	8469418 S	0.6	0.7	1636	3.188	5.667
	PA-01-M-3	364307 E	8469418 S	0.7	0.8	1638	3.207	5.348

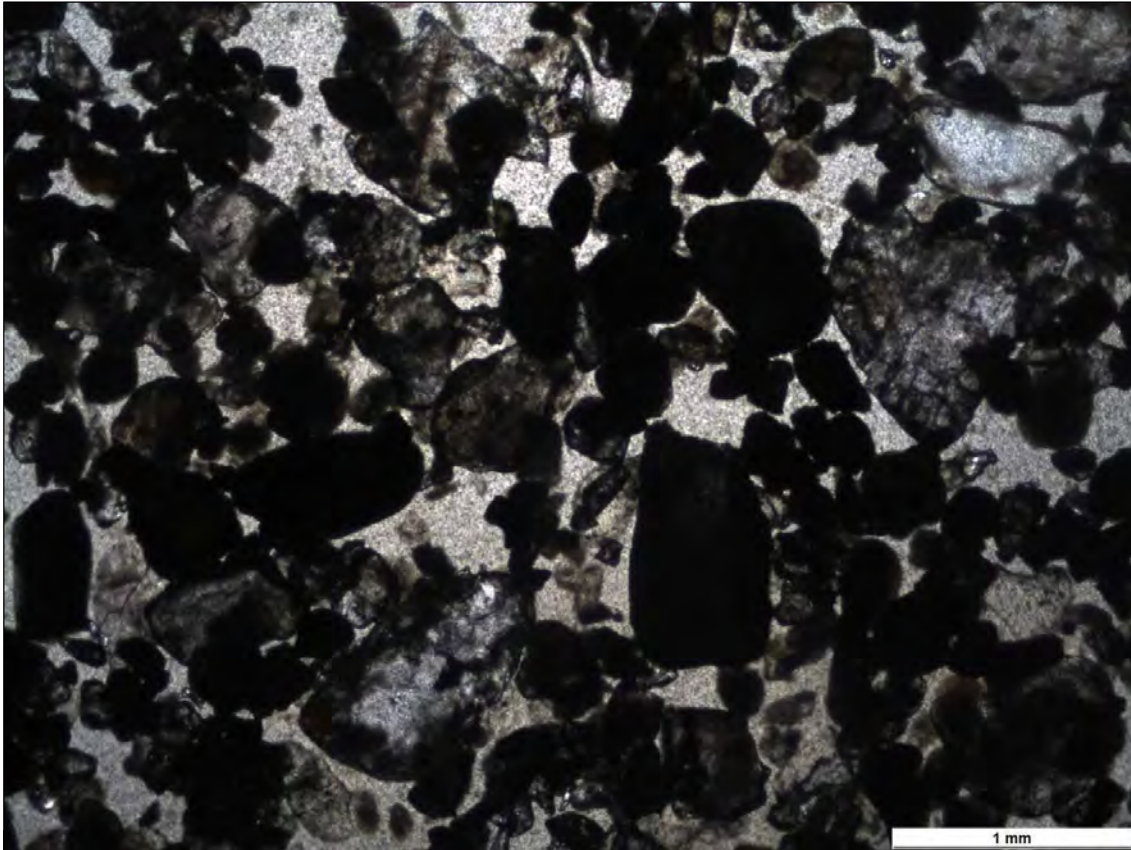
Anexo III: Partículas poligonizadas de Arena CM-01-M1 y sus respectivas capas.



