



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

GEOLOGÍA FORENSE Y EL DESARROLLO DE ESTE CAMPO EN CHILE, CON
ILUMINACIÓN POR CASOS DE ESTUDIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

JAVIERA PAZ ALVAREZ HERRERA

PROFESOR GUIA:

JACOBUS LE ROUX

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

KATJA DECKART

JOSE GARATE LAGOS

SANTIAGO DE CHILE

2017

GEOLOGÍA FORENSE Y EL DESARROLLO DE ESTE CAMPO EN CHILE, CON ILUMINACIÓN POR CASOS DE ESTUDIO

El presente estudio busca dar a conocer un campo poco conocido en Chile, la Geología Forense. Para ello se estudió un caso, que de acuerdo al artículo 467 del Código Penal chileno, estaría dentro de la definición de estafa y otros engaños. En el engaño asociado al caso de estudio, cierta mercancía fue trasladada desde Hong-Kong hasta Chile (haciendo escala en Miami) y fue reemplazada en alguna parte de su trayecto por sacos de arena. A través de estudios mineralógicos, granulométricos, geoquímicos, y principalmente, mediante el análisis de micro texturas en granos de cuarzo utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM en sus siglas en inglés) para la generación de las imágenes, se logra identificar el lugar en el que con mayor probabilidad se pudo haber llevado a cabo el intercambio de especies. De esta forma, si bien no que se logra hacer una comparación perfecta entre la muestra asociada a la estafa y la otra muestra de comparación restante, sí se logra acotar el lugar de intercambio a una región. Con el desarrollo de este caso se busca demostrar desde el punto de vista Forense de qué forma los materiales geológicos pueden ser utilizados como evidencia.

Además, se desarrolla un completo marco teórico en el que se exponen las metodologías más utilizadas actualmente en el mundo para el análisis forense del material geológico, se exponen casos de estudios publicados y se desarrolla un apartado especial para el análisis de suelos, ya que esta matriz ambiental es un elemento recurrente para analizar en diversos delitos.

En este trabajo, se buscaba también poder generar un vínculo con alguna institución asociada al análisis de muestras Forenses. En este caso, se logró establecer un contacto con el Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones de Chile, en el que se desarrolló una práctica, en la que fue posible realizar el análisis de micro texturas en granos de cuarzo a través de las imágenes generadas en el microscopio electrónico de barrido disponible en el laboratorio y un análisis espectroscópico vibracional (RAMAN) de algunos granos. Se pudo también presentar este tema a los integrantes del laboratorio, explicando cuál podría ser el aporte de un Geólogo en el análisis de muestras Forenses.

DEDICATORIA

"A man is a success if he gets up in the morning and goes to bed at night and in
between he does what he wants "

AGRADECIMIENTOS

Llegar hasta este punto no habría sido posible sin el incondicional apoyo de mi familia. Mis padres y hermanos, que estuvieron ahí para soportarme en los peores momentos, son una de las grandes razones del porqué estoy acá hoy día. Gracias por su total entrega en mi crianza, en querer darme lo mejor e inculcarme todos los valores que hoy me han convertido, en gran parte, en la persona que soy. Sin su ayuda y entrega este camino que he recorrido habría sido imposible. La vida nunca nos ha dado nada fácil, nos ha tocado duro y muchas veces quise renunciar, pero gracias a que desde siempre nos enseñaron a ser fuertes supe pararme y aquí estoy.

Por supuesto, no puedo dejar de mencionar a cada docente y profesional que me apoyó no solo en el transcurso de esta memoria, sino que a lo largo de toda mi carrera en la Universidad. Agradezco al profesor Jacobus Le Roux por interesarse en este tema de memoria tan poco común. Me llevo un preciado recuerdo de todos aquellos docentes que disfrutaban enseñar, que en cada clase demuestran que son profesores por vocación.

También debo agradecer al Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones de Chile, donde pude realizar una práctica durante este año y la cual fue fundamental para el desarrollo de esta memoria. Agradezco enormemente a mi tutor, y a todos los integrantes de la Sección de Microanálisis, quienes estuvieron siempre dispuestos a ayudarme en todo.

Finalmente, mi gran compañero de vida, el que tuvo que aguantar más que nadie, el que infinitas veces tuvo que darme la mano para poder ponerme en pie. Ya son ocho años juntos, tú más que nadie sabe lo que me costó llegar a donde estoy hoy en día, has vivido todo este proceso junto a mí y jamás me has abandonado, nunca me has dado la espalda, eres la persona más incondicional y leal que tengo a mi lado. Si logré entregar este trabajo, presentarlo y salir exitosa, en gran parte es gracias a todas las veces que me repetías que era capaz, que tenía que creer más en mí. No me va a alcanzar la vida para agradecer todo lo que has hecho por mí.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Formulación del estudio propuesto	1
1.3	Fundamentación y discusión bibliográfica	2
1.4	Enfoques y procedimientos actualmente en uso	5
1.5	Objetivos	6
1.5.1	Objetivo general	7
1.5.2	Objetivos específicos.....	7
1.6	Hipótesis de trabajo	8
1.7	Metodología	8
1.7.1	Fraude asociado al intercambio de mercancía por sacos de arena	8
1.7.2	Creación de vínculo o protocolo para la PDI.....	10
2	MARCO TEÓRICO	11
2.1	Geología Forense: su potencial y complicaciones	11
2.1.1	Uso de material terrestre como evidencia	14
2.1.2	Métodos de examinación.....	17
2.1.3	Instrumentos geofísicos y la búsqueda de cuerpos	21
2.1.4	Fraude de arte, gemas, mineral y mina	24
2.1.5	Análisis de suelos	25
2.1.6	Casos documentados	29
2.2	Análisis granulométrico y de ambiente sedimentario	34
2.2.1	Ambiente sedimentario: Playa.....	36
2.2.2	Distribución de tamaño de grano.....	39
2.3	Espectroscopia RAMAN	45
2.4	Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X mediante dispersión de energía (EDX-XRF).....	46
2.5	Microscopio electrónico de barrido (SEM)	47
2.5.1	Preparación de la muestra y configuración del SEM.....	49
2.5.2	Uso del SEM para el estudio de texturas superficiales en granos de cuarzo	52
2.5.3	Estudio de micro texturas en granos de cuarzo	54
3	RESULTADOS	63
3.1	Análisis mineralógico	63
3.2	Análisis geoquímico.....	65

3.2.1	Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X mediante dispersión de energía (EDX-XRF)	65
3.3	Análisis granulométrico	66
3.3.1	Muestras A, B, C, D y E	67
3.4	Análisis de microtexturas en granos de cuarzo	77
3.4.1	Muestra A (Arenas de origen desconocido asociadas a la estafa)	78
3.4.2	Muestra B (Playa de Miami, Florida, Estados Unidos)	80
3.4.3	Comparación muestra A y B	84
3.5	Análisis RAMAN	87
3.6	Estudios actualmente realizados en la PDI relacionados con la geología	90
4	DISCUSIONES	91
5	CONCLUSIONES	98
6	BIBLIOGRAFÍA	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Muestras analizadas en esta memoria y lugar del cual fueron tomadas.	2
Tabla 2.1:	Principales ambientes sedimentarios, Mc Laren(1995) y Le Roux (2012).	35
Tabla 2.2:	Escala propuesta por Udden-Wentworth (Wentworth,1992).	43
Tabla 2.3:	Términos descriptivos de selección de acuerdo a Folk y Ward (1957).	43
Tabla 2.4:	Términos descriptivos de asimetría de acuerdo a Folk y Ward (1957).	44
Tabla 2.5:	Términos descriptivos de curtosis de acuerdo a Folk y Ward (1957).	44
Tabla 2.6:	Resumen de las posibles muestras que se podrían analizar en el SEM y sus características principales.	50
Tabla 3.1:	Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra A.	68
Tabla 3.2:	Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra B.	70
Tabla 3.3:	Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra C.	71
Tabla 3.4:	Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra D.	73
Tabla 3.5:	Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra E.	74
Tabla 3.6:	Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos con el programa GRADISTAT.	76

Tabla 3.7: Descripción cualitativa para cada muestra.	76
Tabla 3.8: Microtexturas seleccionadas para realizar el análisis de los granos de cuarzo de las muestras A y B.	85
Tabla 3.9: Frecuencia de abundancia de las micro texturas en la superficie de los granos y su frecuencia de ocurrencia en porcentaje. h: alto, m: medio, l: bajo, -: escaso/ausente o no aplica a la descripción.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tabla en la que se resumen las distintas técnicas utilizadas hoy en día en el análisis de suelos. Tabla tomada de Morgan y Bull, 2007.	13
Figura 2.2: Tabla estándar de color de suelo desarrollada por Munsell (1973). En este caso se muestra solo la tabla asociada al color café mencionado como ejemplo previamente.	18
Figura 2.3: Figura que ilustra cómo se puede transferir el suelo en distintos delitos y los análisis tomados en cada caso. Figura tomada de Fitzpatrick (2013).	28
Figura 2.4: Esquema en el que se resumen las etapas de análisis de un suelo. La imagen es tomada de una publicación de Fitzpatrick (2013).	29
Figura 2.5: Esquema en el que se resumen las etapas de trabajo para llegar a la ubicación de los cuerpos. Tomado de Sagripanti (2013).	32
Figura 2.6: En este esquema se muestra como varía la resistencia del suelo dependiendo de su composición. Tomado de Sagripanti (2013).	32
Figura 2.7: Imagen en la que se muestran los dos suelos analizados. Tomada de Molina (2014).	33
Figura 2.8: Muestras para cotejo en el caso de secuestro y asesinato de 11 diputados. Tomado de Molina (2014).	34
Figura 2.9: Ejemplo de un histograma, tomado de Folk (1974).	40
Figura 2.10: Esquema en el que se representan los distintos grados de asimetría. (A) Simétrico, (B) Asimetría positiva, (C) Asimetría negativa. El esquema es tomado de Le Roux (2012).	40
Figura 2.11: Esquema que ilustra cómo se observa una buena y mala selección en una cruva de frecuencia. Tomado de Le Roux (2012)	40
Figura 2.12: Esquema en el que se ilustran los distintos grados de curtosis. Tomado de Le Roux (2012).	41

Figura 2.13: Curvas de frecuencia acumuladas en escala aritmética (izquierda) y probabilística (derecha). Tomado de Folk (1974).	41
Figura 2.14: En este esquema se muestra cómo se pueden identificar los tres medios de transporte de los granos. Tomado de Le Roux (2012).	42
Figura 2.15: Curvas cumulativas esquemáticas para mostrar las diferencias que se observan en dos ambientes distintos; playa (a) y dunas (b). Tomado de Le Roux (2012).	45
Figura 2.16: Resumen de las micro texturas y su abundancia en distintos ambientes. Esquema tomado de Vos (2014).	61
Figura 3.1: (A.1) y (A.2) corresponden a imágenes de la muestra estafa a distinto aumento (origen desconocido). (B) playa de Miami (USA), (C) playa de Daytowna (USA), (D) playa El Tabo (Chile), (E) playa Caleta Portales (Chile).	65
Figura 3.2: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda de la muestra, mientras que en la frecuencia acumulada ya se pueden distinguir las distintas rectas asociadas a los medios de transporte.	68
Figura 3.3: Se observa que los granos se concentran principalmente entre 1,25 y 3,25.	69
Figura 3.4: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda de la muestra, mientras que en la frecuencia acumulada ya se pueden distinguir las distintas rectas asociadas a los medios de transporte.	70
Figura 3.5: Se puede observar la distribución de los granos y que la mayoría quedan retenidos entre las mallas #35 a #60, en este histograma no queda tan evidenciada la predominancia de un cierto tamaño de grano.	70
Figura 3.6: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda y de forma cualitativa la simetría, selección y curtosis. En la curva de frecuencia acumulada lo que podría ser la recta correspondiente a la saltación no es tan evidente.	72
Figura 3.7: Se puede observar la distribución de los granos y es evidente la predominancia de un cierto tamaño de grano (180 μ m).	72
Figura 3.8: Al igual que en la muestra C la posible recta asociada a la saltación no se observa tan claramente en este tipo de gráfico (frecuencia acumulada). La curva de frecuencia es bastante clara y permite dar una primera impresión respecto a la simetría, selección y curtosis de la muestra.	73
Figura 3.9: Al quedar la mayoría de los granos retenidos en una sola malla (#60) el histograma muestra esto de forma bastante evidente.	74
Figura 3.10: En esta muestra la curva de saltación ya se hace evidente al mirar la curva de frecuencia acumulada. Respecto a su curva de frecuencia está al igual que en las otras muestras permite tener una primera impresión respecto a ciertas características como la selección, asimetría y curtosis.	75

- Figura 3.11: Se observa la distribución de los granos y que estos quedan retenidos preferentemente entre valores de phi de 0,52 y 1,52. 75
- Figura 3.12: Frecuencias acumulativas en papel probabilístico. 77
- Figura 3.13: Se observan granos de cuarzo pertenecientes a la muestra A con distintas formas. (A) sub-elongado, presenta gran cantidad de marcas con forma de media luna y en menor medida surcos curvos (B) elongado, presenta marcas con forma de V y en menor medida surcos profundos, (C) bulboso, se pueden observar depresiones elongadas y por último (D) corresponde a un grano esférico. 79
- Figura 3.14: Granos obtenidos a partir de la muestra A, (a) Grano elongado con bordes sub-redondeados. Evidencia un plano de fractura y además presenta abundantes marcas con forma de V en su superficie y en menor medida surcos curvos, (b) es una ampliación de (a), donde es posible observar pits de disolución con forma irregular, (c) grano sub-elongado en el que se pueden observar grandes surcos, (d) ampliación de (c) en donde se logra ver las marcas en forma de V además de algunos surcos rectos. 80
- Figura 3.15: Granos pertenecientes a la muestra B, (a) Grano subelongado, (b) ampliación de (a) en donde es posible observar en detalle los pits de disolución orientados, (c) grano elongado en el que se logran observar platos invertidos, (d) se aprecian las marcas en forma de V y pits de disolución, (e) grano bulboso, presenta marcas con forma de V y con forma de media luna, en (f) se logran observar pits de disolución circulares. 82
- Figura 3.16: Grano pertenecientes a la muestra B, (a) Grano elongado cuya superficie se presenta suavizada y con múltiples fracturas concoidales pequeñas, (b) ampliación de las fracturas concoidales de (a), (c) grano elongado que presenta una fractura y múltiples marcas con forma de V y (d) ampliación de rasguños observados en (b), en (e) se observa un grano elongado con bordes subangulosos, la abrasión de su superficie es alta, (f) es un grano con grandes hoyos en su superficie, además de marcas de V de mayor tamaño, también se observan marcas con forma de media luna. 83
- Figura 3.17: Una de las diatomeas observada en la muestra B. 84
- Figura 3.18: Gráfico en el que se puede comparar la ocurrencia de micro texturas en ambas muestras. Se observa que estas son bastante similares y que predominan las micro texturas 1,7,16,18,25 y 29. 87
- Figura 3.19: Algunos de los espectros RAMAN que fueron tomados de los granos de las muestras A y B. 87
- Figura 3.20: Espectro RAMAN referencial para el cuarzo- α obtenido de la base de datos online generada por el Laboratorio de Geología de Lyon. 88
- Figura 3.21: Otro espectro referencial para el cuarzo- α obtenido de la página web del proyecto RRUFF, que corresponde a una muestra de cuarzo obtenida en la localidad de Spruce Claim, Washington, USA. 89

Figura 3.22: Comparación entre 5 de los 10 espectros obtenidos a partir de granos de la muestra A, con un espectro de referencia obtenido de la base de datos online generada por el Laboratorio de Geología de Lyon. Se indican los peaks relevantes.	90
Figura 4.1: Mapa que muestra la trayectoria que siguió la mercancía que fue reemplazada.	91
Figura 4.2: Columna estratigráfica de florida (norte y sur). Esta fue obtenida de la colección digital que tiene la Universidad de Florida en su página web.	93
Figura 4.3: Se comparan los espectros de los cuarzos de la muestra A(izquierda) con un espectro de referencia de la Universidad de Lyon (derecha).	97
Figura 4.4: Espectros RAMAN de polimorfos del cuarzo (a) coesita, (b) cristobalita, (c) tridimita, (d) stishovita. Estos espectros fueron obtenidos a través de la base de datos online de la Universidad de Lyon.	97

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En Chile el principal campo en que se ha desarrollado la Geología es en la Industria de la minería, lo que no es de extrañar siendo este país uno de los mayores productores de cobre del mundo, junto con otros metales base (molibdeno) y preciosos (como el oro). Otras áreas que se han ido potenciando en los últimos años han sido la Hidrogeología, Geología Ambiental y la Geología Aplicada.

En países como Estados Unidos, la Geología Forense es de gran importancia y se trabaja principalmente en las instituciones encargadas de investigar los distintos crímenes, como lo es el FBI (Federal Bureau of Investigation), donde cuentan con laboratorios de alto nivel en los cuales analizan los distintos materiales geológicos. Otra organización, cuyo objetivo es desarrollar la Geología Forense y promover sus aplicaciones, corresponde a la Iniciativa en Geología Forense (IFG) de la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas (IUGS) la cual se estableció el 22 de febrero del 2011 en la oficina central de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO en sus siglas en inglés) en París. En el caso de Sudamérica, países como Argentina y Colombia ya han desarrollado equipos de Geología Forense y han trabajado en diversos casos de la mano con sus instituciones de justicia. Es por ello que esta memoria pretende presentar este nuevo campo en Chile y sus posibilidades de desarrollo, exponiendo diversos casos de estudio, algunos previamente documentados y aquel en el que se centrará esta memoria sobre el cual se realizarán diversos análisis y se dará una conclusión en base a estos.

1.2 Formulación del estudio propuesto

La Geología Forense es un término prácticamente desconocido en Chile. Esta ciencia aplica las distintas técnicas e información geológica a casos que pueden ser presentados frente a una corte, es decir, se aplica la geología a investigaciones criminales (Pye, 2005).

En esta memoria se expondrán diversos casos de estudio, metodologías utilizadas y resultados. El caso principal se centrará en una estafa, en la cual mercancía traída desde Asia (Hong-Kong) a Sudamérica (Chile), con escala en Norte América (Miami), fue reemplazada por bolsas de arena. Se analizarán cinco muestras, las cuales corresponderán al material que venía en las bolsas que reemplazaron a la mercancía original, arena de la playa de Miami, de la playa Daytona y arenas que corresponden a playas de las costas de Chile, específicamente de la Región de Valparaíso (playas El Tabo y Caleta Portales). En la tabla 1.1, se indican las muestras con su respectivo rótulo o código, el que será utilizado de aquí en adelante para referirse a ellas. Se realizarán diversos análisis con el objetivo de identificar el origen de las bolsas de arena y con esto poder definir el lugar donde fue realizado el intercambio de especies, mostrando de esta forma como la geología puede ayudar a resolver casos criminales. Este tipo de estafa es muy común, por lo que sería importante poder hacer un aporte respecto a metodologías y formas de abordar casos de este tipo, para que pueda servir como una referencia en el futuro.

Muestra	Localidad/Origen
A	Estafa, origen desconocido
B	Playa Miami, Florida, Estados Unidos
C	Playa Daytona, Florida, Estados Unidos
D	Playa El Tabo, Valparaíso, Chile
E	Playa Caleta Portales, Valparaíso, Chile

Tabla 1.1: Muestras analizadas en esta memoria y lugar del cual fueron tomadas.

También se busca establecer un nexo con la Policía de Investigaciones de Chile (PDI) para dar a conocer esta área de la Geología y de esta forma ir creando de a poco un vínculo, esperando que en un futuro se pueda desarrollar este campo en el país.

A través de los resultados de este y otros casos ya estudiados, se hace notar la necesidad de analizar cuáles son las posibilidades de abrir este nuevo campo en Chile, siendo una innovación y aporte, tanto al país como a la ciencia.

1.3 Fundamentación y discusión bibliográfica

El primer caso documentado en el cual se investigó un fraude de sustitución, ocurrió el 16 de abril de 1856 en Prusia. Se trató de un ferrocarril en el que un tonel que contenía monedas de plata llegó sin estas a su destino, a cambio se encontró arena en su interior. Un científico adquirió muestras de las arenas del vagón de carga y de las estaciones por las cuales pasó el tren en su trayecto. Con un microscopio, buscó relacionar el lugar donde sucedió el cambio de mercancía por arena (Molina, 2014). Este caso tan antiguo resulta ser el mismo tipo de estafa que se estudiará en el caso central de esta memoria.

En el año 1904 se desarrolla el primer caso de Geología Forense sustentado por los estratos judiciales. Esto ocurrió en Alemania, donde el científico forense, George Popp, resolvió un caso judicial diferenciando minerales y otros elementos encontrados en el suelo. En América las primeras investigaciones se sitúan en Estados Unidos hacia 1921. El FBI crea su laboratorio de suelos y rocas en 1935 (Molina, 2014).