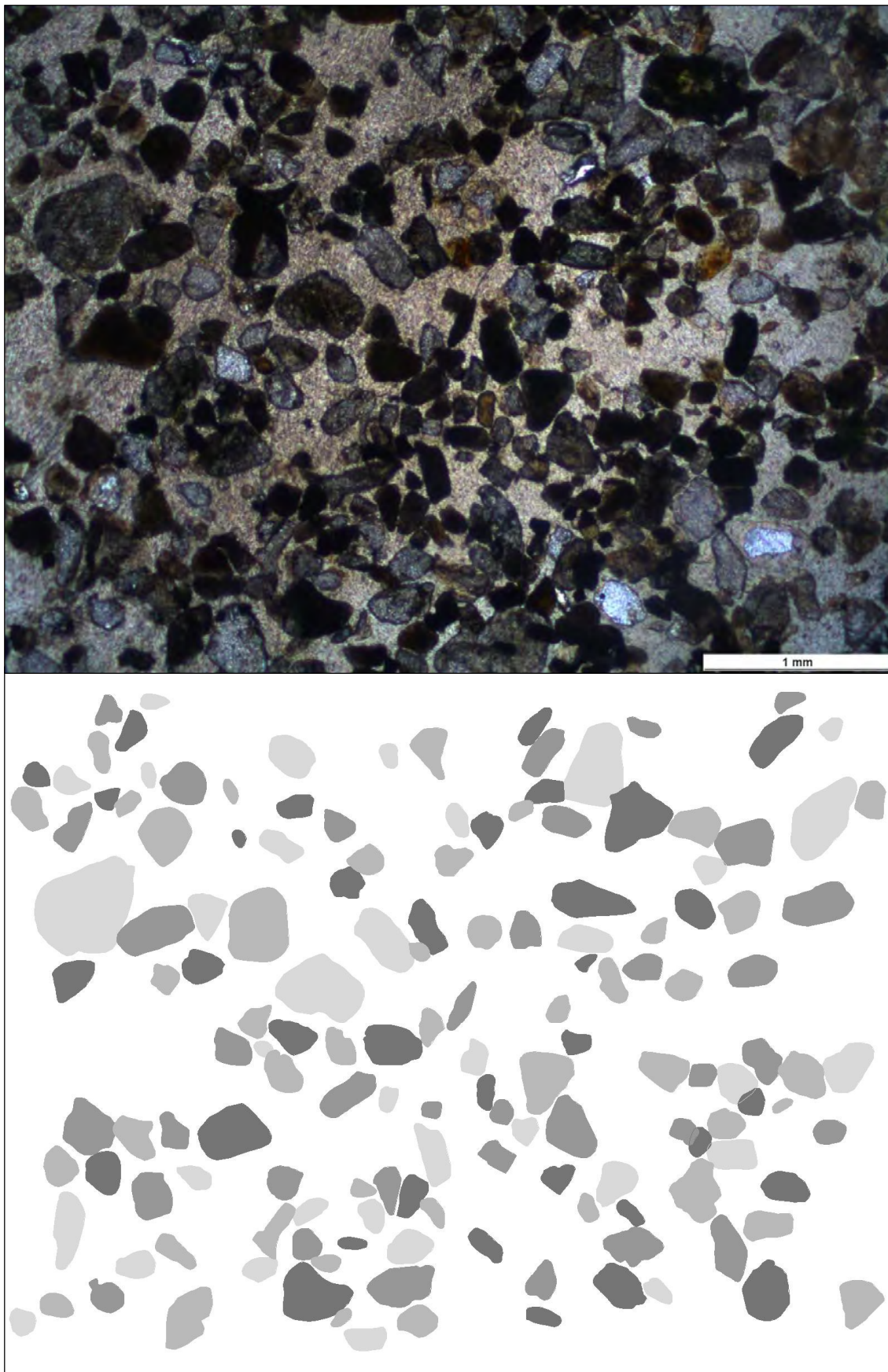
Anexo IV: Partículas poligonizadas de Arena CM-01-M3 y sus respectivas capas.



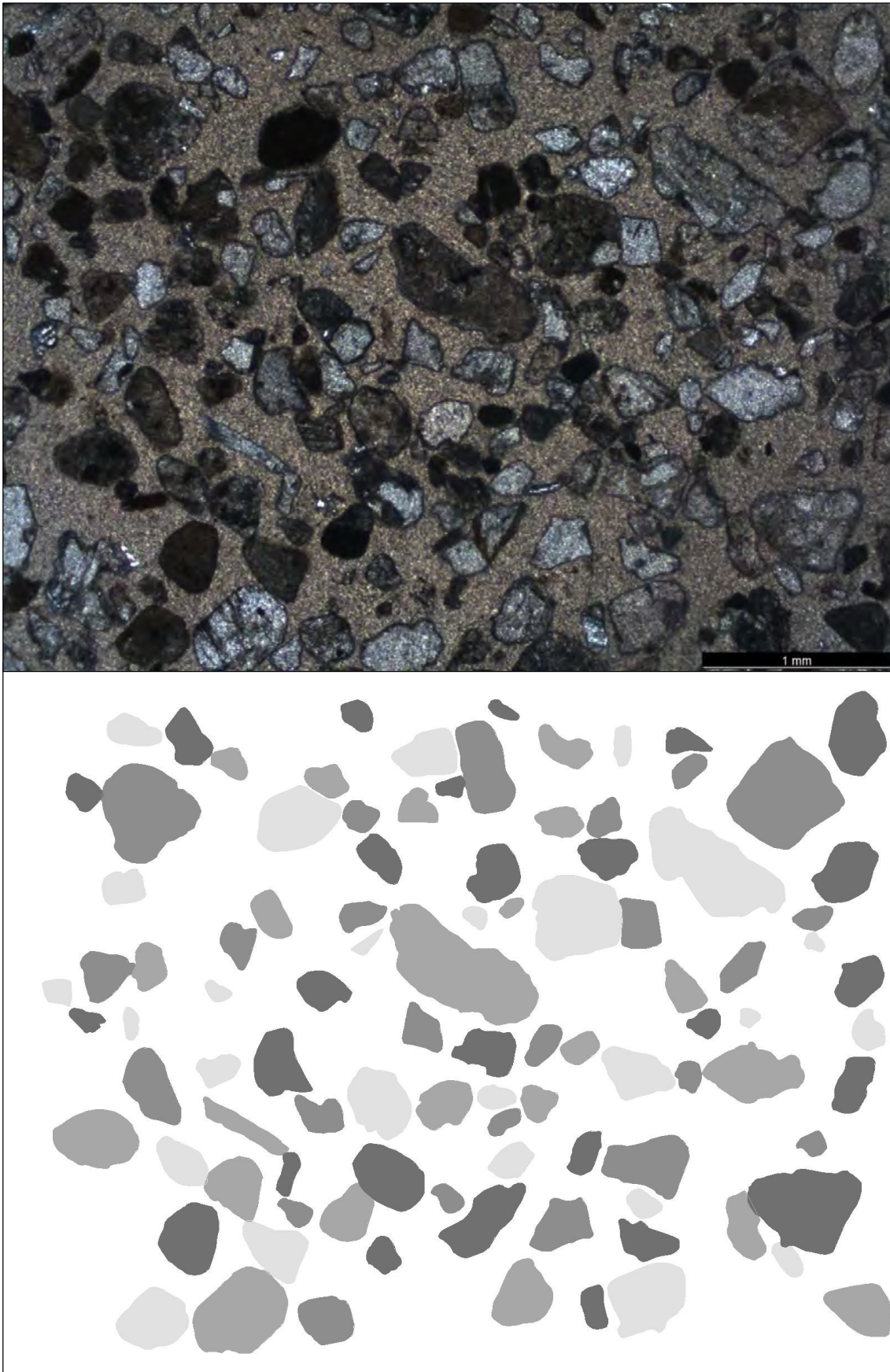
Anexo V: Partículas poligonizadas de Arena PA-01-M1 y sus respectivas capas.