Un caso muy conocido en el que la Geología Forense aportó con evidencia, fue en el asesinato del primer ministro italiano Aldo Moro el 16 de marzo de 1978. Aldo Moro fue capturado vivo por miembros del grupo terrorista de las Brigadas Rojas. Luego de cincuenta y cinco días en los que el gobierno no quiso negociar con los terroristas, estos dejaron como mensaje un auto que contenía el cuerpo del recientemente asesinado Aldo Moro. Se recopilaron pequeñas muestras de arena y fragmentos de plantas de la ropa y sábana en la que venía envuelto el cuerpo. Además, se obtuvieron muestras del maletero, parachoques y de las llantas del auto. El geólogo a cargo de la investigación fue Gianni Lombardi. Los resultados de los análisis de la arena encontrada en los dobleces de los pantalones, zapatos y de la sábana, mostraron que esta era similar. Los granos eran redondeados y con buena selección, lo que sugería un ambiente en el que la arena se hubiese movido rápidamente. También fueron encontrados fragmentos de conchas comúnmente provenientes de playas. Algunos granos de los zapatos estaban pegados a manchas secas de petróleo crudo que puede ser encontrado en las playas cercanas a Roma. Un estudio de los tipos de rocas encontrados en la arena, reveló que provenían de afloramientos de rocas metamórficas a lo largo de la costa norte de Roma. También se encontraron calizas con fragmentos de microfósiles de un área al norte de Roma donde los ríos confluyen al mar. Aún más interesante, fueron los fragmentos de rocas volcánicas encontrados, donde algunos de ellos contenían vidrio inalterado, su fuente también sería al norte de Roma. El objetivo de los investigadores era poder encontrar el lugar en el que Aldo Moro había sido asesinado, con toda la información obtenida a partir del material geológico encontrado, se pudo reducir enormemente el rango de búsqueda de este lugar, sin embargo, esta no tuvo éxito ya que nunca se logró encontrar el sitio en el que ocurrió el asesinato (Murray, 2011).

Años después se capturó a un terrorista que formaba parte de las Brigadas Rojas quien confesó que Aldo Moro había sido asesinado en el garaje y luego transportado al lugar donde dejaron el cuerpo dentro del auto. Además, mencionó que, ellos habían recolectado todas las otras evidencias que fueron encontradas por los investigadores para confundirlos. Esto aún es puesto en duda y es muy probable que nunca se sepa la verdad completa, pero este caso es uno de los mejores ejemplos del uso de la Geología Forense en la búsqueda de la fuente de evidencia de suelo (Murray, 2011).

Otro ejemplo, muy similar al caso de estudio que se desarrollará en esta memoria, corresponde a un fraude de sustitución que fue investigado por el geólogo Skip Palenik. En este caso se perdió equipamiento de computación, el cual había sido enviado de Texas (Norteamérica) a Argentina (Sudamérica), haciendo escala en Miami (Norteamérica). Cuando el paquete fue abierto en Buenos Aires, este sólo contenía bloques de concreto. Usando un ácido suave Palenik logró remover arena del concreto. Esta era muy fina, con una distribución de tamaño de grano muy estrecha, lo que sugería arena de playa y la composición de minerales pesados (abundante zircón y minerales metamórficos como: silimanita, cianita y estaurolita) era característica de la costa sudeste de Estados Unidos, específicamente en Florida en las cercanías de Miami. Palenik comparó la muestra extraída del concreto con muestras de su colección de arenas de Florida. Ambas eran muy similares, por lo que les indicó a los investigadores, que las personas que sustituyeron los bloques de concreto, probablemente no los movieron muy lejos y que debían revisar en el aeropuerto de Miami. Finalmente se encontraron los mismos bloques de concreto en un sitio en construcción del Aeropuerto de Miami. Esto llevó a la identificación y condena de aquellos que habían realizado la sustitución (Murray, 2011).

En Sud América, Argentina y Colombia han sido pioneros en el desarrollo de la Geología Forense. Ambos países ya han participado en varias investigaciones criminales, trabajando de forma multidisciplinaria para aportar con evidencias a sus respectivos departamentos de justicia. En el caso de Colombia, el año 2009 se llevó a cabo el primer curso Latinoamericano en Geología Forense, en la ciudad de Bogotá. Luego en el año 2013 se llevó a cabo en la Policía Federal de Brasil el “II Seminario Iberoamericano de Geología Forense”.

Mediante la exposición de estos casos se busca poder dar a entender la gran importancia y utilidad que tendría el desarrollo de la Geología Forense en Chile.

1.4 Enfoques y procedimientos actualmente en uso

A continuación, se mencionan dos aspectos principales asociados a la recolección y análisis de las muestras en Geología Forense.

Respecto a los métodos de muestreo, todas las muestras deben ser tomadas por el investigador a cargo o por algún individuo asignado y entrenado para la recolección de este tipo de muestras (Murray, 2011).

Se consideran dos tipos básicos de muestras:

1. Muestras directamente asociadas con el crimen o incidente, llamadas muestras dubitadas (suelo en zapatos o ropa, polvo en pelo, rocas o vidrio usados como armas etc.) (Murray, 2011).
2. Aquellas que el investigador o Geólogo Forense puede seleccionar y corresponden al material de control conocido (muestras comparativas). Los examinadores comparan estas muestras con las antes mencionadas. Pueden corresponder a suelo removido de los marcos del vehículo del sospechoso, suelo de una escena de crimen, rocas o vidrio de los lugares de los cuales pudo provenir un arma, fuentes de abrasivos etc. También pueden consistir en material de museos y otras colecciones mantenidas con el propósito de ser comparadas (Murray, 2011).

En cuanto al método de examinación que se utilizará, esto va a depender del tipo de muestra y del criterio del geólogo a cargo. A continuación, se listan los métodos más comunes (Murray, 2011):

1. Color
2. Distribución de tamaño de partículas
3. Microscopio binocular estéreo
4. Microscopio petrográfico
5. Identificación de rocas en cortes delgados
6. Minerales pesados
7. Índice de refracción
8. Cátodoluminiscencia
9. Microscopio electrónico de barrido (SEM)
10. Difracción de rayos X
11. QEMSCAN
12. Métodos químicos
13. Espectroscopia de infrarojo con transformada de Fourier (FTIR) y RAMAN
14. Columna de gradiente de densidad

Tanto el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, como la sección de microanálisis del Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones, cuentan casi con la totalidad de esta instrumentación, por lo que existe la posibilidad de poder realizar todos los tipos de análisis que se hacen alrededor del mundo para casos de Geología Forense, sólo se tendría que analizar los costos asociados.

A lo largo de esta memoria se irá definiendo cuál método o análisis, es el más recomendado para realizar en las muestras, es decir, cuál puede ser un mayor aporte de acuerdo al caso estudiado.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Poder determinar el tipo de arena que fue colocada como reemplazo de la mercancía original (estafa) y de esta forma poder indicar la ubicación más probable en la que se llevó a cabo el intercambio de especies. Además, se busca poder generar un vínculo con la Policía de Investigaciones para poder trabajar en conjunto cuando algún caso lo amerite.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Establecer los análisis que se realizarán al material del caso principal de esta memoria, para poder llegar a una conclusión más certera (análisis granulométrico, mineralógico, geoquímico, estudio de microtexturas en granos de cuarzo, análisis de minerales pesados, catodoluminiscencia, etc).
2. Hacer un estudio del tipo de abrasivos utilizados comúnmente en los aeropuertos y de otras sustancias que podrían corresponder o relacionarse con la arena reemplazante.
3. Comparar con distintos métodos las muestras de los sacos de arena, con la muestra de arena proveniente de Norte América.
4. Dar a conocer las metodologías que se utilizan actualmente en análisis forenses de material geológico y exponer casos en los que este campo ha tenido éxito.
5. Presentar casos en Chile en que la Geología Forense habría sido de ayuda.

6. Concretar una visita al Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones (LACRIM), comprendiendo sus metodologías de muestreo y los análisis que se realizan actualmente en sus laboratorios al material geológico, y lograr acceso a algún caso en Chile en que la Geología Forense pudiese haber sido de ayuda.

1.6 Hipótesis de trabajo

En esta memoria se espera poder definir en qué lugar se llevó a cabo el reemplazo de la mercancía por sacos de arena, a través de una caracterización de esta.

Poder realizar un vínculo con la PDI para poder trabajar a futuro con geólogos en aquellos casos en los que estos puedan aportar evidencia a los investigadores.

Finalmente, al ser la Geología Forense un campo inexistente en Chile, se busca evaluar cuáles son las reales posibilidades de que este se pueda desarrollar en el país.

1.7 Metodología

El trabajo será dividido en dos partes generales, cada una con subdivisiones de lo que se hará a lo largo de la memoria.

1.7.1 Fraude asociado al intercambio de mercancía por sacos de arena

1. **Bibliografía:** Recopilación de material bibliográfico asociado a casos de Geología Forense, el estudio de microtexturas en granos de cuarzo en arena y su uso para identificar la proveniencia de esos granos. Además de un estudio de las técnicas utilizadas actualmente para este tipo de material.

2. **Muestreo y cadena de custodia:** recolección de muestras de arena de dos playas de las costas de Chile y de un par de playas de Florida, para poder hacer una comparación con la muestra dubitada.
 - a. Muestra dubitada: esta muestra fue entregada hace más de cuatro años por la empresa que encargó la mercancía en cuestión y que recibió a cambio estos sacos de arena. Luego de ser entregadas, las muestras permanecieron en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.
 - b. Muestras playas de Florida (Norteamérica): la muestra correspondiente a la playa de Miami fue recolectada hace más de cuatro años y fue guardada durante este tiempo en la oficina de la Profesora Katja Deckart. En el caso de la muestra de la playa de Daytona, esta fue recolectada a mediados del año 2016 por el Profesor Brian Townly, perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de Chile, y fue posteriormente entregada a quien escribe esta memoria.
 - c. Muestras playas de la Región de Valparaíso (Sudamérica): ambas muestras fueron recolectadas por quien escribe esta memoria a mediados del año 2016. Estas muestras se obtuvieron de las playas de El Tabo y de Caleta Portales.

3. Contactarse con docentes y otros profesionales para analizar la posibilidad y utilidad de realizar ciertos análisis.

4. Selección de los análisis a realizar que pueden ser un aporte de evidencia al caso de estudio y que por lo tanto serán necesarios realizar.

5. Realización de análisis seleccionados.

- a. Análisis mineralógicos: a través de la observación de las muestras en un microscopio estéreo.
 - b. Análisis geoquímico: se realizó este análisis en la muestra dubitada (muestra A, origen desconocido) y en la muestra proveniente de la playa de Miami (muestra B). Este análisis se llevó a cabo en un estudio previo al desarrollo de esta memoria, mediante Fluorescencia de Rayos X en los laboratorios del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.
 - c. Análisis granulométricos: realizados en la Universidad de Chile. Se realizará un tamizaje manual en la muestra C, D, E y se utilizarán tamizajes previos realizados a las muestras A y B.
 - d. Análisis de microtexturas en granos de cuarzo: selección de tamaño de grano a utilizar para el análisis y selección del procedimiento adecuado para la preparación de las muestras.
 - e. Selección de 50 granos de cuarzo por muestra para ser estudiados en el SEM. Esta selección se hace manualmente al mirar la muestra bajo un microscopio binocular.
 - f. Análisis de microtexturas en granos de cuarzo, utilizando el microscopio electrónico de barrido disponible en la Sección de Microanálisis del Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones de Chile. A través de este instrumento se generarán las imágenes necesarias para su posterior análisis.
 - g. Análisis RAMAN de una cantidad representativa de granos, pertenecientes a las muestras A y B.
6. Comparación de las muestras a través de los resultados obtenidos a partir de los distintos análisis.

7. Conclusión del caso.

1.7.2 Creación de vínculo o protocolo para la PDI

1. Elaboración de solicitud para acceder a una reunión con algún miembro del Laboratorio de Criminalística de la PDI.
2. Concretar una reunión con algún miembro del Laboratorio de Criminalística de la PDI para poder realizar un estudio de las metodologías que utilizan.
3. Solicitar a la PDI casos reales en Chile de crímenes en los que la Geología podría haber sido de utilidad.
4. Elaborar en conjunto con la PDI un protocolo para aquellos casos en que sería de gran utilidad que ambas disciplinas trabajarán juntas.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Geología Forense: su potencial y complicaciones

Como se mencionó previamente, la Geología Forense analiza los materiales provenientes de la tierra y los utiliza para aportar evidencia a diversos delitos. Una de las tareas más complejas con las que se puede encontrar un geólogo trabajando en el área forense es identificar la proveniencia de una muestra.

Las principales complicaciones que se pueden encontrar en la Geología Forense son el uso de técnicas analíticas dependientes entre ellas, la dependencia de la presencia de algún elemento exótico en la muestra, la representatividad de las muestras y la confusión que se genera entre técnicas descriptivas, exclusivas y diagnósticas. Además, es importante mencionar un fallo muy común, el cual corresponde a que en la mayoría de los casos los profesionales buscan una coincidencia prácticamente perfecta entre dos

muestras, en vez de excluir aquellas que no guardan ninguna relación con la muestra a analizar. En la Figura 2.1, se muestra una tabla proveniente de un trabajo de Morgan y Bull (2007) en la que resumen las principales aplicaciones de la Geociencia Forense e incluyen la técnica utilizada dependiendo del caso. En la Figura 2.1, se logra también observar la importancia de trabajar de forma multidisciplinaria, ya que, en análisis de suelos, por ejemplo, es fundamental el estudio de la materia orgánica presente en este.

En el último tiempo se ha trabajado bastante estudiando muestras de suelos encontradas en los sitios de suceso, principalmente porque este presenta una cantidad prácticamente infinita de características las cuales van ligadas no solo a la Geología, sino que también al tipo de uso que se le da al suelo y al clima al cual está asociado, esto se traduce en que se puede obtener una amplia variedad de suelos, los cuales cambian bastante en cortas distancias, lo que permite hacer comparaciones entre distintas muestras y en algunos casos, incluso establecer su proveniencia. Respecto a la comparación de muestras, esto es factible debido a que, aunque dos ambientes pueden ser muy similares estos nunca serán exactamente iguales y por lo tanto siempre se podrán encontrar ciertas variaciones en las muestras. Es por ello que la interpretación que haga el profesional a cargo de los análisis y la presentación de estos resultados en un juicio, debe ser precisa y significativa.

Figura 2.1: Tabla en la que se resumen las distintas técnicas utilizadas hoy en día en el análisis de suelos. Tabla tomada de Morgan y Bull, 2007.

Scale	Technique	Purpose	Reference	
Macro	Resistivity and electrical tomography	Detecting burial sites	France <i>et al.</i> 1992, ² Buck 2003, ³ Scott and Hunter 2004 ⁴	
	Electromagnetic surveying (EM) and Ground-Penetrating Radar (GPR)	Detecting burial sites	Nobes 1999, 2000 ^{5,6}	
	GPR	Detecting historic mass burial sites Plastic landmine detection	Davis <i>et al.</i> 2000, ⁷ Chen <i>et al.</i> 2001 ⁸	
	Forensic geomorphology (landscape interpretation)	Detecting burial sites	Owsley 1995 ⁹	
	Physical probe	Detecting buried objects	Owsley 1995 ⁹	
	Forensic remote sensing (aerial photography, satellite imagery and global positioning systems)	Environmental forensic applications	Brilis <i>et al.</i> 2000, 2001, ^{10,11} Grip <i>et al.</i> 2000 ¹²	
	Geographic Information System (GIS)	Spatial analysis of criminal behaviour and criminal ancestry	Canter 2003, ¹³ Zhivotovsky <i>et al.</i> 2001 ¹⁴	
Micro	Physical characteristics of a soil/sediment sample	Binocular microscopy (mineralogy)	Comparison of samples and/or assessment of the provenance of samples.	Murray 2004, ¹⁵ Morgan <i>et al.</i> 2006 ¹⁶
		X-Ray Diffraction (XRD) (mineralogy)		Brown 2006, ¹⁷ Ruffell and Wiltshire 2004 ¹⁸
		QemSCAN		Pirie <i>et al.</i> 2004 ¹⁹
		Quartz grain surface texture analysis		Bull and Morgan 2006 ²⁰
		Particle size analysis		Morgan and Bull in press. ²¹
	Chemical characteristics of a soil/sediment sample	Colour		Janssen <i>et al.</i> 1983, ²² Sugita and Marumo 1996, ²³ Junger 1996. ²⁴
		ICP-MS ^a and ICP-AES ^b (elemental chemistry)	Comparison of samples and/or assessment of the provenance of samples.	Rawlins and Cave 2004, ²⁵ Jarvis <i>et al.</i> 2004 ²⁶
		AAS/Dionex ^c (elemental chemistry)		Morgan <i>et al.</i> 2006, ¹⁶ Bull <i>et al.</i> 2006 ²⁷
	Biological characteristics of a soil/sediment sample	FTIR ^d (organic content)		Cox <i>et al.</i> 2000 ²⁸
		Pollen	Comparison of samples and/or assessment of the provenance of samples.	Bruce and Dettmann 1996, ²⁹ Bryant <i>et al.</i> 1996, ³⁰ Szibor <i>et al.</i> 1998, ³¹ Eyring 1996, ³² Horrocks <i>et al.</i> 1998, ³³ Horrocks and Walsh 1998, 1999, ^{34, 35} Horrocks 2004, ³⁶ Miller Coyle 2005, ³⁷ Mildenhall <i>et al.</i> 2006, ³⁸ Montali <i>et al.</i> 2006, ³⁹ Wiltshire 2006. ⁴⁰
		Bacterial DNA		Horswell <i>et al.</i> 2002 ⁴¹
		Plant wax signatures		Dawson <i>et al.</i> 2003 ⁴²

^a ICP-MS: Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry; ^b ICP-AES: Inductively Coupled Atomic Emission Spectroscopy; ^c AAS: Atomic absorption Spectrometry; ^d FTIR: Fourier Transform Infra Red spectroscopy.

Respecto a los análisis a realizar, es de suma importancia que estos no sean todos dependientes entre sí, ya que de ser así solamente servirían para corroborar los resultados, sin aportar nueva evidencia.

Otro problema, es que al ser este un nuevo campo, al menos en Chile, es de suma importancia la difusión de esta área, sobre todo a los funcionarios del sistema judicial, para ir interiorizando y dando a conocer el uso de la geología en el área forense.

Finalmente, la Geología Forense tiene un gran potencial de desarrollo y efectivamente genera un aporte a la justicia, ya que añade más evidencia a los casos, siempre y cuando, esta sea analizada por un profesional con experiencia. La importancia de este campo, queda evidenciado en países como Estados Unidos, España o Gran Bretaña donde hay un extenso número de casos en los que la Geología Forense ha aportado con evidencia fundamental.

2.1.1 Uso de material terrestre como evidencia

Primero es importante entender qué tipo de información puede entregar la evidencia geológica y en qué casos suele ser un aporte. Los casos en los que esta ha sido utilizada se enumeran brevemente a continuación (Pye, 2005):

1. Fraude (reemplazo de mercancía por material sedimentario).
2. Determinar la presencia en alguna ubicación particular de un individuo, el motor de un vehículo o cualquier otro elemento especificado.

3. La secuencia y posible sincronización de una visita a una ubicación, y posiblemente a otras.

4. Ubicación de objetos enterrados.

5. Fuente de elementos importados o de contrabando.

6. Causa de muerte (especialmente en casos de posible ahogamiento o sofocación).

7. Origen geográfico de restos humanos sin identificar.

8. El lapso de tiempo que un objeto ha estado presente en una ubicación y el largo de intervalo post mortem.

Luego, para que una evidencia geológica pueda ser presentada ante la ley es importante que sea recolectada de acuerdo a cómo lo estipula esta misma. Debe estar documentado quien recolectó la muestra y quién fue responsable de esta en cada uno de los procedimientos, esto quiere decir que la cadena de custodia debe ser clara.

Las evidencias físicas que le conciernen a la Geología Forense son suelo, minerales, vidrio, junto con cualquier otro objeto, sustancia natural o hecha por el hombre, incorporada en el suelo u otro material terrestre.

En el análisis de evidencia traza el uso de técnicas instrumentales no destructivas, o mínimamente destructivas, es de gran importancia, debido a que en la mayoría de ellas sólo se necesita una pequeña cantidad de muestra y además se puede conservar la evidencia para futuras examinaciones, por ejemplo, en caso de que alguna de las partes quiera repetir alguno de los análisis, es decir, garantiza el contra peritaje.

En el caso del análisis de material terrestre se entiende que siempre existe la posibilidad de que en algún otro lugar del mundo exista un material con similares características. Es por ello que, al momento de comparar una muestra con otra, la mayor parte del tiempo se habla de probabilidades y no de certezas, es decir se puede demostrar que hay una probabilidad de que las muestras provengan de la misma fuente, incluso si no se puede siempre demostrar esto con total certeza. La certeza o probabilidad va a depender en gran medida de la competencia del científico y de la disponibilidad de datos (Murray, 2011).

La utilidad de la mayoría de los tipos de evidencia física va a depender del número de variaciones significativas que puedan ser fácilmente observadas o medidas en el material. Dado que el material terrestre varía ampliamente, su potencial como evidencia física es excelente (Murray, 2011).

En base al entrenamiento, experiencia, juicio personal y competencia del científico, este seleccionará las observaciones y tipo de mediciones que le permitirán realizar un juicio acerca de la evidencia física. Estas observaciones y mediciones deben ser reproducibles por cualquier otro profesional. El problema para la Geología Forense es poder aplicar métodos a muestras de suelo (y otras que estén relacionadas) que permitan al científico hacer un juicio profesional con el mayor grado de confianza. Estos métodos no pueden ser excesivamente detallados, o bien que se vuelvan muy difíciles de realizar y que terminan no usándose o son tan teóricos que se vuelven imposibles para poder realizar una comparación de muestras. El fracaso en la comparación de muestras, es decir, el no poder encontrar suficiente evidencia para probar alguna similitud o diferencia entre las muestras, se debe por lo general a tener muestras insuficientes para los análisis necesarios o a un error en la observación o medición de las propiedades que tienen valor como evidencia. Cuando se determina que las muestras no son comparables, de acuerdo a Murray (2011) esto se puede deber a:

1. No hubo transferencia, es decir, no hay relación entre las muestras comparadas.
2. El suelo fue transferido, pero luego fue removido por fricción o lavado.
3. Dos o más suelos fueron transferidos, resultando una muestra compuesta.
4. El área en la que se tomó la muestra de suelo cambia rápidamente y la muestra que se tomó es inadecuada (error de muestreo).
5. El sospechoso no estuvo en la escena del crimen.

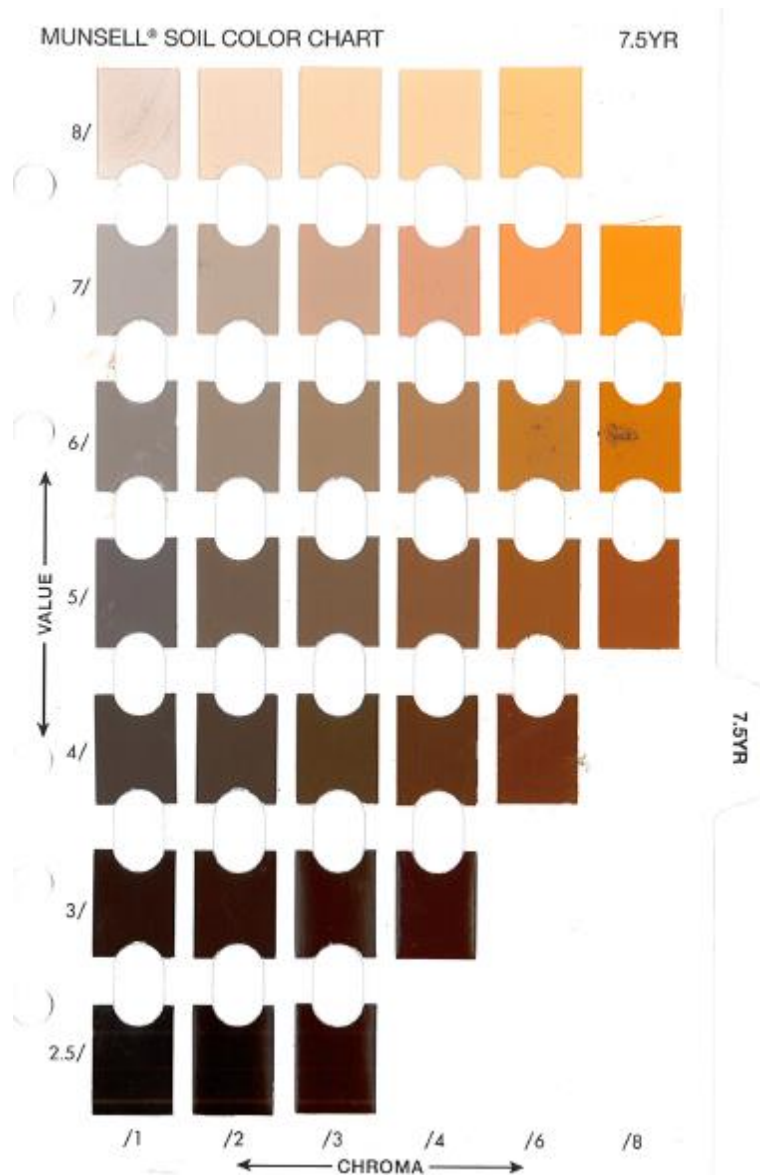
2.1.2 Métodos de examinación

En esta sección se describirán en mayor cabalidad cuáles son los instrumentos y métodos más utilizados para analizar material geológico con fines forenses. Las próximas descripciones son tomadas principalmente del libro de Murray (2011).

1. **Color:** es una de las características más importantes para identificar suelos y minerales. La descripción estandarizada del color se hace en base a el color espectral dominante (color o matiz), la luminosidad del color (valor) y la pureza relativa del color espectral (croma). El color espectral se refiere a ese color específico que se asocia a una sola longitud de onda de la luz en el espectro visible, para describir el color del suelo se utiliza una tabla estándar que corresponde a la desarrollada por Munsell (1973). Entonces, el color café, por ejemplo, es registrado como 7.5YR5/2, donde 7.5YR se refiere al matiz, el 5 al valor y el 2 a la croma (ver Figura 2.2). Tanto en suelos como en minerales, sus colores pueden variar dependiendo de su composición o los procesos por los que han pasado. Es por ello

que en esos casos se recomienda analizar el suelo sin tratar y luego estudiarlo habiendo removido el material orgánico. De la misma forma la humedad también puede afectar el color por lo que muchas veces se secan las muestras a 100 grados Celsius y se revisan posteriormente bajo luz natural. Hoy en día se puede determinar el color utilizando un espectrofotómetro, esto provee mayor información cuantitativa y precisión.

Figura 2.2: Tabla estándar de color de suelo desarrollada por Munsell (1973). En este caso se muestra solo la tabla asociada al color café mencionado como ejemplo previamente.



2. Distribución de tamaño de partículas: tal como dice su nombre, corresponde a determinar cómo se distribuyen los tamaños de partículas en una muestra. Estos estudios son importantes ya que se pueden hacer comparaciones entre distintas muestras para determinar qué tan similares o distintas son. Los métodos más comunes para realizar estos análisis son a través de un tamizaje, determinando el tiempo de asentamiento de los granos en un fluido o utilizando algún instrumento que mida el tamaño de las partículas y registre el número de partículas de igual tamaño.

3. Microscopio estéreo binocular: se pueden encontrar dos microscopios de luz, aquellos de luz transmitida y los de luz reflejada. En este instrumento es posible observar los tipos de granos y partículas observadas, pudiendo registrar una primera impresión de la muestra. Los materiales que no son de origen mineral, como metales, pelo, fibras, pintura y plástico, son removidos y guardados, ya que pueden ser evidencia importante y servir a otros especialistas para futuros análisis. En este microscopio un profesional experimentado puede ser capaz de identificar rocas y minerales. De todas formas, por lo general siempre es necesario un estudio posterior de la muestra en lámina delgada a través de un microscopio petrográfico.

4. Microscopio petrográfico: este microscopio difiere en ciertos componentes con el descrito previamente, pero su función u objetivo es el mismo. La principal diferencia es que en este tipo de microscopio es posible caracterizar los minerales a través de sus propiedades ópticas. Además, este microscopio sirve también para analizar otros materiales como granos de almidón, cristales sintéticos, así como también, abrasivos, cementos y materiales cerámicos.

5. Minerales Pesados: son aquellos minerales con una gravedad específica mayor a 2.89. A pesar de que representan una pequeña fracción en los suelos estos pueden ser muy útiles para caracterizar los materiales. En geología se han utilizado para reconocer rocas similares y para determinar los tipos de rocas que tuvieron que haber sido meteorizadas para generar las partículas que conforman luego una roca sedimentaria. Si el propósito de la examinación es determinar el origen geográfico de la muestra, la mayor parte del tiempo es necesario identificar absolutamente todos los minerales. Es también importante mencionar que la mayoría de las veces no se tendrá suficientes granos dentro de una evidencia, que permitan hacer un estudio estadístico significativo.

6. Índice de refracción: es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material siendo analizado. La medición de este valor es uno de los métodos más importantes para la comparación de vidrios. Por lo general se utiliza este índice en conjunto con medidas de densidad, color y espesor.

7. Catodoluminiscencia: se puede medir a través de un luminoscopio puesto como porta objeto en un microscopio o a través de un microscopio electrónico de barrido. El espécimen es bombardeado con un rayo de electrones, los cuales al golpear la superficie de la muestra producen una luminiscencia óptica vista como un despliegue de colores. Estos colores y su intensidad dependen principalmente de pequeños cambios en la concentración de impurezas, los minerales presentes y la ubicación de las impurezas en la estructura del mineral. Es una técnica muy utilizada para determinar y observar las diferencias que se pueden encontrar en granos minerales que a simple vista parecen muy similares.

8. Microscopio electrónico de barrido: no se ahondará mucho en esta técnica ya que se explica a cabalidad en un capítulo más adelante. Es utilizado principalmente para visualizar morfologías y variaciones composicionales.

9. Difracción de rayos-X: es una de las técnicas más importantes y confiables en la identificación de sustancias cristalinas. Los rayos-X pasan a través de los cristales y el ángulo del rayo difractado es medido. Cada material cristalino tiene su propio ángulo distintivo. El patrón de difracción de rayos-X de una muestra está controlado por la estructura interna del material. Esta técnica es la más usada hoy en día en la identificación de arcillas. Se usa también en análisis de suelos, aunque en este caso cuando la mezcla de minerales presentes en la muestra es muy grande, la interpretación de los resultados puede ser compleja. Otro de sus usos es en la identificación de material inorgánico cristalino presente en explosivos como, por ejemplo, el nitrato de potasio y el clorato de potasio.

10. QEMSCAN: analiza la mineralogía de depósitos inorgánicos. Su abreviación deriva del inglés "Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy". Un rayo de electrones se mueve a lo largo de la partícula, la cual fue previamente añadida en una resina. La energía del espectro de rayos-X es medida en un

operador definido por espaciamiento en píxeles. El espectro de cada píxel se compara con una base de datos de espectros conocidos (desarrollada por CSIRO Minerals en Australia) y se le asigna el nombre del mineral o fase.

11. Métodos químicos: se refiere a todo instrumento capaz de medir la composición química de materiales orgánicos e inorgánicos. Los instrumentos más utilizados suelen ser el cromatógrafo y en menor medida con el uso de espectrofotómetros.

12. Espectroscopía (FTIR y RAMAN): son instrumentos analíticos no destructivos utilizados comúnmente en la identificación de material orgánico y minerales. Más adelante se ahonda más en esta técnica.

13. Columna de gradiente de densidad: se basa en el hecho de que la densidad de las partículas cambia dependiendo de los minerales presentes y la composición química de la partícula. También va a depender del espacio asociado de los poros entre granos de minerales y si existen burbujas (inclusiones fluidas) dentro del mineral. La distribución de densidades de varias partículas en una muestra de suelo puede ser usada para determinar si una muestra de suelo es similar a otra. El método consta en la preparación de dos tubos los cuales son rellenados de igual manera con líquidos de distinta densidad. Una vez que los líquidos se han equilibrado se agregan las muestras respectivas y se espera entre 24 a 48 horas a que las distintas partículas se asienten. Es importante notar que antes de poner las muestras estas deben tamizarse pasar por un proceso de selección y pesaje para que el estudio sea hecho exactamente bajo las mismas condiciones en ambos tubos. El problema con este método es que al no identificar los minerales se pueden generar ciertos problemas, como por ejemplo que en muchos casos el cuarzo y feldespato quedan en el mismo sector de la columna o que los minerales pesados se comienzan a acumular siempre en el fondo. Es por ello que hoy en día se considera que presenta muchas limitaciones y que no debiese usarse por sí solo para comparar muestras.

2.1.3 Instrumentos geofísicos y la búsqueda de cuerpos

Muchos instrumentos geofísicos sirven para medir distintas propiedades del suelo y lo que está bajo este, estos son muy útiles para casos forenses especiales, como es la búsqueda de cuerpos enterrados. Es importante recalcar que en estos casos tan específicos puede que el método utilizado no sirva de la misma forma en otros casos similares. A continuación, se enumeran los instrumentos más utilizados y sus aplicaciones (Murray, 2011):

1. **Magnetómetro:** mide variaciones en la intensidad del campo magnético de la tierra. Grandes masas de hierro bajo la superficie terrestre generan una intensificación del campo magnético, es por ello que se ha utilizado en la exploración de minas de hierro y en la búsqueda de estructuras rocosas que puedan contener petróleo.
2. **Detector de metales:** se utilizan para localizar pequeños objetos metálicos que han sido enterrados a pocos centímetros bajo la superficie, como por ejemplo armas de fuego.
3. **Sismógrafo:** registra las vibraciones que viajan como ondas a través de las rocas de la tierra. Se usa para determinar la distribución y el tipo de roca que se puede encontrar bajo la superficie. Esta información puede ser útil para caracterizar bombas, como lo fue en el atentado terrorista del 7 de agosto de 1998, en el que las embajadas americanas en Kenya y Tanzania fueron atacadas casi simultáneamente. Los sismógrafos de la Universidad de Nairobi (Kenya) lograron registrar el ataque. Con esta información pudieron identificar el momento exacto en que se originó la explosión y la cantidad de energía de la explosión dividida en señal sísmica. Además, se logró limitar el rendimiento total de la explosión, toda esta información ayudó en la caracterización de la bomba.
4. **Georadar:** es uno de los instrumentos geofísicos más utilizados y con más éxito en la búsqueda de cuerpos enterrados. Se compone de un radio transmisor y un receptor que están conectados a un par de antenas unidas al suelo. Si hay un objeto con propiedades eléctricas distintas a las del suelo que lo hospeda, esto se refleja en una señal que llega tardía respecto a las otras.

5. GPS: es un sistema global de navegación compuesto de una red de satélites que permite obtener ubicación y ruta seguida por una persona.

6. Contador Geiger: miden directamente la radioactividad. En el área forense se puede utilizar en diversos casos, por ejemplo, en la búsqueda de minerales radioactivos o como a finales de 1930 cuando unas barras de plomo fueron robadas de un laboratorio y lograron ser recuperadas debido a que estas contenían cobalto radioactivo con lo que fue posible detectar donde estaban.

7. Datación C-14: se basa en la desintegración del carbono-14 contenido en los tejidos de una planta o en animales muertos. Puede datar material orgánico tan antiguo como 70.000 años. Usualmente es usado para establecer si los huesos encontrados son lo suficientemente jóvenes para pertenecer a víctimas de un crimen enjuiciable. También se ha datado ropa, muebles de madera y en cuadros (para casos de fraudes).

8. Fluorescencia: se utiliza para analizar aquellos minerales que al ser excitados con luz ultravioleta muestran un color distinto al observado en luz visible. En algunos casos estos colores pueden ser diagnósticos, ya que dependen del material.

9. Corrientes de agua: el conocimiento de la distribución y velocidad de las corrientes, así como también de la dirección y velocidad de los vientos, puede servir para identificar desde donde fue arrojado un cuerpo a un río, por ejemplo. Es similar a lo que se hace en geología para predecir el movimiento y dispersión de sedimentos, arena y lodo.

10. Fotografía aérea: hoy en día se utiliza para variados propósitos, en el caso forense se ha usado para encontrar sitios de enterramiento modernos u otros sitios perturbados. Al perturbar un suelo sus condiciones son alteradas, propiedades como la humedad, distribución de materia orgánica, estructura del suelo etc. Es por ello que por ejemplo las plantas que crecen en suelos intervenidos suelen ser distintas a las que están en los alrededores. La comparación de imágenes de

distintas épocas puede servir también para compararlas y establecer un periodo en el que se generó un evento.

11. Teledetección: puede ser muy útil en la búsqueda de objetos ocultos, minería y perforaciones ilegales, cultivo de marihuana y otras actividades ocultas. En Estados Unidos los mapas topográficos proporcionados por USGS (U.S Geological Survey) se utilizan rutinariamente en búsquedas y misiones de rescate.

2.1.4 Fraude de arte, gemas, mineral y mina

En la minería el fraude típico es aquel en que se ofrece un cierto terreno o mina abandonada indicando que contiene una cantidad de mineral que la hace atractiva en términos económicos y luego resulta que no había nada o ni siquiera se alcanzan las cantidades mencionadas. Uno de los casos más famosos en este ámbito fue el ocurrido en Canadá en los 90s con la compañía Bre-X. Este caso se trató de una propiedad minera desvalorizada ubicada en Busang Creek en la isla de Borneo. Dos geólogos, con excelente reputación fueron a hacer estudios al lugar para ver si este podría ser vendido. Gracias al optimista reporte que estos dieron la propiedad ganó valor rápidamente ya que se afirmaba que sería uno de los yacimientos de oro más grandes encontrados. En un inicio los dos primeros pozos arrojaron bajas cantidades de oro, mientras que el tercero generó una cantidad significativa de oro. El problema, fue que años después, cuando la propiedad ya estaba dividida en varios dueños, una de estas compañías (Freeport MacMoRan) decidió ir a inspeccionar el lugar, al hacer los debidos estudios se descubrió que estos pozos habían sido intervenidos y que lo que realmente había ocurrido es que se les había añadido una aleación oro-cobre. Finalmente, el depósito que se suponía sería el mayor hallazgo de oro en la historia, terminó siendo un terreno sin valor alguno.

Otra área en que se han involucrados geólogos es en la detección de falsificación de gemas o cuando tratan de hacer pasar un mineral común por una gema (ej: granate por rubí). En este mercado se pueden encontrar gemas naturales, sintéticas y aquellas que son naturales, pero que contienen ciertas fracturas las cuales son rellenadas comúnmente con vidrio. También existen las imitaciones o piedras simuladas que son una copia muy barata, que en lo único que se parece a la gema original es en el color. Hay ciertas técnicas aceptadas en el mercado para por ejemplo cambiar el color de una gema, lo cual se suele hacer con un proceso de aumento de temperatura. Este

procedimiento es aceptado en ciertas gemas y con cambios a ciertos colores, todo esto está estipulado para así disminuir la posibilidad de algún fraude. Por ejemplo, el topacio puede ser calentado e irradiado solo para producir sombras azules o rosadas. Lo mismo se estipula para procedimientos que involucran radiación. En Brasil es bastante común que geólogos ayuden a realizar estudios sobre gemas que se cree son fraudes.

Finalmente, queda mencionar el fraude asociado al arte. En esta área la Geología Forense se dedica principalmente al reconocimiento de ciertos minerales en pigmentos o cerámicas muy a menudo con el microscopio polarizado. Un caso interesante que ilustra cómo puede un geólogo aportar en esta área es aquel relacionado a las obras del pintor moderno Mikhail Larionov. En 1985 fueron descubiertos 1500 trabajos supuestamente de este artista y hace unos años se puso en duda la autenticidad de estos. El profesional Walter C. McCrone trabajó revisando las pinturas en microscopio polarizado donde encontró titanio blanco, con el titanio en forma de rutilo. Esto fue confirmado con un difractor de rayos-X. Se tenía conocimiento que el artista solo comenzó a utilizar este material en los 40s. Además, la ausencia del sulfato de bario acotó la fecha a 1950. Con estos descubrimientos se llegó a la conclusión de que los cuadros eran falsos.

2.1.5 Análisis de suelos

El suelo se está utilizando cada vez más como evidencia, tanto para casos forenses criminales, como medioambientales. Su valor radica en el hecho de que el suelo es un material que está prácticamente en todas partes y puede ser transferido a objetos o personas, por lo tanto, puede ayudar a excluir o identificar el origen de una cierta muestra, aportando así con evidencia que puede conectar a alguna persona con algún lugar u objeto. La gran diversidad de los suelos y heterogeneidad de estos, hace posible la distinción entre ellos, pudiendo así, diferenciar incluso, aquellos que a simple vista parecen ser del mismo tipo. Uno de los principales inconvenientes para este tipo de estudios es que no ha sido posible desarrollar un método estandarizado, ya que los procedimientos que se realizan para un tipo de suelo, puede que no sirvan para otro. Por otra parte, para poder determinar la mineralogía del suelo se requiere de un profesional con amplia experiencia en esa área.

El suelo se puede entender como una mezcla compleja de material inorgánico, orgánico y una fase porosa de agua y aire. La variación composicional de los suelos es enorme y

va a depender de factores como, por ejemplo: roca madre o parental, clima, organismos y vegetación presentes. Además, es importante reconocer la existencia de dos tipos de suelos, aquellos formados de forma natural y aquellos hechos o intervenidos por el hombre, como son los suelos usados en agricultura o los parques y cementerios, los cuales han sufrido alteraciones debido a la intervención humana. El hecho de que estos últimos sean tan heterogéneos, diversos y complejos, permite a los investigadores poder definir diferencias entre aquellos suelos que parecen muy similares. Es importante tener siempre en cuenta que dos suelos nunca serán completamente similares, a pesar de haber sido obtenidos del mismo lugar, con este tipo de evidencia lo que se suele hacer es comparar las distintas muestras y excluir aquellas que no guardan relación con la evidencia que está siendo cuestionada.