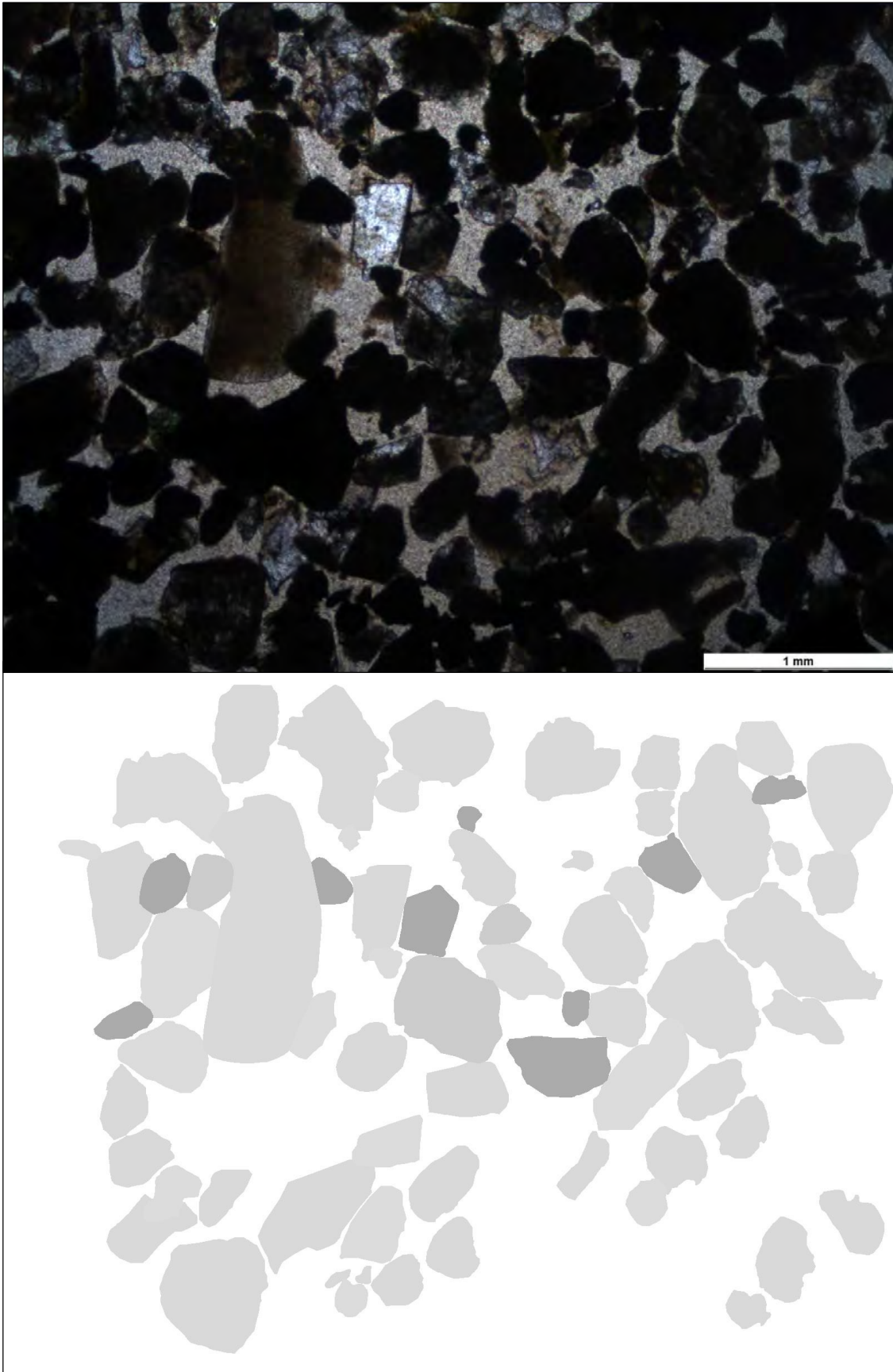
Anexo VI: Partículas poligonizadas de Arena PA-01-M2 y sus respectivas capas.