La asociación típica de minerales de un suelo de origen natural suele estar restringida a zonas geográficas extensas, debido a que estos dependerán de la roca parental, así como del grado de meteorización. Un suelo típico contiene por lo general entre 6 a 10 minerales principales (cuarzo, feldespatos, carbonatos y arcillas, por ejemplo). Por otro lado, la materia orgánica se conforma de plantas, animales en descomposición, restos microbianos, biota viva y raíces de plantas, por lo tanto, la variedad de características asociadas a la materia orgánica va a depender principalmente de la distribución espacial de plantas y otros organismos.

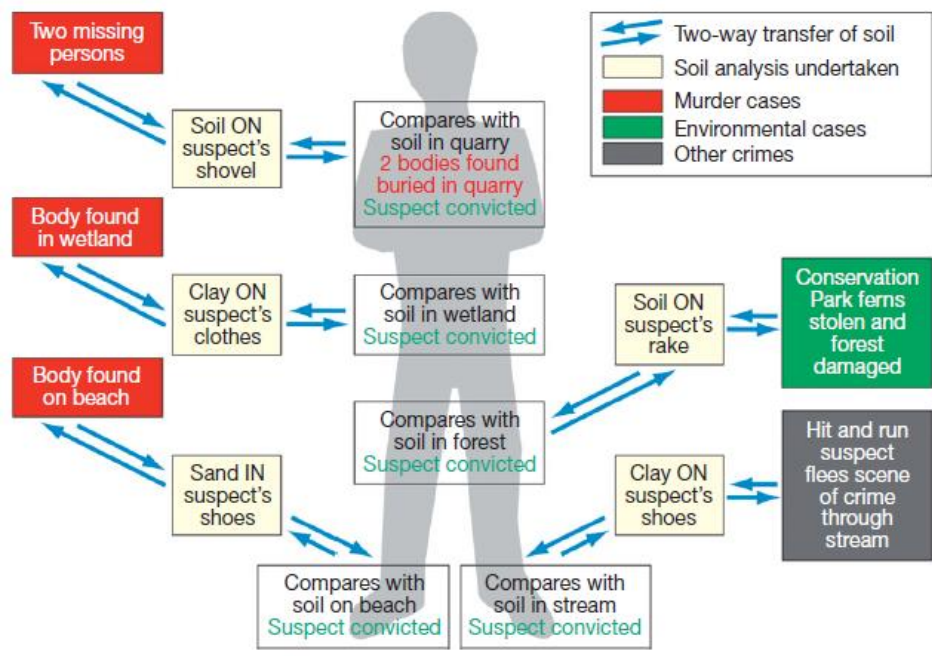
Para poder trabajar el suelo como evidencia es fundamental tener alguna base de datos con mapas de suelos, en los cuales se muestran las propiedades de estos y se pueden observar posibles patrones de suelos. Por lo general se realizan en escala 1:100000, o menor, para cuando se quiere representar zonas regionales y 1:10000, o mayor, si se requiere mayor detalle, como es el caso de granjas o suelos usados en agricultura. Existen dos clasificaciones de suelos usadas internacionalmente, una es la Base de Referencia Mundial (WRB) y la otra es la Taxonomía de suelos (Fitzpatrick, 2013). En Latinoamérica existe un Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, que se desarrolló en el marco del programa EUROCLIMA financiado por la Unión Europea, este fue publicado en el año 2014. En este atlas no solo se generan los mapas indicando las distintas propiedades del suelo, sino que además presenta un marco teórico en el que se explica qué son los suelos, cuál es su importancia, cómo se ve afectado por distintos procesos y cuál es la forma de clasificarlos, solo por nombrar algunos de los temas que ahí aparecen, por lo que es un documento muy completo para alguien que recién se está interiorizando con este tema.

En el trabajo de Fitzpatrick (2013) se indica que las muestras que se toman son categorizadas de la siguiente forma:

1. Muestra del suelo cuestionado, su origen es desconocido o dudoso, por lo general relacionado con el sospechoso o la víctima.
2. Muestras control, son de origen conocido y usualmente de lugares específicos directamente relacionados con la investigación, como por ejemplo la escena de crimen.
3. Muestra “coartada”, su origen es conocido y permite medir la unicidad de las dos muestras mencionadas previamente, provee una escena más general del sitio.

En la Figura 2.3, tomada del trabajo de Fitzpatrick (2013), se ilustran algunos ejemplos en los que se muestra como puede ser transferido el suelo en distintos casos y cómo estos son comparados para llegar a una conclusión.

Figura 2.3: Figura que ilustra cómo se puede transferir el suelo en distintos delitos y los análisis tomados en cada caso. Figura tomada de Fitzpatrick (2013).

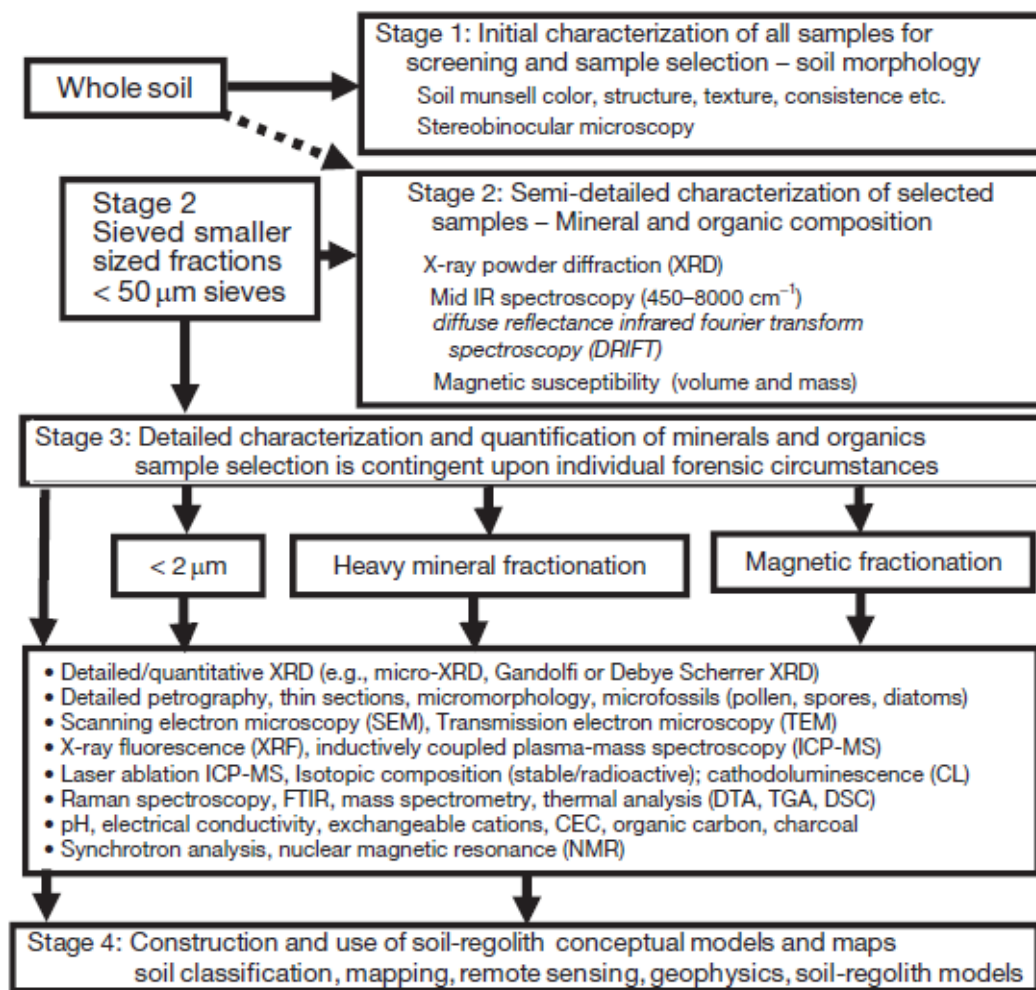


Respecto a la caracterización y evaluación de una muestra de suelo, esta se puede dividir en cuatro etapas. En la primera etapa se comparan visualmente todas las muestras, es decir, el suelo debe ser descrito y caracterizado utilizando los parámetros convencionales para esto, los cuales deben ser aquellos utilizados tanto en los sistemas estándar internacionales como lo nacionales. En esta etapa es cuando se describen los minerales observados en el microscopio. En la etapa siguiente se hace una caracterización semi-detallada y una semi cuantificación de aquellas partículas que fueron tamizadas (<50 μm), para ello se utilizan diversos métodos. La difracción de rayos-X se podría decir que es la mejor técnica para la caracterización (semi-cuantitativa o cuantitativa) de minerales en suelos de uso forense. La ventaja de esta técnica es que no es destructiva, la preparación de la muestra no es compleja y permite identificar todo material que tenga una estructura cristalina, como ocurre con los minerales. Una correcta identificación sumada a una buena interpretación de los minerales identificados, permite comparar distintas muestras y ver qué tanto difieren o se parecen entre ellas. Los patrones pueden ser determinados utilizando la base de datos del propio difractor u otra, como por ejemplo de alguna colección local de referencia (Fitzpatrick, 2013). Acá en Chile este año llegó un difractor de rayos X al Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones, por lo que sería muy interesante empezar a trabajar en suelos e ir interiorizándose en cómo utilizarlo de forma correcta para poder ser presentado como evidencia.

Luego en una tercera etapa se hace una identificación, caracterización y cuantificación de minerales y materia orgánica en muestras representativas y en partículas individuales de suelo. Todos los procedimientos adicionales que se pueden hacer en esta etapa se

pueden ver en la Figura 2.4. Finalmente se debe integrar y extrapolar la información para poder pasar de una escala microscópica a una mayor.

Figura 2.4: Esquema en el que se resumen las etapas de análisis de un suelo. La imagen es tomada de una publicación de Fitzpatrick (2013).



En resumen, el suelo es una excelente evidencia porque es altamente distinguible, tienen una alta probabilidad de ser transferidos y retenidos, es prácticamente invisible (sobre todo cuando se impregna en ropa), su muestreo, separación y concentración es rápido, su clasificación es bastante sencilla y por último existen bases de datos las cuales son muy útiles para poder determinar el origen de los suelos.

2.1.6 Casos documentados

A continuación, se expondrán algunos casos publicados, en los que la Geología Forense ha aportado con evidencia fundamental.

2.1.6.1 Cementerio clandestino, Argentina.

El primer caso a exponer corresponde a un estudio realizado en Argentina, asociado al descubrimiento de un cementerio clandestino. La República Argentina entre los años 1976 y 1983 estuvo bajo un gobierno de facto denominado “dictadura militar”, período en el cual miles de personas fueron arrestadas y desaparecieron. El Equipo Argentino de Antropología Forense (EAAF) realiza tareas en cinco áreas de investigación: investigación preliminar, búsqueda y recuperación de restos, laboratorio de análisis, genética y centro de documentación de archivos. Uno de los objetivos que persigue este equipo es la identificación de restos de desaparecidos durante la dictadura militar. Para llevar a cabo esta labor el equipo trabaja con los Centros Clandestinos de Detención (CCD) que operaron en cinco zonas geográficas en las que el gobierno de facto dividió el país (EAAF, 2009).

En este estudio el Equipo Argentino de Antropología Forense (EAAF) solicitó la participación de un grupo de Geólogos en la etapa de exploración del subsuelo para la ubicación de sitios potenciales de enterramientos clandestinos de personas. El equipo de Geólogos se conformó por docentes de las Universidades de Río Cuarto y San Luis (UNRC-UNSL) y comenzó a trabajar aplicando los conocimientos y técnicas de exploración habitualmente usadas en el campo de la geología, a este tipo específico de búsqueda. Su objetivo final era poder determinar potenciales zonas de enterramiento. Este equipo de geólogos participa en investigaciones principalmente asociadas a la prospección geofísica, estudios neotectónicos y paleosismológicos.

Para el estudio del subsuelo se utilizaron técnicas geológicas-geofísicas (ver Figura 2.5), las cuales tuvieron que ser adaptadas para una exploración muy somera, no más de 3 m. La ventaja de los métodos utilizados es que estos en su mayoría no alteran el subsuelo, por lo tanto, la evidencia puede ser conservada. La metodología que se utilizó en este caso fue dividida en cuatro etapas (ver Figura 2.5). La primera corresponde a la “Etapa de inventario e investigación preliminar”, en esta se recolectaron y analizaron diversos testimonios, escritos y orales, y evidencia fotográfica. En esta fase, es labor del geólogo realizar un inventario sobre el tipo y uso del suelo, mapas y fotografías aéreas a

distintas escalas, tanto actuales como de la época en que se cree fueron las excavaciones y previas a estas. Luego viene la “Etapa de exploración de subsuelo”, aquí en base a los datos obtenidos de la etapa previa se realiza un reconocimiento del terreno, se buscan evidencias superficiales y se explora el subsuelo con técnicas indirectas y directas. La tercera etapa corresponde a la “Etapa de exhumación”, en esta tuvieron participación principalmente arqueólogos y antropólogos forenses. Por último, está la “Etapa de identificación” la cual fue realizada en el Laboratorio de Investigación y Genética.

Los geólogos utilizaron métodos geológicos/geofísicos para realizar un análisis morfológico y de uso de suelo. Mientras que en la etapa de exploración del subsuelo se utilizaron métodos geofísicos y geomecánicos (eminentemente no invasivos), además de trincheras/calcatas. Un ejemplo, de lo antes descrito, es el estudio de resistividad del suelo, el cual se ilustra en la figura 5. En la exploración realizada en el cementerio de San Lorenzo, en la ciudad de Rosario (Santa Fe), el Equipo de Geología Forense (EGF) detectó la existencia de fosas clandestinas que estaban ubicadas debajo de una estructura edilicia ubicada dentro del predio. A través de la comparación de fotos aéreas de la época previa y posterior a las denuncias de enterramientos clandestinos y testimonios, el EGF analizó los cambios y distribución de las zonas ocupadas y de las que ya habían sido excavadas por orden judicial. Se delimitaron nuevos sectores para futuras excavaciones por medio de tomografías eléctricas y se hizo una inspección ocular del lugar. En su recorrido, detectaron la existencia de una obra en el fondo del cementerio que, según las autoridades, estaba destinada al funcionamiento de un futuro horno incinerador. Era una construcción de un piso, con dos habitaciones grandes y un vestuario. Al examinarla, los geólogos del EGF detectaron una serie de fallencias estructurales poco habituales para una construcción nueva. La obra presentaba evidencias claras de un asentamiento, los azulejos y cerámicos del piso estaban rotos, la vereda del costado tenía rajaduras. Si se funda sobre una superficie donde hay cuerpos enterrados, se considera que es una superficie floja porque cuando los cuerpos pierden volumen, la estructura se asienta. Sacaron uno de los cerámicos del piso y metieron el barreno manual (herramienta de exploración del subsuelo). Encontraron que los materiales del perfil del subsuelo estaban mezclados, situación diferente al perfil de suelo de referencia que habían desarrollado para la zona, entonces ahí se dieron cuenta que habían construido arriba de los cuerpos. Posteriormente, los restos fueron rescatados e identificados por los antropólogos y, una vez cumplidos los trámites judiciales, devueltos a sus familiares para su cristiana sepultura (Sagripanti, 2013).

Figura 2.5: Esquema en el que se resumen las etapas de trabajo para llegar a la ubicación de los cuerpos. Tomado de Sagripanti (2013).

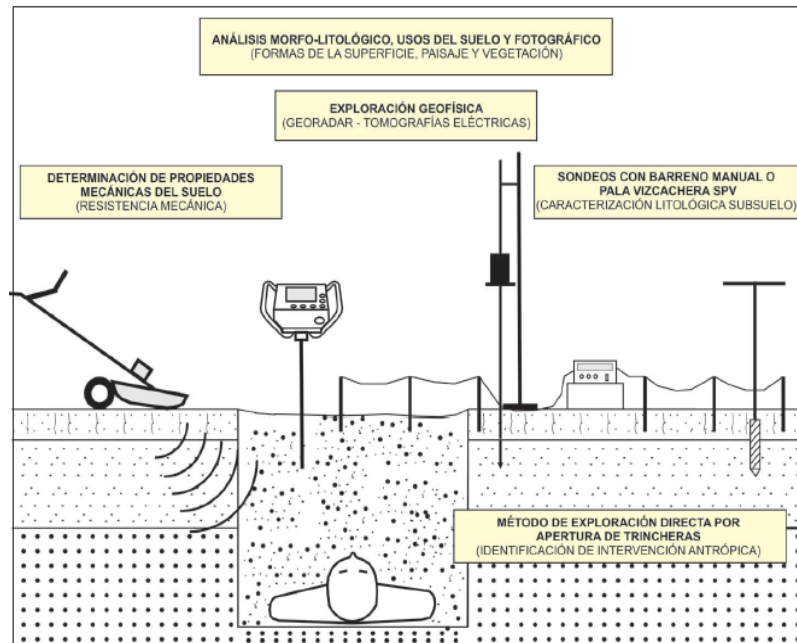
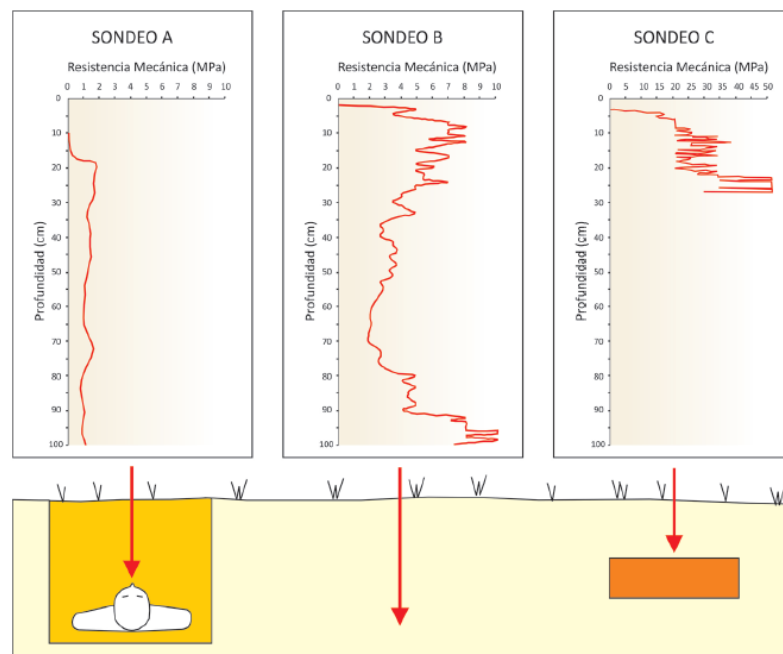


Figura 2.6: En este esquema se muestra como varía la resistencia del suelo dependiendo de su composición. Tomado de Sagripanti (2013).

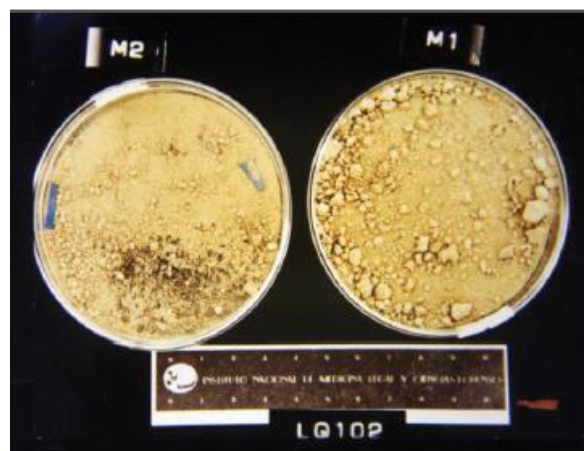


2.1.6.2 Casos en Colombia en los que se utilizó material geológico como evidencia

Los siguientes casos son expuestos de forma muy resumida en una publicación de Molina (2014) y buscan más que nada ilustrar en qué situaciones puede ser útil la evidencia geológica.

1. Caso 1: Dos asesinos mataron y abandonaron a sus compañeros en un potrero. Al huir del lugar, terminaron chocando a 15 km del sitio en el que ocurrió el asesinato, por lo que se vieron en la obligación de abandonar el auto. El Departamento de Risaralda en el año 1996 intentando aclarar cómo habían sucedido los hechos, solicitó un análisis del suelo encontrado en el tapete interno del vehículo y que este fuera comparado con el recolectado en el lugar de los hechos (Figura 2.7). Los suelos fueron analizados primero observándolos bajo un estereomicroscopio (para una descripción general), luego se hizo un análisis de color, identificación mineralógica en un microscopio de luz polarizada, análisis de pH y por último se analizó en un microscopio electrónico de barrido. Los resultados mostraron que ambas muestras tenían predominio de la fracción arena, sin carbonatos, mineral magnético limonita, presencia de cuarzo, plagioclasas, anfíbol, opacos óxidos y arcillas, en cuanto al pH en ambos casos era de 4,0-4,5. Por lo que se concluyó que los suelos eran similares. Estos resultados ayudaron a la fiscal para poder vincular a dos personas capturadas en el homicidio las cuales finalmente confesaron haber sido los victimarios.

Figura 2.7: Imagen en la que se muestran los dos suelos analizados. Tomada de Molina (2014).



2. Caso 2: En el año 2002, 12 diputados del Valle del Cauca, en la ciudad de Cali, fueron secuestrados. En el año 2007, 11 de ellos aparecieron muertos. Lo que se intentaba descubrir era si habían sido asesinados en el mismo lugar selvático en que se encontraron los cuerpos. Para eso, se compararon las adherencias de suelo encontradas en las bolsas donde fueron envueltos los cuerpos, con las muestras patrón de las fosas en las que estaban enterrados. En total se hicieron 30 cotejos entre 11 muestras (Figura 2.8) y se observó a grandes rasgos, que las provenientes de las fosas eran de aspecto arcilloso, mientras que las desprendidas de las bolsas eran pequeños fragmentos de roca, a excepción de un suelo que tenía predominio de partículas tamaño arena. En base a esto se concluyó que el lugar en el que fueron asesinados los diputados fue diferente al sitio en que los tenían en cautiverio.

Figura 2.8: Muestras para cotejo en el caso de secuestro y asesinato de 11 diputados. Tomado de Molina (2014).



2.2 Análisis granulométrico y de ambiente sedimentario

Conocer los distintos ambientes sedimentarios y sus características es fundamental para poder determinar la proveniencia de una muestra. Los depósitos asociados a cada ambiente tienen ciertas características granulométricas que los definen y distinguen entre ellos. Su composición, características texturales y estructuras sedimentarias proveen información acerca de cómo fueron depositados los sedimentos, permiten inferir, por

ejemplo, el medio de transporte, si estos sedimentos fueron trasladados por un tiempo prolongado o breve, incluso estudiando en detalle las facies sedimentarias se puede también identificar si hubo algún cambio en el medio (por ejemplo, pasar de un flujo laminar a uno turbulento).

De acuerdo a lo descrito por McLane (1995) los ambientes sedimentarios pueden ser clasificados en tres grandes grupos:

1. Terrestre o continental: depósitos que se encuentran sobre el nivel de mar.

2. Transicional: como lo dice su nombre, son aquellos depósitos que se encuentran en un ambiente entre el mar y el continente.

3. Marino: dependen de la profundidad del mar y qué tan cerca están de la costa.

En la tabla 2.1, se resumen los ambientes más importantes que se pueden encontrar en los tres grandes grupos previamente descritos.

Grupos	Ambiente
Terrestre o continental	Abanicos aluviales
	Ríos
	Lagos
	Glacial
	Dunas
	Volcánico
Transicional o de margen	Estuarios
	Deltas
	Complejos de islas de barrera
	Playas
Marino	Plataformas clásticas
	Plataformas carbonatadas
	Talud continental y altamar
	Volcánico

Tabla 2.1: Principales ambientes sedimentarios, McLane (1995) y Le Roux (2012).

2.2.1 Ambiente sedimentario: Playa

Dado que en la presente memoria todas las muestras, a excepción de la muestra dubitada de la cual se desconoce su origen, han sido recolectadas de playas en Norteamérica y Sudamérica, se desarrollará más en detalle las características y procesos asociados a este ambiente.

1. Fuente de sedimentos

Los sedimentos pueden provenir de lugares cercanos o haber viajado grandes distancias. En el caso de las playas los sedimentos pueden provenir de la erosión de material terrestre subaereo que puede ser transportado por ríos al mar, siempre y cuando este tenga el gradiente suficiente para transportar la arena, como es el caso de la costa pacífica oeste de Norteamérica y Sudamérica, donde es posible observar cómo los ríos son capaces de trasladar sedimentos erosionados hacia el mar. De todas formas, lo más común es que la fuente de sedimentos provenga de la erosión de la misma costa. Otro importante contribuyente son aquellos sedimentos que fueron afectados por la glaciación en el Pleistoceno, estos depósitos pueden haber sido una fuente principal o contribuir solo en parte a los depósitos de playa.

Otra fuente se puede asociar al resultado del re-trabajo y movimiento hacia la costa de sedimentos provenientes de plataformas. Esta fuente es relevante cuando se generan transgresiones o aumentos en el nivel del mar.

Los sedimentos transportados a lo largo de la costa en la zona intermareal y de oleaje, son quizás el mayor aporte volumétrico de material para la playa. El transporte litoral es por tanto el distribuidor final de material para la playa.

Por último, respecto a las posibles fuentes, se debe mencionar aquellas asociadas a material biogénico. En zonas tropicales, donde predominan los arrecifes, es posible

encontrar playas cuya composición es completamente de este tipo de material, como por ejemplo corales y algas, por nombrar algunas.

Es importante entender que un estudio acabado de la composición de los materiales de playa puede permitir establecer el origen o la fuente de estos. Un análisis recurrente es el que se hace identificando la asociación de minerales pesados presentes, dado que estas podrían ser características de la fuente. Es entonces importante conocer también la composición de las posibles fuentes para así poder comparar y determinar a cuál de ellas corresponde.

2. Composición de los sedimentos

Los minerales que se pueden encontrar son principalmente cuarzo y en segundo lugar feldespato, aunque se pueden presentar también otros minerales, esta es la asociación más común o predominante, principalmente debido a que, gracias a sus características químicas y físicas, estos tienden a ser muy resistentes. De todas formas, siempre van acompañados de algún otro mineral accesorio o pesado, aunque sea en un porcentaje mucho menor. También existen playas compuestas totalmente por material volcánico, como ocurre en Hawaii. En estos casos se podrá observar obsidiana, olivino, basaltos u otros fragmentos de rocas volcánicas. La composición tiende a ser similar entre playas cercanas.

3. Textura de los sedimentos

La textura va a reflejar tanto el tipo de material que compone a la playa, así como la intensidad de los procesos a los que fueron sometidos. La gran mayoría de las playas está compuesta por arena mientras que un porcentaje mucho menor se compone de grava o guijarro. A continuación, se describen ambas más en detalle.

- a) Playas compuestas por arena: la arena suele ser más fina y mejor seleccionada que aquella encontrada en lugares más hacia el mar o cercanos a la costa. A lo largo de la zona de playa el tamaño medio del grano aumenta de forma gradual en la medida que se acerca al mar, lo mismo ocurre con la selección, la cual va de bien seleccionada a muy bien seleccionada. Además, la asimetría tiende a ser negativa. Esto se asocia a la alta energía que caracteriza a este ambiente, lo cual provoca una remoción de las partículas más finas o la adición de partículas gruesas.
- b) Otras playas: en esta sección se encuentran las playas conformadas por lodos y aquellas compuestas por grava y guijarro que son por lejos mucho más numerosas que las primeras. Las playas lodosas ocurren en muy bajo porcentaje ya que la alta energía asociada a las playas tiende a dispersar los sedimentos finos hacia el mar, por lo que el lodo no suele encontrarse en la playa o zona de oleaje. Respecto a las playas de grava o de tamaños mayores, estas suelen tener buena selección, aunque la forma de los granos puede variar bastante dentro de un mismo lugar. La composición puede ser muy variada o no, esto va a depender de la fuente.

4. Procesos

Para entender la forma en que las partículas o materiales que conforman las playas son distribuidos, modificados y transportados, es necesario comprender los procesos que los afectan. La topografía de la playa y de la línea de costa puede ser modificada como respuesta a estos procesos, de igual manera la interacción entre los procesos que serán descritos brevemente a continuación, generará numerosos cambios que hacen que este ambiente sea tan dinámico. Los principales procesos son los siguientes:

1. Mareas
2. Viento
3. Tormentas
4. Olas

- a) “Swash”
- b) “Backwash”

5. Corrientes

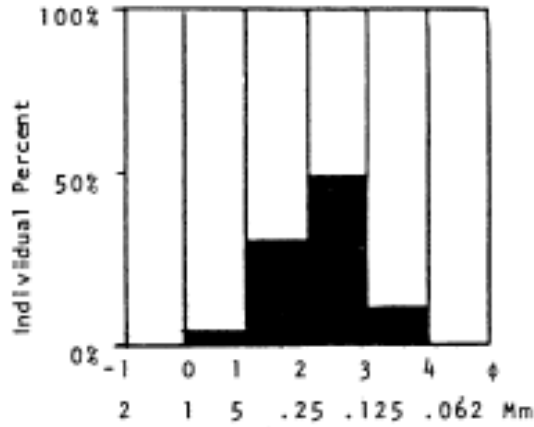
2.2.2 Distribución de tamaño de grano

En base a Le Roux (2012), para hacer un estudio de distribución de tamaño de grano primero se debe determinar el tamaño, forma del grano y luego clasificarlo. Este análisis provee importante información respecto a la proveniencia, medio de transporte y condiciones de deposición de los granos de un sedimento.

Para poder hacer este análisis primero debe realizarse un tamizaje de la muestra, ya que con los pesos retenidos en las mallas seleccionadas se podrá calcular posteriormente los parámetros necesarios para describir las partículas. Aparte del tamizaje existen otros métodos como los de decantación, que se basan en la ley de Stokes (solo para tamaño limo e inferior) y aquel denominado granulometría láser, que es muy utilizado sobre todo para separar partículas muy finas. Los resultados se pueden expresar gráficamente a través de tres formas: histograma, curva de frecuencia y curva de frecuencia acumulativa (en escala aritmética o probabilística).

El histograma (Figura 2.9) es un gráfico de barras a intervalos iguales, en el que se puede apreciar el porcentaje en peso que queda retenido en cada fracción, de esta forma el área de cada barra es proporcional a la cantidad de materia presente en cada clase. Se debe tomar en consideración que, si bien este gráfico permite una rápida visualización de las características generales del sedimento, es decir es útil para fine comparativo, este no permite obtener valores importantes con fines estadísticos y además está muy influenciado por los intervalos de clases elegidos.

Figura 2.9: Ejemplo de un histograma, tomado de Folk (1974).



La curva de frecuencia es similar al histograma con la diferencia que se construye de forma lineal. Estas curvas entregan información acerca del grado de asimetría de la distribución (Figura 2.10). De esta forma aquellas que tengan asimetría positiva indicarían un exceso de material fino, por el contrario, aquellas con asimetría negativa indican acumulación de material grueso. En este tipo de gráfico además de la asimetría, se puede observar también la selección y curtosis (Figuras 2.11 y 2.12). Todos estos términos serán definidos más adelante. Este tipo de gráfico es mejor que el histograma en el sentido que es independiente del tamaño de tamiz usado.

Figura 2.10: Esquema en el que se representan los distintos grados de asimetría. (A) Simétrico, (B) Asimetría positiva, (C) Asimetría negativa. El esquema es tomado de Le Roux (2012).

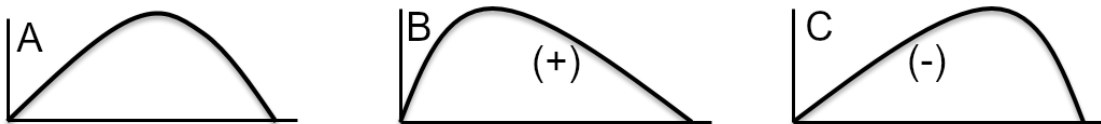


Figura 2.11: Esquema que ilustra cómo se observa una buena y mala selección en una curva de frecuencia. Tomado de Le Roux (2012)

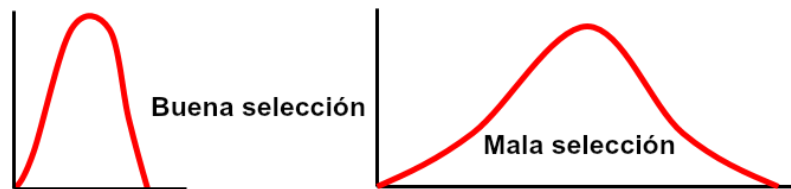
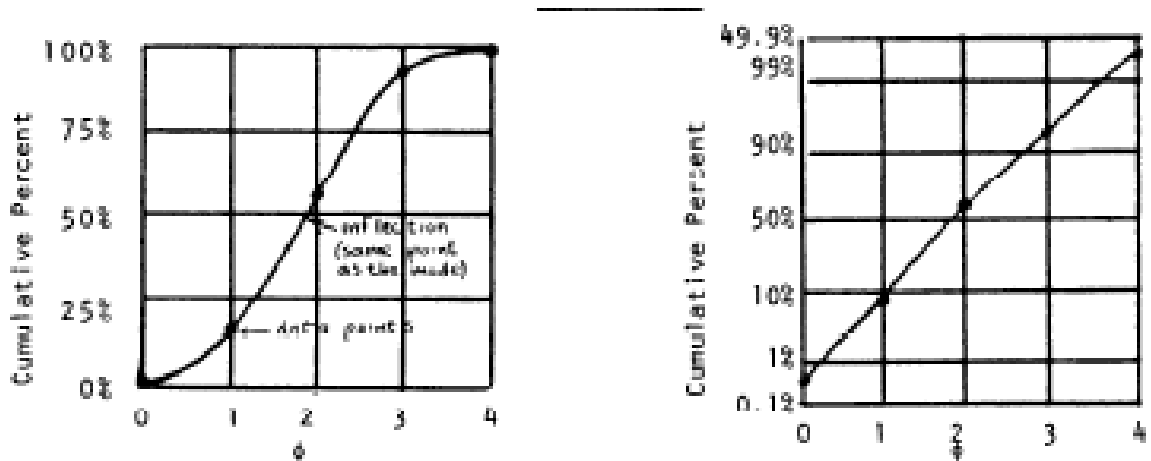


Figura 2.12: Esquema en el que se ilustran los distintos grados de curtosis. Tomado de Le Roux (2012).



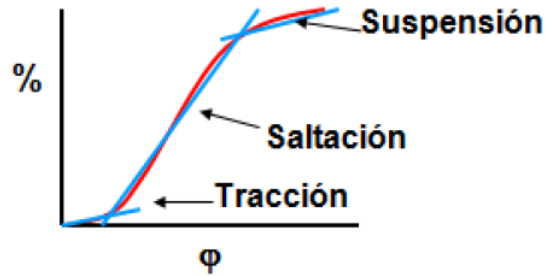
Por último, en la curva de frecuencia acumulada (en escala aritmética) se grafican en las abscisas el tamaño de grano y los porcentajes de abundancia en las ordenadas (Figura 2.13). Este gráfico es muy útil ya que entrega información acerca de cómo fueron transportadas las partículas (tracción, saltación y suspensión) en relación a su tamaño de grano. Además, dependiendo de la pendiente de las rectas asociadas a cada una de estas formas de transporte, se puede interpretar que tan buena fue la selección en cada una de estas cargas. También se propone el uso de papel probabilístico en la ordenada y aritmético en las abscisas para graficar las curvas acumulativas (Figura 2.13), ya que, de esta forma, las gravas y arenas adoptan una línea recta cuando su distribución es cercana a una normal. Este método simplifica un poco el dibujo de las curvas y en este caso los cambios de pendiente en el gráfico representan un conjunto o población distinta de tamaño de grano. Además, es a partir de este tipo de gráfico del cual se pueden obtener los percentiles, que son utilizados posteriormente para calcular los distintos valores estadísticos, es decir, para poder hacer un análisis cuantitativo.

Figura 2.13: Curvas de frecuencia acumuladas en escala aritmética (izquierda) y probabilística (derecha). Tomado de Folk (1974).



En la Figura 2.14 se ilustra cómo se pueden identificar los medios de transporte en una curva acumulativa.

Figura 2.14: En este esquema se muestra cómo se pueden identificar los tres medios de transporte de los granos. Tomado de Le Roux (2012).



El tamaño de grano se estima a través del tamizaje y los intervalos ϕ (phi) asociados a cada malla. En la Ecuación (1) se indica como este valor puede ser calculado y además en la Tabla 2.2, se observan los valores correspondientes a la escala propuesta por Udden-Wentworth (Wentworth, 1992) que permite hacer la transformación a milímetros.

$$\phi = -\log_2 d \quad (1)$$

d: corresponde al valor en milímetros, del diámetro del clasto.

Diámetro (mm)	ϕ
256	-8
64	-6
4	-2
2	-1
1	0
0,5000	1
0,2500	2

0,1250	3
0,0630	4
0,0312	5
0,0156	6
0,0078	7
0,0039	8

Tabla 2.2: Escala propuesta por Udden-Wentworth (Wentworth, 1992).

Las propiedades cuantitativas de las distribuciones de tamaño de grano son determinadas a partir de curvas acumulativas grafadas en papel probabilístico. Los cuartiles ϕ corresponden a los valores acumulativos del 25%, 50% y 75% (Q1, Q2 y Q3), por lo tanto, el **valor medio** ($Md \phi$) corresponde a Q2. La **media** se determina con la Ecuación (2) (Folk y Ward, 1957). Por otra parte, la **selección** ($\sigma\phi$) queda definida a partir de la Ecuación (3) y la Tabla 2.3, que muestra la escala utilizada para la fórmula de Folk y Ward (1957).

$$(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})/3 \quad (2)$$

$$[(\phi_{84} - \phi_{16})/4] + [(\phi_{95} - \phi_5)/6,6] \quad (3)$$

Muy buena	<0,35
Buena	0,35 to 0,50
Justa	0,50 to 0,71
Media	0,71 to 1,00
Pobre	1,00 to 2,00
Muy pobre	2,00 to 4,00
Extremadamente pobre	>4,00

Tabla 2.3: Términos descriptivos de selección de acuerdo a Folk y Ward (1957).

La **asimetría** ($Sk\phi$) está dada por la Ecuación (4) y se clasifica con la Tabla 2.4 (Folk y Ward, 1957).

$$\frac{[\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}]}{[2(\phi_{84} - \phi_{16})]} + \frac{[\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}]}{[2(\phi_{95} - \phi_5)]} \quad (4)$$

Muy negativa	-1,0 to -0,3
Negativa	-0,3 to -0,1
Simétrica	-0,1 to +0,1
Positiva	+0,1 to +0,3
Muy positiva	+0,3 to +1,0

Tabla 2.4: Términos descriptivos de asimetría de acuerdo a Folk y Ward (1957).

La **curtosis ($K\phi$)** compara la selección en los extremos de la curva acumulativas en relación a la selección en la parte central, se define con la Ecuación (5) y con la Tabla 2.5 (Folk y Ward, 1957).

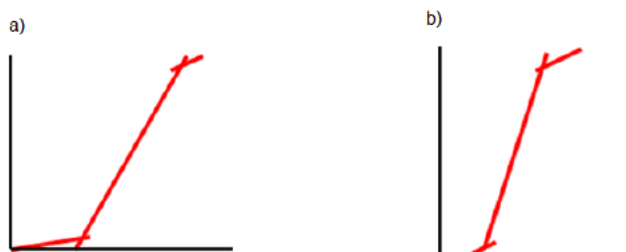
$$(95\phi - 5\phi) / [2.44(\phi_{75} - \phi_{25})] \quad (5)$$

Muy platicurta	<0,67
Platicurta	0,67 to 0,90
Mesocurta	0,90 to 1,11
Leptocurta	1,11 to 1,50
Muy leptocurta	1,50 to 3,00
Extremadamente leptocurta	>3,00

Tabla 2.5: Términos descriptivos de curtosis de acuerdo a Folk y Ward (1957).

A modo de ejemplo, en la Figura 2.15, se presenta de forma esquemática una curva cumulativa de arena de playa y otra de una duna. En el caso de las arenas de playa, estas suelen presentar una buena selección y una asimetría negativa, junto con un buen desarrollo de la carga de tracción, mientras que la carga de suspensión es muy pequeña. Al contrario, en las dunas o en ambientes eólicos, la asimetría es positiva y hay una muy buena selección de las cargas de saltación. Y la selección en general de los granos es buena. Esto muestra como cada ambiente es caracterizado por un cierto tipo de curva la cual va a depender del mecanismo de transporte específico que predomina en cada ambiente.

Figura 2.15: Curvas cumulativas esquemáticas para mostrar las diferencias que se observan en dos ambientes distintos; playa (a) y dunas (b). Tomado de Le Roux (2012).



Finalmente, una interpretación cuidadosa de los parámetros antes descritos, puede llegar a situar una muestra en un cierto ambiente sedimentario, permitiendo también interpretar los procesos a los cuales fue sometida la muestra.