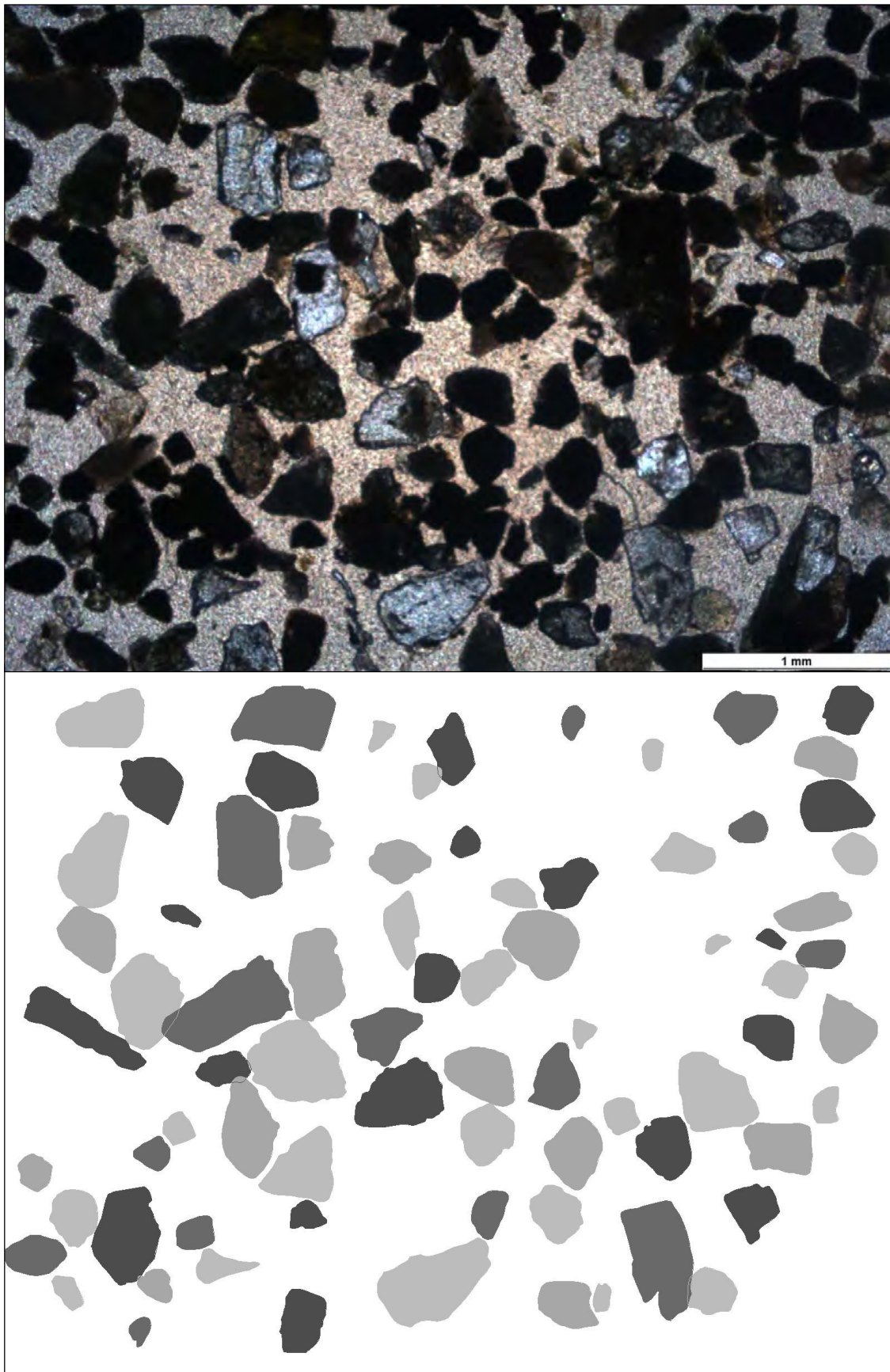
Anexo VII: Partículas poligonizadas de Arena PA-01-M3 y sus respectivas capas.



Anexo VIII: Partículas poligonizadas de Arena TM-01-M2 y sus respectivas capas.



Anexo IX: Partículas poligonizadas de Arena TM-01-M3 y sus respectivas capas.



Anexo X: Partículas poligonizadas de Arena TM-01-M4 y sus respectivas capas