2.3 Espectroscopia RAMAN

Esta técnica espectroscópica se basa en la dispersión inelástica de la luz monocromática. La dispersión inelástica significa que la frecuencia de los fotones en luz monocromática cambia al interactuar con una muestra. Estos fotones son absorbidos y luego reemitidos, la frecuencia de estos últimos se puede desplazar hacia arriba o abajo en comparación con la frecuencia monocromática original, esto es lo que se denomina el efecto RAMAN. Estos cambios son los que permiten obtener información sobre las transiciones vibracionales, rotacionales y otras transiciones de baja frecuencia en las moléculas.

Es una técnica no destructiva que comúnmente se utiliza en la identificación de material orgánico y minerales. En términos muy simples, este método se basa en el estudio de las frecuencias vibracionales de los compuestos generadas por la incidencia del rayo láser en la muestra. Se hace incidir una luz en el espectro de interés, esta luz es un rayo láser y puede variar entre luz visible, ultravioleta o infraroja cercana. Luego un detector recolecta la radiación que pasó a través de la muestra, pues dependiendo de sus propiedades químicas cada material absorberá la luz de distinta manera.

Para poder identificar el compuesto se debe comparar el espectro con otros ya conocidos de materiales orgánicos e inorgánicos. Existe la posibilidad de pagar por la base de datos oficial de los espectros, así como también hay varios sitios en internet que presentan una recopilación de datos de diversos espectros y cuyo acceso es gratuito. Uno de estos sitios corresponde a la base de datos generada por el Laboratorio de Geología de Lyon, Francia. También existe el proyecto Ruff, en el sitio web se pueden encontrar, además de los espectros RAMAN, una muy buena base de datos de patrones de difracción de rayos-X e información química de diversos minerales. En ambos casos la base de datos se ha ido completando gracias al aporte de diversos profesionales, quienes ayudan entregando muestras para poder generar los espectros.

Por lo tanto, este instrumento es una herramienta muy útil en el área forense, ya que permite analizar minerales, gemas y obras de arte sin producirles ningún daño, además por lo general no se requiere preparar la muestra. En el caso de estudio de la presente memoria se utilizó para corroborar que los granos analizados eran efectivamente cuarzo, de esta manera se puede complementar con lo identificado por el geólogo a través de las propiedades diagnósticas del mineral.

2.4 Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X mediante dispersión de energía (EDX-XRF)

Esta técnica consiste en analizar la radiación X característica generada por una muestra al ser irradiada con rayos-X emitidos desde un tubo de rayos-X. Esta técnica permite detectar cualquier elemento entre el ^{11}Na y el ^{92}U . El equipo disponible en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile es un Shimadzu EDX-720 y presenta un detector que es el que recolecta la energía asociada a los fotones liberados al ser irradiada la muestra con rayos-X, esta energía es característica para cada elemento.

En este equipo se pueden trabajar muestras en polvo, sólidas o líquidas. El formato en el que se deben presentar cada una de estas y cómo se trabajan se describen a continuación:

- a) Formato polvo: se deben entregar al menos 500 mg de muestra tamizado bajo malla 200 (74 μm). Luego esta debe ser homogennizada en seco y se extraen 20 mg de muestra. Estos son ingresados a un porta-muestra (armado con un film de polipropileno de 5 μm de espesor). Finalmente se procede a hacer el barrido, primero desde el titanio al uranio (50 kv y 1 mA por 100 segundos), luego desde el sodio al escandio (15kv y 1 mA por 100 segundos).

- b) Formato solido: la muestra debe venir con una superficie lisa en la zona donde se harán los análisis, el tamaño debe ser de por lo menos 13 mm de largo (con un máximo de 10 cm). No se requiere preparación previa solo una limpieza en seco. Finalmente se procede a hacer un barrido desde el titanio al uranio (50kv y 1 mA por 100 segundos), luego desde el sodio al escandio (15kv 1 mA por 100 segundos).

- c) Formato líquido: no hay mayores especificaciones al respecto.

Las ventajas que posee este método es que no es destructivo, no es necesario un tratamiento previo de las muestras, se pueden realizar mediciones en condiciones de vacío o en condiciones atmosféricas y los resultados son de fácil interpretación.

Se pueden realizar análisis cualitativos, semi-cuantitativos y cuantitativos dependiendo del objetivo del estudio. Los análisis de rutina permiten identificar elementos químicos con concentraciones superiores a unos 20-50 ppm.

2.5 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM en sus siglas en inglés) es un instrumento diseñado principalmente para la generación de imágenes, debido a su gran capacidad de aumento y su alta resolución. Como se menciona en el libro publicado por Murray (2011) usualmente se pueden generar imágenes con un aumento de 25x hasta 650.000x y

puede analizar partículas de un tamaño tan pequeño como de 1,5 nanómetros. Las imágenes son producidas al realizar un barrido con un fino haz de electrones sobre la muestra. Este barrido se realiza punto por punto. A la vez se reproduce una señal, obtenida a partir de los detectores de electrones que actúan como los ojos del microscopio analizando las interacciones de los electrones. Esta señal es reproducida en una pantalla de televisor o computador. Para que el detector capture correctamente la señal, el haz de electrones debe funcionar en vacío, ya que el aire puede dispersar los electrones e interferir con su detección.

El SEM utiliza una pistola de electrones como fuente de iluminación y campos magnéticos como lentes. Un lente condensador es el encargado de concentrar el flujo de electrones para transformarlo en un haz que luego pasa por las bobinas de barrido para ajustar el largo focal. Finalmente hay un lente objetivo encargado de volver a enfocar este haz en un punto muy diminuto, el cual va escaneando la muestra para crear un rastro (Deane, 2010).

Al incidir el haz de electrones se podrán observar dos interacciones importantes. La primera es la asociada a los electrones de la muestra que son expulsados durante la dispersión inelástica de los electrones incidentes, estos se denominan electrones secundarios. Corresponden a electrones de baja energía y son los que se usan para el análisis de micromorfologías. Estos electrones son recolectados por el detector que genera una señal, la cual es amplificada y transformada en una imagen a través de la reconstrucción del patrón de barrido del haz de excitación. La segunda interacción corresponde a electrones del haz incidente expulsados por interacción inelástica, estos se llaman electrones retrodispersados y son ideales para el análisis composicional en muestras planas. Es por ello que es importante escoger correctamente el modo de detección apropiado para el estudio a realizar. Además, se puede agregar un detector de energía dispersiva (EDS en sus siglas en inglés) el cual permite recolectar los rayos-X generados por la muestra y realizar un análisis composicional semi-cuantitativo, en el que se puede ver la distribución de elementos en la superficie.

En cuanto al aumento, este se puede cambiar fácilmente, al modificar el tamaño de la región escaneada en la muestra. Un mayor aumento es creado al escanear una región más pequeña, que por lo tanto requiere enfocar un punto de haz más pequeño (Deane, 2010).

Otro punto importante es que, dependiendo del objetivo del estudio, algunas muestras pueden requerir ser tratadas previamente, en caso de que sea necesario eliminar ciertos elementos como carbonatos, óxidos de hierro u otros, que puedan dificultar la visión de las morfologías. Además, toda muestra debe ser cubierta con alguna capa conductiva para evitar que la muestra se cargue, pudiendo generar una imagen defectuosa. Los elementos más utilizados para cubrir la muestra son el carbono y el oro. Hay algunos equipos SEM en los que es posible trabajar sin necesidad de hacer el recubrimiento.

El SEM es muy utilizado en una gran variedad de campos ya que permite el análisis de material inorgánico y orgánico. Uno de sus usos es en el estudio de fósiles, muchas características que en el pasado habían pasado desapercibidas ahora pueden ser descritas gracias a estos equipos. El SEM puede mostrar ralladuras, picaduras y crecimiento de minerales en la superficie de granos individuales de minerales, como por ejemplo en cuarzo. Estas características pueden ser útiles al contar la historia pasada de los granos individuales. Incluso se pueden encontrar otros minerales, como escamas de arcillas rellenando ralladuras, lo que añade otra característica posiblemente útil en la comparación de minerales. En estudios forenses se comenzó a utilizar el SEM a mediados de 1960 principalmente en el análisis de residuos de disparos y en otras partículas muy pequeñas. Es muy importante recalcar que este método puede ser muy útil para establecer similitudes o diferencias entre muestras, pero se debe ser cuidadoso con este análisis sin caer en un abuso, ya que, incluso dos granos de arena que han estado uno al lado del otro en los últimos millones de años, tendrán diferencias entre ellos (Murray, 2010).

Una de las principales ventajas de este método es su rapidez, alta fiabilidad, capacidad de analizar zonas muy pequeñas y el hecho de ser un instrumento no destructivo.

2.5.1 Preparación de la muestra y configuración del SEM

Actualmente si bien existen protocolos generales de cómo preparar las muestras y configurar el SEM, estos varían dependiendo del objetivo del estudio.

Respecto a la preparación de la muestra, Echlin (2009) divide los posibles tipos de muestra en seis grupos generales. Sin embargo, se debe considerar que ciertas muestras contienen elementos de varios de estos grupos. El objetivo de esta división es poder determinar el tipo de preparación dependiendo del elemento, ya que todos tienen ciertas características que influirán en el tratamiento que se les deberá hacer. A continuación, se presenta una tabla con estos grupos (Tabla 2.6).

Tipo de muestra	Características principales
Metales, aleaciones y materiales metálicos	Secos, buenos conductores de electricidad y calor, variando desde la alta conductividad de la plata hasta la baja conductividad de aleaciones como el nicromo.
Materiales inorgánicos duros y secos	Malos conductores, generalmente son químicamente estables
Materiales orgánicos naturales secos, firmes o duros (polímeros de hidratos de carbono, proteínas y grasa derivada de los organismos vivos.)	Son malos conductores y susceptibles al daño por radiación. Algunos especímenes son fácilmente humectados, otros son muy resistentes al agua.
Materiales polímeros orgánico sintéticos	Malos conductores y más susceptibles a daños por radiación que los tres anteriores.
Materiales y organismos biológicos	Susceptibles a deshidratación, destrucción química y decaimiento biológico. Malos conductores y muy susceptibles a daños por radiación.
Muestras líquidas y húmedas	Su preparación es la más compleja. Malos conductores y muy susceptibles a daños por radiación.

Tabla 2.6: Resumen de las posibles muestras que se podrían analizar en el SEM y sus características principales.

En el caso particular del análisis de granos de cuarzo, antes de preparar la muestra se recomienda estudiarla en un microscopio binocular. Luego la preparación va a depender del objetivo. En caso de que la muestra se esté analizando con fines forenses, se recomienda no utilizar técnicas de preparación más que un lavado gentil en agua destilada fría (Bull, 2006). Esto debido a que al aplicar otras técnicas de preparación van a desaparecer todas las partículas que pueden estar adheridas a la superficie de los granos, las cuales pueden ser arcillas, polen y otros micro-fragmentos, las que en análisis forenses pueden ser un aporte como evidencia.

Estas partículas adheridas y los recubrimientos que pueda tener el grano pueden proveer información importante respecto a la fuente de la roca y su diagénesis. Para estudios que se centran solo en la identificación de la historia sedimentaria de la muestra, es necesario limpiar profundamente la muestra, ya que facilita la observación de las microtexturas (Vos, 2014)

Si se logra probar que es totalmente necesario limpiar los granos de cuarzo después de una inspección preliminar, entonces se pueden aplicar los procedimientos que serán detallados a continuación.

Antes de aplicar cualquier químico es importante que la muestra haya sido secada en un horno. Luego para eliminar los carbonatos y óxidos de hierro, se suele utilizar ácido clorhídrico (HCl). Los granos son hervidos por 10 minutos en soluciones de HCl de concentraciones variables. Los óxidos de hierro pueden también ser removidos usando una solución de cloruro estañoso (SnCl_2). La materia orgánica usualmente es removida usando peróxido de hidrogeno (H_2O_2) o dicromato de potasio y permanganato de potasio disueltos en ácido sulfúrico concentrado. Este es un procedimiento basado en el método Walkley y Black (1934). Los recubrimientos de arcillas y partículas de grano fino pueden ser removidas de los granos de cuarzo con una solución Calgon (hexametáfosfato de sodio). Después de cada tratamiento la muestra debe ser lavada a fondo con agua desionizada para remover cualquier producto remanente que pueda cristalizar en la superficie del grano cuando la muestra sea secada, en el paso final, en un horno a 60°C (Vos, 2014). Se descarta el uso de ultrasonido para limpiar los granos debido a que no se tiene claro cuáles son los efectos que podría generar este en las microtexturas de los granos, pudiendo generar modificaciones.

Vos (2014) recomienda que el procedimiento de preparación de muestra para el análisis de microtexturas en granos de cuarzo se realice como se indica a continuación:

1. Separación representativa de la muestra secada en horno hasta que queden al menos 10 gramos de granos remanentes.

2. Hervir por 10 minutos en una solución de HCl 15% para remover carbonatos y óxidos de hierro.

3. Lavar al menos tres veces con agua desionizada hasta que el agua decantada este limpia.

4. Hervir por 10 minutos en una solución de pirofosfato tetrasódico (50g/L) para remover las arcillas, materia orgánica y otras partículas.

5. Lavar al menos tres veces con agua desionizada hasta que el agua decantada este limpia.

6. Secar la muestra a 60°C.

Finalmente, para que el estudio sea representativo, se considera que se deben seleccionar entre 25 a 30 granos de cuarzo por muestra, esto se realiza observando la muestra en un microscopio binocular. Se escoge este número en base a otros estudios (Krinley y Dornkamp, 1973). Bull y Morgan (2006) mencionan que 10 granos reflejarán el tipo de grano presente en la muestra y por lo tanto 30 a 50 granos analizados darán mayor confiabilidad para dar alguna conclusión. Además, se recomienda escoger granos de tamaños similares ya que la formación de microtexturas puede estar relacionada con el tamaño del grano.

2.5.2 Uso del SEM para el estudio de texturas superficiales en granos de cuarzo

Antes de la existencia del SEM los análisis de texturas superficiales se hacían utilizando un microscopio de luz y dado que la resolución y la magnificación no eran buenas se

dificultaba mucho el poder describir de forma detallada las distintas texturas o analizar granos individuales de 100 μm de diámetro y por supuesto ciertas texturas ni siquiera eran observables. Luego con la aparición del microscopio electrónico de transmisión (TEM en sus siglas en inglés) se logró resolver alguno de estos problemas, pero se agregó una nueva dificultad, ya que era necesario construir réplicas de cada grano de arena, lo que se traducía en un proceso lento y tedioso. El SEM fue desarrollado a finales de los 60 y el primer estudio hecho en granos de arena se realizó en 1969 por Krinsley y Margolis. La mayoría de los estudios que se realizaron entre 1960 a 1980 fueron orientados a la determinación de ambiente sedimentario e historia deposicional, es decir en identificar el ambiente de origen y la historia de los procesos que afectaron a los granos, basándose en su forma bruta y los detalles finos de su textura superficial.

El cuarzo es el mineral más común en la tierra, es particularmente resistente a daños mecánicos durante los procesos de erosión y el movimiento subsecuente de sedimento en el agua, viento o gravedad. Esta resistencia es mejorada por la habilidad del cuarzo a resistir ataques químicos por agentes atmosféricos, suelos ácidos y aguas de percolación. Esta naturaleza resistente es la que lo convierte en un excelente candidato para ser usado para reconstruir los distintos agentes que han actuado sobre los granos de arena, tanto en su pasado reciente como en su pasado geológico más distante (Bull, 2006).

En investigaciones forenses actuales, el rol de este tipo de análisis es principalmente de apoyo. Esto se debe a que en sedimentos cuya historia geológica es extremadamente compleja, el análisis de las microtexturas puede ser subjetivo, ya que la descripción y clasificación de grano, o característica textural, tienden a ser ambiguas. Entonces la descripción o definición de los tipos de granos va a depender principalmente del operador que lleve a cabo el estudio. Por lo tanto, se puede dar el caso en que un operador defina 15 tipos de granos, mientras que otro podría definir solo la mitad de estos. Es por ello que este tipo de análisis se suele utilizar en situaciones extremadamente simples en las que dos operadores distintos sean capaces de reproducir los mismos resultados. Por ejemplo, en una muestra que este claramente dominada por uno o dos tipos de grano fácilmente reconocibles (Pye, 2015).

Desde fines de los 70s se reconoce la necesidad de poder hacer un análisis cuantitativo que involucre grandes números de granos. Varios autores han recomendado técnicas como análisis Fourier y análisis fractales de las formas de granos de cuarzo y otros granos de arena (Pye, 2015). Otro punto importante, es que hoy en día no existe una

estandarización de los tamaños de granos a utilizar, ni de la cantidad mínima de granos que se requieren por muestra. Las formas, composición química y mineral de las partículas en los sedimentos varían en función de su tamaño, por lo que es importante poder definir de forma correcta cual tamaño se va a seleccionar. En cuanto al número mínimo de granos que se requieren a analizar hay autores que consideran 10 granos como mínimo, mientras que otros han utilizado 20,30 e incluso 200 granos. Dada esta gran ambigüedad, es importante tener claro el objetivo del estudio para poder definir de manera correcta la cantidad de granos a utilizar, ya que en muestras que presenten poca variabilidad de tipo de granos, no es necesario analizar 200 granos, si no que un número mucho menor. El principal problema se presenta cuando hay una gran variabilidad de tipos de granos, ya que suele ocurrir que aquellos que son los más discriminatorios o distintivos de un ambiente están en un 1% o 2% de abundancia, por lo que si se examina un número bajo de granos (10-50) hay una alta probabilidad de que estos no aparezcan (Pye,2015).

En el caso de esta memoria este tipo de análisis es útil, ya que solo se están comparando dos muestras, lo que permite poder estudiar un gran número de granos, con lo que se podría definir un ambiente sedimentario para la muestra A y además comparar los procesos sufridos por los granos de esta muestra con aquellas cuyo origen es conocido (muestras B, C, D, E). Además, es importante mencionar que la adición de suelos exóticos a través de la agricultura y la presencia de arenas usadas específicamente para cementos, bloques de adoquines, ingeniería o abrasivos (sand blasting) permite la incorporación de granos inusuales en suelos locales lo que provee excelentes granos para poder comparar. En aquellos casos donde se trabaje con más de un par de muestras, el método automatizado de análisis de la forma de las partículas o granos, ofrece una alternativa más práctica.

2.5.3 Estudio de micro texturas en granos de cuarzo

Distintos eventos geológicos van a generar modificaciones en las texturas de los granos de cuarzo, la identificación de estas puede permitir determinar el ambiente de proveniencia de los granos y en algunos casos es posible establecer una cronología de los procesos que los afectaron. Por lo tanto, describir estas microtexturas, o más bien la asociación de microtexturas observadas en un grano, permite relatar la historia sedimentaria de este.

La apariencia de los granos de cuarzo puede ser afectada de tres formas:

1. Origen del grano y cómo fue removido de su roca parental.
2. Mecanismo de transporte del grano desde su roca parental hasta donde se ubica actualmente.
3. Historia del grano, posterior a la deposición en el suelo u otro sedimento donde reside actualmente.

De acuerdo al trabajo de Bull y Morgan (2006) las texturas se pueden clasificar como mecánicas, químicas y morfológicas. En otros estudios (Krinley y Trusty, 1985; Vos, 2014) solo se consideran las dos primeras (mecánicas y químicas) y la combinación de ellas (mecánicas/químicas). En ese caso aquellas correspondientes a texturas morfológicas terminan siendo distribuidas entre las texturas mecánicas y las mecánicas/químicas. Para la presente memoria se utilizó la selección de texturas realizadas por Vos (2014) y que son resumidas a continuación.

- Texturas Mecánicas

1. Contorno del grano: corresponde al grado de redondeamiento del borde de los granos, puede ser angular, sub-angular, sub-redondeado y redondeado. Se relaciona principalmente con la forma de transporte, distancia, tiempo y tamaño de la partícula. A su vez es función también de la forma original del grano en su roca fuente.

2. Fracturas concoidales: están presentes en un amplio rango de ambientes y corresponden a patrones de quiebre típicos con forma curva similar a la de las conchas. Su tamaño es el reflejo de la energía asociada con su formación y su abundancia en la superficie del grano se relaciona con ciertos ambientes.

3. Escalones rectos y curvos: Están relacionados genéticamente con las fracturas concoidales, ya que se forman durante impactos cuando el plano de la fractura concoidal intersecta con los planos de clivajes del cristal de cuarzo. Tal como dice su nombre su forma es de escalones.

4. Crestas Serpenteantes: corresponden a líneas de intersección entre fracturas concoidales levemente curvas. Características de transporte eólico en desiertos y dunas litorales.

5. Patrones de quiebre y superficies planas de clivaje: se forman típicamente por impactos o presión sobre granos de cuarzo de diámetro inferior a los 150 micrómetros. Su formación se atribuye a los ambientes glacial y eólico.

6. Arcos gradados: son series de arcos concéntricos, circulares o semi-circulares que varían de 3 hasta 400 micrómetros en diámetro. Son producidos por presiones violentas o choques similar a las fracturas concoidales. Se ha observado en ambiente glacial y eólico (siendo este último menos común).

7. Grietas de percusión con forma de V: son depresiones con formas de V producidas principalmente por impactos en ambientes subacuosos de alta energía, donde se genera un contacto apreciable entre los granos, por ejemplo, en la zona litoral, ríos trezados y depósitos glacio-fluviales.

- 8.** Surcos y arañazos, rectos o curvos: se producen durante la colisión entre granos, es por ello que su ocurrencia se restringe a granos sobre los 400 micrómetros que tienen el momentum suficiente para penetrar la superficie de otro grano. Son característicos de la zona litoral donde son generados por las olas. Su tamaño varía de 2 a 25 micrómetros.

- 9.** Platos vueltos hacia arriba (invertidos): son series de platos finos y paralelos orientados en un cierto ángulo respecto a la superficie del grano. Se forman cuando los planos de clivaje de los granos de cuarzo se quiebran durante colisiones altamente energéticas. Son predominantes en ambientes eólicos y glaciales.

- 10.** Marcas de percusión con forma de media luna: son fracturas en los granos de cuarzo con forma de cono, la distancia entre cada punta de estas fracturas con forma de media luna varia de 1 a 30 micrómetros. Son el resultado de fuertes colisiones entre los granos. Son típicas en ambientes eólicos, aunque también se han observado en ambientes sub acuosos donde la colisión se genera entre granos de arena y grava.

- 11.** Bordes bulbosos: son bordes muy redondeados y prominentes, tienen una forma curva similar a una parábola. Este redondeamiento se atribuye al movimiento rotatorio que hacen los granos transportados por saltación, es por ello que es muy raro observar esta microtextura en granos de tamaño inferior a los 150 micrómetros. Es diagnóstica para las fases de transporte en un ambiente eólico.

- 12.** Fatiga de abrasión: se observan en capas superficiales reactivas en las que se generan grietas y dislocaciones que permiten que pequeños granos se adhieran. Se genera en colisiones altamente energéticas, donde la energía de la ola es transferida al grano. Es característica de transporte eólico y glacial.

- 13.** Estriaciones paralelas: son series de marcas lineales o curvas. Son causadas por el movimiento de bordes afilados contra el grano en cuestión. Es la microtextura diagnóstica para identificar un ambiente glacial.

14. Imbricated grinding features: Parecen una serie de crestas circulares a sub-circulares con un leve buzamiento. Diagnostica para la identificación de abrasión glacial y por lo tanto solo se observa en granos relacionados con algún ambiente glacial.

- Texturas Químicas

- 1. Pits orientados:** depresiones extremadamente regulares, triangulares o rectangulares. Independiente de su tamaño el cual puede ser muy variable, estas depresiones están perfectamente orientadas dentro de un plano del cristal. Se generan debido a dislocaciones y defectos dentro del cristal donde el cuarzo es más soluble. Su ocurrencia está ligada a procesos diagenéticos, a algunos horizontes edafológicos y al contacto con fluidos alcalinos, como el agua de mar.
- 2. Pits de disolución:** muy variables en apariencia, los diámetros pueden llegar a los 10 micrómetros y si bien comúnmente son semi-circulares a circulares también existen con otras formas, suele confundirse con inclusiones. Su formación se atribuye a horizontes de disolución edafológicos y a procesos diagenéticos.
- 3. Grietas de disolución:** son grietas en la superficie del grano causadas por disolución, su profundidad generalmente es menor a 10 micrómetros. Casi siempre aparecen en asociación con pits de disolución y están relacionadas genéticamente con ellos.
- 4. Escamas:** se describe como una superficie extendida de desintegración lo que provoca que ciertos fragmentos del grano se desprendan como escamas. Es el producto final de la alteración química y por ello su ocurrencia está restringida a horizontes de disolución edafológicos.
- 5. Glóbulos de sílice:** son pequeñas gotas circulares a subcirculares de precipitación de sílice. Su diámetro varía de 0,05 a 0,25 micrómetros. Se forman cuando granos

relativamente inmóviles entran en contacto con fluidos sobre saturados en sílice. Se restringen a ambientes de baja energía (continental, edafológico y diagenético).

6. Flores de sílice: estructuras radiales con simetría hexagonal, lo cual refleja la simetría trigonal del cuarzo alfa. Su diámetro varía de 1 a 20 micrómetros. Se forman por la coalescencia de glóbulos de sílice durante la precipitación continua de sílice.

7. Película de sílice: capa suave y delgada de sílice precipitado en la superficie del cuarzo. Puede enmascarar otras microtexturas y es característica de ambientes capaces de una precipitación rápida e importante de sílice.

8. Sobrecrecimientos cristalinos: se pueden reconocer como capas gruesas de precipitación de minerales subhedrales a euhedrales. Son claros indicadores de diagénesis.

- Texturas mecánicas/químicas

1. Relieve: describe que tan suave o áspera es la superficie del grano, describe que tan pronunciadas son las irregularidades en los granos. Estas se pueden generar por colisiones con otros granos y/o procesos de alteración. Un relieve alto por lo general es indicativo de granos levemente meteorizados o asociados a actividad glacial, mientras que el relieve medio o baja, tienden a ser generados en ambientes diagenéticos.

2. Depresiones alargadas: concavidades largas con forma de plato. Se atribuye a un transporte eólico altamente energético. Suele ocurrir junto a bordes bulbosos.

3. Chattermarks: son surcos rectos o levemente curvados dispuestos linealmente en las superficies de los granos minerales.

4. Partículas adheridas: son todos los fragmentos o partículas adheridas a los granos. Pueden dar información de la proveniencia de los granos.

5. Surcos poligonales, circulares o curvos: tienen contornos irregulares con largos variables. Se forman por procesos físicos y/o químicos. Son comunes en desiertos tropicales.

Para una descripción más completa de las micro texturas en granos de cuarzo se recomienda revisar los atlas de Krinsley y Doornkamp (1973) y Mahaney (2002). Ambos incluyen imágenes SEM de alta calidad en las que se muestran las diversas morfologías que se pueden encontrar en los distintos ambientes.

Para clasificar las microtexturas se pueden utilizar distintos métodos. En el caso de esta memoria se hará en términos de abundancia, indicando para cada grano si la frecuencia con que aparece la textura en la superficie es alta (h), media (m) o baja (l). De esta forma se podrá observar la asociación de texturas predominante y comparar entre las muestras para poder definir el origen de la muestra A. También se clasificará de una forma más simple que consiste en indicar la presencia o ausencia de la micro textura. En la Figura 2.16, tomada de una publicación de Vos (2014), se observa un resumen de las texturas típicas que se observan dependiendo de cada ambiente.

grano y pueden ser levemente rectos, a veces curvos o pueden incluso extenderse en elipses, con V's satélites a lo largo de su longitud. No se encuentran en granos inferiores a los 200 μm en diámetro. Dentro de las texturas químicas se pueden observar pits de disolución, los cuales tienden a tener lados bastante regulares y están en su mayoría orientados de la misma forma. Se ubican ya sea en las caras prismáticas o en las rombohedrales del cuarzo. Depresiones de tamaño variado contienen evidencia de que la precipitación y solución de sílice ocurre esparcida irregularmente a través de la superficie de los granos de ambiente subacuoso. Ocasionalmente en estas depresiones contienen patrones de fractura concoidal, estas fracturas son de menos de 10 μm . En granos de menor tamaño se pueden observar flores y glóbulos de sílice.

- Microtexturas de granos de cuarzo asociados a un ambiente eólico

Son cinco las texturas más características asociadas a este ambiente. La primera corresponde al gran redondeamiento de los granos; aunque se puede observar algunos granos algo angulosos los bordes se mantienen esféricos. Los platos invertidos son otras de las texturas comunes, estas cubren la superficie de granos de diámetro mayor a los 300-400 μm . Depresiones elongadas también son características de este ambiente y varían de 20 a 250 μm en su eje mayor. En estos granos es también común observar superficies pulidas o suaves, las cuales son observadas en granos de menor tamaño (90 a 300 μm). Finalmente, están las fracturas poligonales, circulares o curvas las cuales también son más comunes en granos pequeños (90 a 150 μm de diámetro). Por último, es importante mencionar que en granos costeros los platos invertidos suelen aparecer como parches y no cubriendo todo el grano. Por otra parte, las superficies pulidas y las fracturas también son escasas.

- Microtexturas de granos de cuarzo asociados a un ambiente glacial

La principal característica que presenta este ambiente es que presenta una gran cantidad de microtexturas. Se observa una gran variación en el tamaño de las fracturas concoidales, alto relieve, escalones paralelos y curvos, estrías paralelas y sobrecrecimiento de cristales. Por lo tanto, los sub-ambientes asociados no es posible clasificarlos, pero si se observan al menos cuatro de las texturas antes mencionadas se puede asociar el grano a un ambiente glacial.

- Microtexturas de granos de cuarzo asociados a un ambiente de ríos juveniles

Se caracteriza por presentar una textura de pequeños bloques que en la medida que aumenta el tiempo de transporte se van transformando en platos invertidos. Los granos en estos ambientes no se ven afectados por microtexturas distintivas como en los casos previos.

3 RESULTADOS

A continuación, se exponen todos los resultados obtenidos de los análisis realizados a las cinco muestras de arena relacionadas al caso de estudio central de esta memoria. Las muestras corresponden a la arena contenida en los sacos que fueron puestos como reemplazo de la mercancía original (muestra A), arena recolectada de la playa de Miami y Daytona (Florida, Estados Unidos), nombradas muestras B y C, respectivamente. Finalmente, dos muestras de arena que fueron tomadas de las playas de El Tabo y Caleta Portales (Región de Valparaíso, Chile), denominadas muestras D y E respectivamente.

3.1 Análisis mineralógico

En un estudio previo no publicado, realizado por Jacobus Le Roux, Katja Deckart y Helga Kemnitz, se analizaron las muestras A (sacos de arena) y B (playa de Miami). En este estudio, al mirar la muestra A (Figura 3.1) en un microscopio binocular, se determinó que esta presentaba solo granos de cuarzo con muy escasos fragmentos de conchas marinas y minerales pesados. Algunos granos de cuarzo tenían un borde parcial de cemento de calcita. Además, luego de secar la muestra en un horno, para un posterior tamizaje, se logró obtener una película blanca que fue identificada como halita. En la presente memoria se volvió a revisar la muestra bajo microscopio binocular sin observarse mayores diferencias con la descripción previa. Solo agregar que los granos de cuarzo presentan una selección media, son sub redondeados en su mayoría y con un grado

medio de esfericidad (ovalados). No se observan fragmentos de minerales pesados derivados de rocas volcánicas, además de la ausencia de ortoclasa.

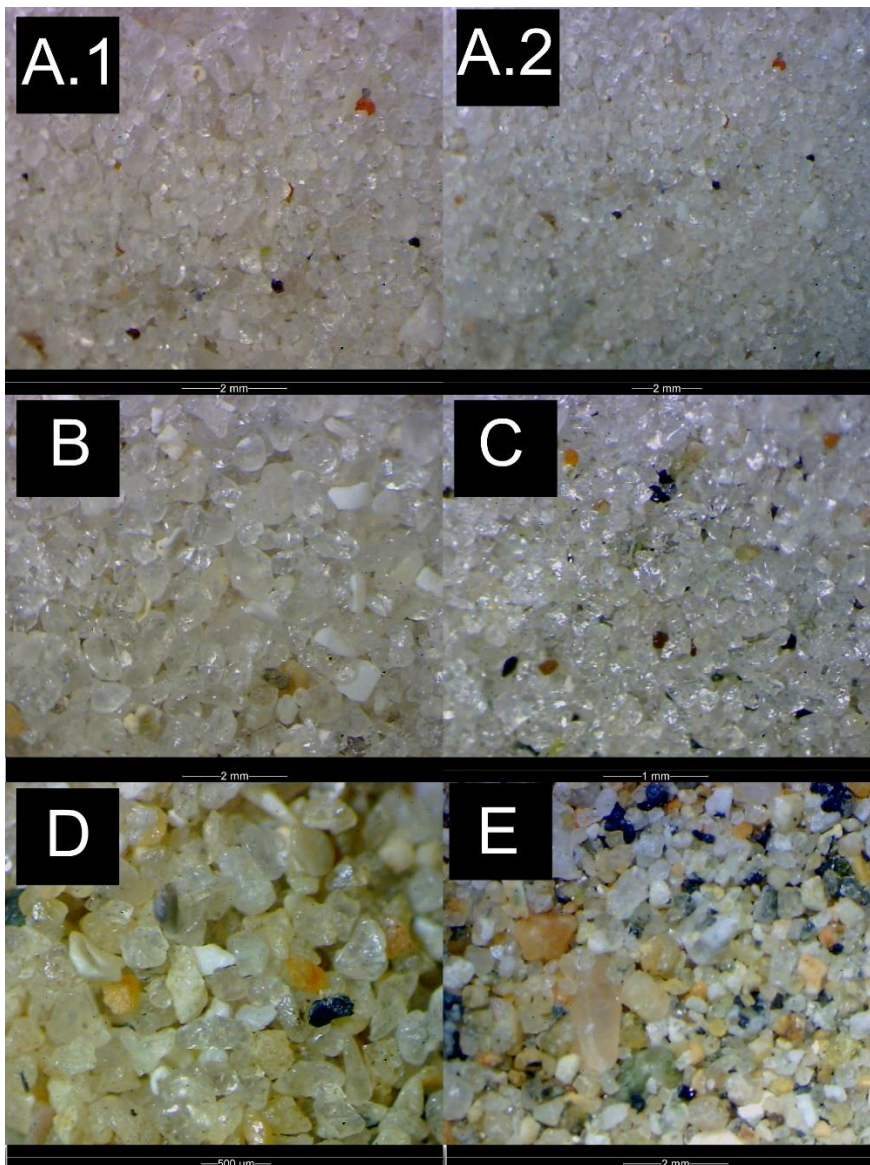
En relación a la muestra B (Figura 3.1), se puede observar que la mineralogía principal corresponde a cuarzo. Se aprecian fragmentos de conchas y muy escasos fragmentos de minerales pesados. En cuanto a la selección es media a mala y los granos son sub angulosos en su mayoría. No se observan granos de feldespato.

También se revisó la muestra C (Figura 3.1), para poder comparar con la mineralogía observada en A. En cuanto a su composición, nuevamente es principalmente cuarzo, pero ya no se observan los granos de cuarzo de mayor tamaño que sí se podían observar en A, más bien son granos de tamaño más fino. Además, presenta una mayor cantidad de fragmentos de conchas y de minerales pesados. Nuevamente no se observan granos de feldespato.

En la muestra D (Figura 3.1), se observa principalmente cuarzo, feldespato potásico en menor proporción y algunos minerales pesados. También hay una gran cantidad de fragmentos de conchas y algunos de los granos se observan cubiertos parcialmente por una pátina metálica y otros por calcita. Dentro de los minerales pesados se observan unos cristales de color negro que podrían corresponder a magnetita y a diferencia de la muestra A acá se muestran en una proporción mucho menor. El tamaño de los granos es también mayor respecto a la muestra A.

La muestra E (Figura 3.1), presenta nuevamente cuarzo como mineral principal, pero además se observa una gran cantidad de micas (biotita) y en menor cantidad feldespato potásico, calcita y minerales pesados (epidota, magnetita, rutilo). En relación a las muestras A, B, C y D, el tamaño de grano es mayor, mientras que la selección es baja. Se vuelven a observar pátinas metálicas sobre los granos y algunos fragmentos de vidrio de origen antropogénico. En los granos más grandes de cuarzo (0,5 cm) se logran observar marcas de percusión con forma de media luna.

Figura 3.1: (A.1) y (A.2) corresponden a imágenes de la muestra estafa a distinto aumento (origen desconocido). (B) playa de Miami (USA), (C) playa de Daytowna (USA), (D) playa El Tabo (Chile), (E) playa Caleta Portales (Chile).



3.2 Análisis geoquímico

3.2.1 Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X mediante dispersión de energía (EDX-XRF)

En el mismo estudio previo no publicado, mencionado anteriormente, se realizó un análisis geoquímico de la muestra A y B usando fluorescencia de rayos-X, en un LabEx Shimadzu EDX-720. Se realizó un análisis semi-cuantitativo y se utilizaron muestras en polvo. Este análisis se hizo para poder corroborar a través de otro método las observaciones realizadas en el microscopio binocular. En el caso de la muestra A se separaron los fragmentos de minerales pesados de los livianos utilizando un separador magnético Frantz. La fracción liviana dominante mostró un 93,6 % de sílice, lo que confirma al cuarzo como mineral dominante. En tercer lugar, aparece el calcio con un 1,19 %, el cual provendría de los fragmentos de concha y el cemento de calcita. El elemento que apareció sorprendentemente como segundo en cuanto a abundancia, es el platino con un 2,07%. La fracción mineral pesada contenía Ti, Fe, Ca, Si, Al, Mn, Ce y Zr. Es importante mencionar que no se encontró potasio en la muestra. Además, luego del secado de la muestra para su posterior tamizaje, se pudo recuperar una fina lamina correspondiente a halita, más conocida como sal común de mesa.

En cuanto a la muestra B, esta presentaba una concentración de 80,2% de sílice, lo cual confirma nuevamente al cuarzo como mineral dominante. El segundo elemento en cuanto a abundancia corresponde al calcio con un 14,4%, un valor mayor que en el caso de la muestra A, lo mismo ocurre con el cloro. Nuevamente esta muestra no presenta potasio, al igual que la muestra A.

Se descarta hacer un análisis geoquímico a las muestras C, D y E, debido a que luego del análisis mineralógico y granulométrico estas eran evidentemente distintas a la muestra A.

3.3 Análisis granulométrico

Para poder determinar de forma más precisa el posible ambiente de la muestra A se realizó un análisis detallado, primero en el microscopio binocular, donde se estudió el tamaño, forma y selección de los granos de cuarzo.

Luego se hizo un análisis cuantitativo a través de un tamizaje manual para luego poder realizar las respectivas curvas granulométricas. Este estudio se realizó en las muestras A, B, C, D y E para luego poder establecer, con este y los otros análisis, cuál de las muestras es la más similar a la muestra A.

3.3.1 Muestras A, B, C, D y E

Los resultados del tamizaje se presentan en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5. Luego en las Figuras 3.2, 3.4, 3.6, 3.8 y 3.10 se muestran las curvas de frecuencia y acumulativas de cada muestra. En la Tabla 3.6, se presentan los valores de selección, tamaño medio de grano, grado de asimetría y curtosis de cada muestra. El cálculo de estos valores se puede hacer de dos maneras, la primera es utilizar un papel de escala probabilística normal para representar las frecuencias acumuladas y a partir de este gráfico poder calcular los distintos percentiles que luego serán utilizados para el cálculo de los valores antes mencionados. Los parámetros descriptivos para cada muestra quedan resumidos en la Tabla 3.7. Es importante mencionar que, para los histogramas, si el espaciado entre cada tamiz no fue constante se deben recalcular los porcentajes de frecuencia acumulada a intervalos de clases iguales, esto se realiza con ayuda de la curva cumulativa. La segunda forma, que fue la utilizada principalmente en esta memoria, al menos para el cálculo de los valores estadísticos, es a través del programa GRADISTAT. Este es un programa en Excel, en el que solo es necesario ingresar las mallas utilizadas y el peso retenido en cada una de ellas, luego el programa calcula todos los valores estadísticos según Folk and Ward (1957) y a través del método de los momentos. Además, genera gráficos de distribución de tamaño de grano y cumulativos, tanto en valores métricos como en términos de ϕ . También entrega una breve descripción de la clase textural (Blott y Pye, 2001).

- Muestra A (arena de origen desconocido, sacos de arena asociados a la estafa)

En la muestra A se observa que la mayor parte de los granos quedaron retenidos en la malla #60 ($250\mu\text{m}$ o $\phi=2$), esto se puede observar en la Tabla 3.1 donde aparecen en detalle las mallas y los pesos retenidos correspondientes, esto es también claro al observar la Figura 3.3, donde aparece el histograma asociado a la muestra A. El histograma es unimodal y prácticamente simétrico. Un detalle importante es notar que en la muestra A hay una serie de tamaños ausentes entre los 0,85 mm a los 0,6 mm. A partir

de la curva de frecuencia (Figura 3.2) se puede observar que la muestra es simétrica, con selección media y platicurta.

# Malla	Tamaño [mm]	Phi ϕ	Peso [gr]	Frecuencia %	Frecuencia Acumulada
16	1,1900	-0,25	0,413	0,41	0,41
18	1,0000	0	0,47	0,46	0,87
20	0,8500	0,23	0	0,00	0,87
25	0,7100	0,49	0	0,00	0,87
30	0,6000	0,74	0	0,00	0,87
35	0,5000	1	10,899	10,71	11,58
60	0,2500	2	41,228	40,53	52,11
80	0,1800	2,47	27,386	26,92	79,03
120	0,1250	3	15,942	15,67	94,70
200	0,0750	3,74	5,161	5,07	99,77
230	0,0630	3,99	0,134	0,13	99,91
>230	0,0630	4,5	0,096	0,09	100,00

Tabla 3.1: Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra A.

Figura 3.2: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda de la muestra, mientras que en la frecuencia acumulada ya se pueden distinguir las distintas rectas asociadas a los medios de transporte.

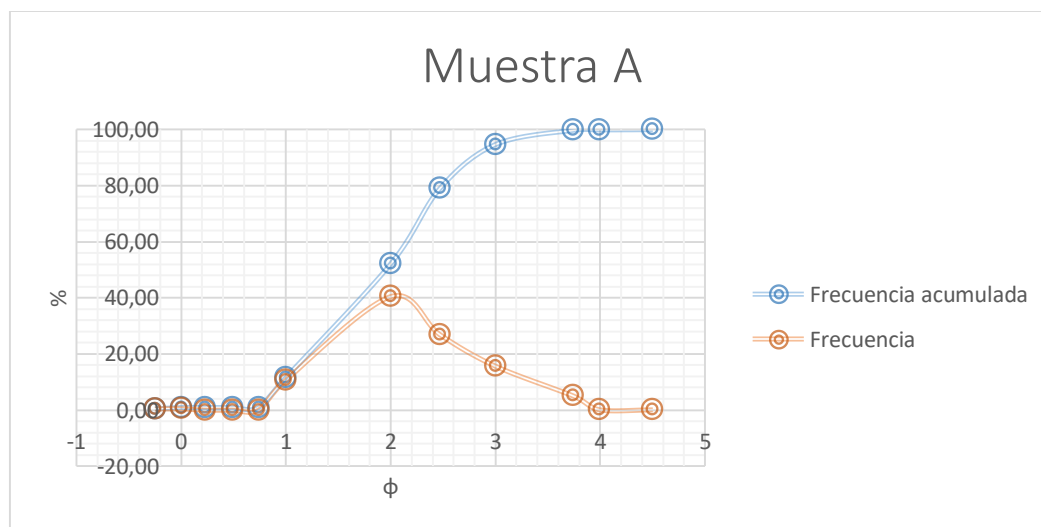
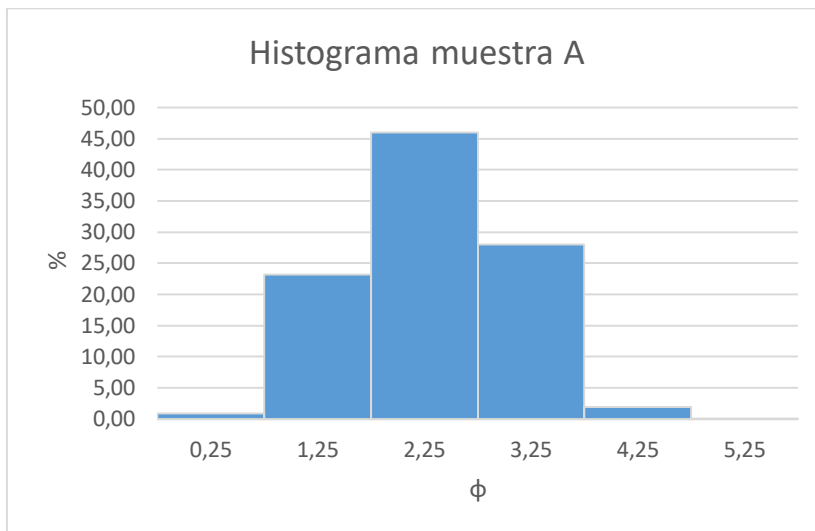


Figura 3.3: Se observa que los granos se concentran principalmente entre 1,25 y 3,25.



- Muestra B (Playa de Miami, Florida, Estados Unidos)

En la muestra B la mayor cantidad de granos quedaron retenidos en la malla #50 (297 μm o $\phi=1,75$) muy similar a lo ocurrido con la muestra A (Tabla 3.2). El histograma (Figura 3.5) es asimétrico y también permite observar que la mayor parte de los granos quedan retenidos entre las mallas #35 a la #50. En cuanto a la información cualitativa que es posible obtener a partir de la observación de la curva de frecuencia (Figura 3.4), se puede decir que la muestra es levemente asimétrica (+), con selección moderada y mesocurta.

# Malla	Tamaño [mm]	Phi ϕ	Peso [gr]	Frecuencia %	Frecuencia Acumulada
16	1,1900	-0,25	0	0,00	0,00
18	1,0000	0	0,51	0,51	0,51
20	0,8500	0,23	0,97	0,98	1,49
25	0,7100	0,49	2,09	2,10	3,59
30	0,6000	0,74	6,98	7,02	10,61
35	0,5000	1	12,473	12,54	23,15
50	0,2970	1,75	48,697	48,96	72,10
60	0,2500	2	14,154	14,23	86,33
80	0,1800	2,47	10,94	11,00	97,33

120	0,1250	3	2,504	2,52	99,85
200	0,0750	3,74	0,138	0,14	99,98
230	0,0630	3,99	0	0,00	99,98
>230	0,0630	4,5	0,016	0,02	100,00

Tabla 3.2: Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra B.

Figura 3.4: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda de la muestra, mientras que en la frecuencia acumulada ya se pueden distinguir las distintas rectas asociadas a los medios de transporte.

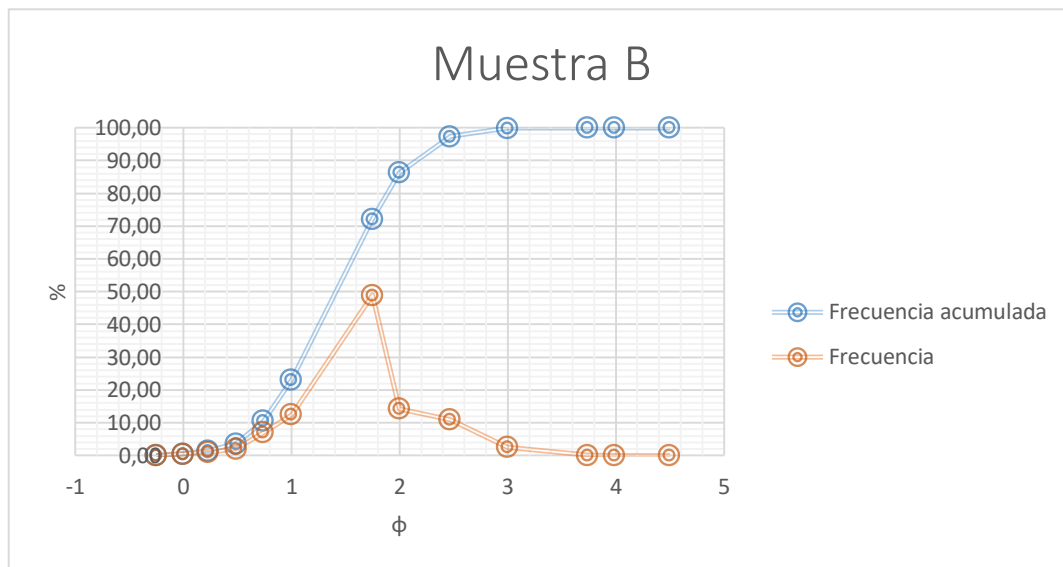
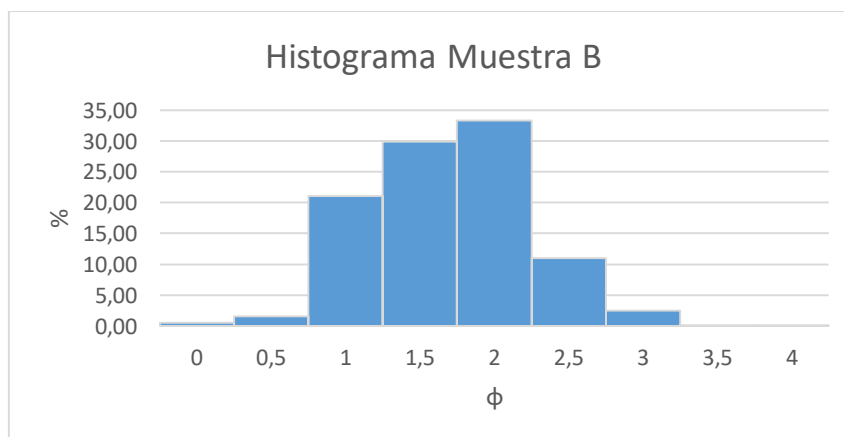


Figura 3.5: Se puede observar la distribución de los granos y que la mayoría quedan retenidos entre las mallas #35 a #60, en este histograma no queda tan evidenciada la predominancia de un cierto tamaño de grano.



- Muestra C (Playa de Daytona, Florida, Estados Unidos)

La muestra C al contrario de las muestras previas, presenta el mayor porcentaje de granos retenidos en la malla #80 (180 μm o $\phi=2,47$, ver Tabla 3.3). Su histograma (Figura 3.7) es asimétrico al igual que la muestra B, lo que se debe a que hay una mayor concentración de partículas finas. A partir de la curva de frecuencia (Figura 3.6) se puede decir que la muestra es levemente asimétrica (+), con una muy buena selección y mesocurta.

# Malla	Tamaño [mm]	Phi ϕ	Peso [gr]	Frecuencia %	Frecuencia Acumulada
30	0,6000	0,74	0	0,00	0,00
35	0,5000	1	0,0165	0,02	0,02
50	0,2970	1,75	0	0,00	0,02
60	0,2500	2	1,3	1,21	1,23
80	0,1800	2,47	75,4	70,28	71,51
120	0,1250	3	26,3	24,51	96,02
200	0,0750	3,74	2,1	1,96	97,98
230	0,0630	3,99	2,1	1,96	99,94
>230	0,0630	4,5	0,0652	0,06	100,00

Tabla 3.3: Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra C.

Figura 3.6: A partir de la curva de frecuencia es posible observar la moda y de forma cualitativa la simetría, selección y curtosis. En la curva de frecuencia acumulada lo que podría ser la recta correspondiente a la saltación no es tan evidente.

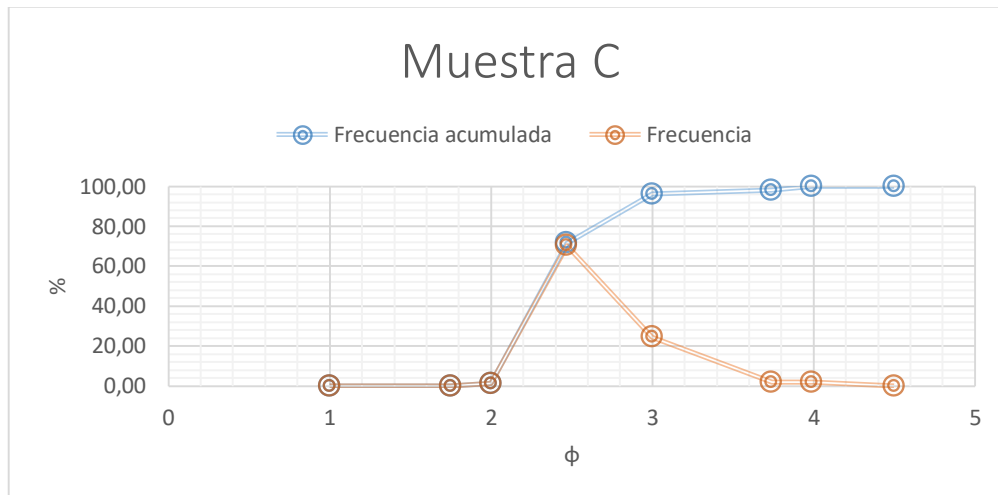
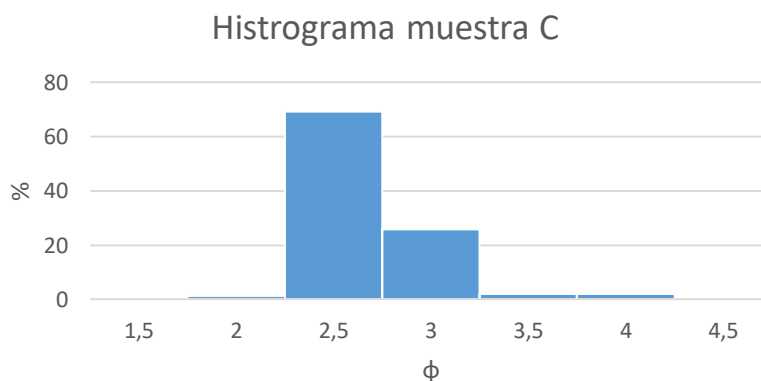


Figura 3.7: Se puede observar la distribución de los granos y es evidente la predominancia de un cierto tamaño de grano (180 μm).



- Muestra D (Playa El Tabo, Región de Valparaíso, Chile)

La muestra D, presenta el mayor porcentaje de granos retenidos en la malla #60 (250 μm o $\phi=2$, ver Tabla 3.4), esto se observa claramente en el histograma (Figura 3.9). De acuerdo a la curva de frecuencia (Figura 3.8), se puede decir que esta muestra es simétrica, mesocurta y con buena selección.

#Malla	Tamaño [mm]	Phi ϕ	Peso [gr]	Frecuencia %	Frecuencia Acumulada
14	1,4	-0,48	0,2	0,18	0,180
25	0,71	0,49	0,5	0,45	0,630
35	0,5	1	0,9	0,81	1,440
60	0,25	2	96	86,39	87,826
80	0,18	2,47	10,8	9,72	97,544
100	0,015	2,74	1,8	1,62	99,164
170	0,09	3,47	0,9	0,81	99,974
200	0,0750	3,74	0,0245	0,02	99,996
230	0,0630	3,99	0,0011	0,00	99,997
>230	> 0,0630	4,5	0,0032	0,00	100

Tabla 3.4: Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra D.

Figura 3.8: Al igual que en la muestra C la posible recta asociada a la saltación no se observa tan claramente en este tipo de gráfico (frecuencia acumulada). La curva de frecuencia es bastante clara y permite dar una primera impresión respecto a la simetría, selección y curtosis de la muestra.

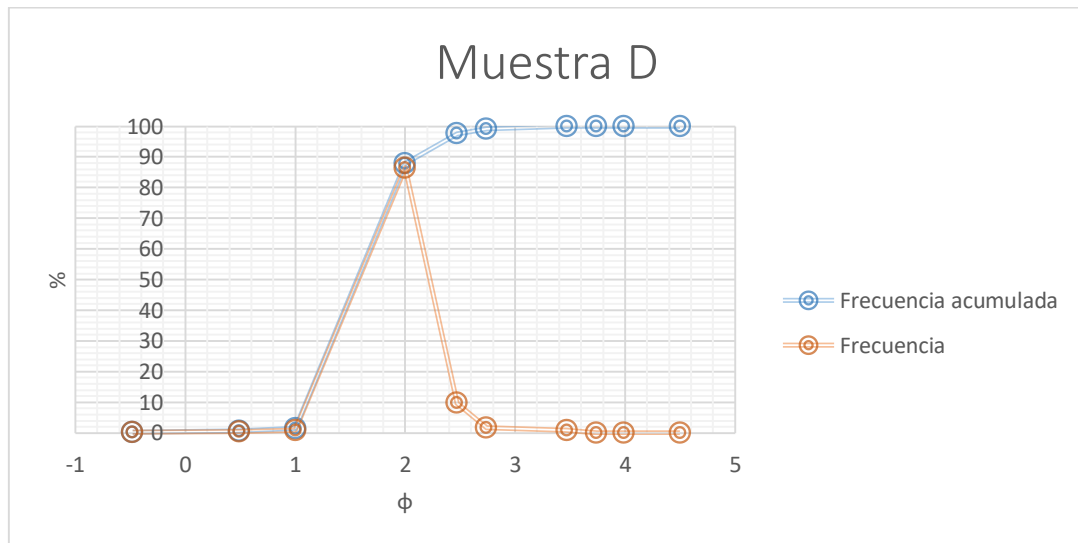
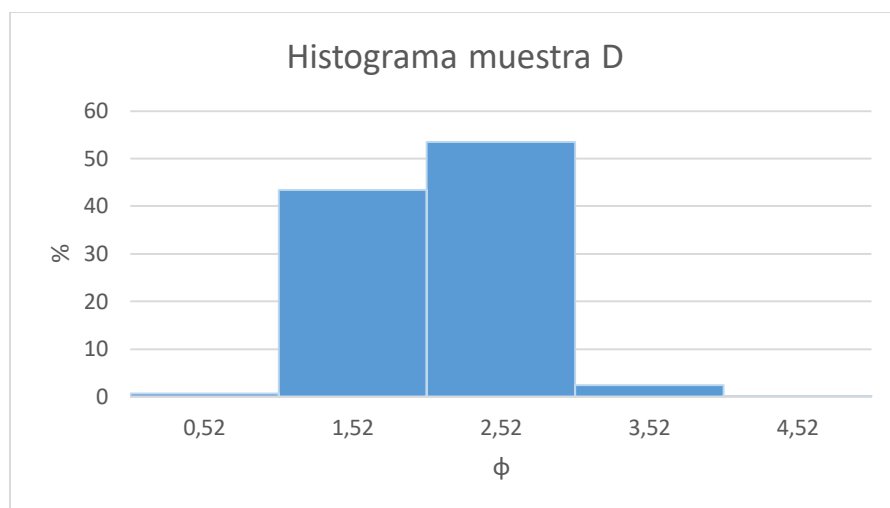


Figura 3.9: Al quedar la mayoría de los granos retenidos en una sola malla (#60) el histograma muestra esto de forma bastante evidente.



- Muestra E (Playa Caleta Portales, Región de Valparaíso, Chile)

La muestra E, presenta el mayor porcentaje de granos retenidos en la malla #60 (0,25 mm o $\phi=2$, ver Tabla 3.5), esto se observa claramente en el histograma (Figura 3.11). De acuerdo a la curva de frecuencia, se puede decir que esta muestra es levemente asimétrica (-), mesocurta y con buena selección media (Figura 3.10).

#Malla	Tamaño [mm]	Phi ϕ	Peso [gr]	Frecuencia %	Frecuencia Acumulada
14	1,4	-0,48	3,7	3,246	3,246
25	0,71	0,49	23,4	20,526	23,772
35	0,5	1	28,3	24,825	48,596
60	0,25	2	47,2	41,404	90
80	0,18	2,47	6,5	5,702	95,702
100	0,15	2,74	1,7	1,491	97,193
170	0,09	3,47	1,4	1,228	98,421
200	0,075	3,74	0,5	0,439	98,860
230	0,063	3,99	0,7	0,614	99,474
>230	<0,063	4,5	0,6	0,526	100

Tabla 3.5: Resultados obtenidos a partir del tamizaje de la muestra E.

Figura 3.10: En esta muestra la curva de saltación ya se hace evidente al mirar la curva de frecuencia acumulada. Respecto a su curva de frecuencia está al igual que en las otras muestras permite tener una primera impresión respecto a ciertas características como la selección, asimetría y curtosis.

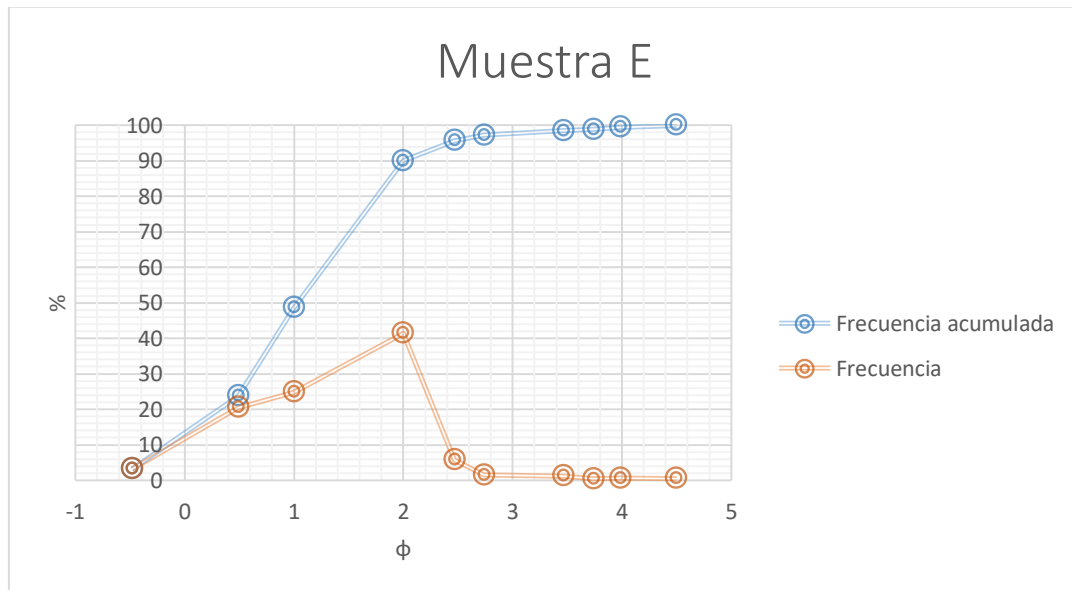
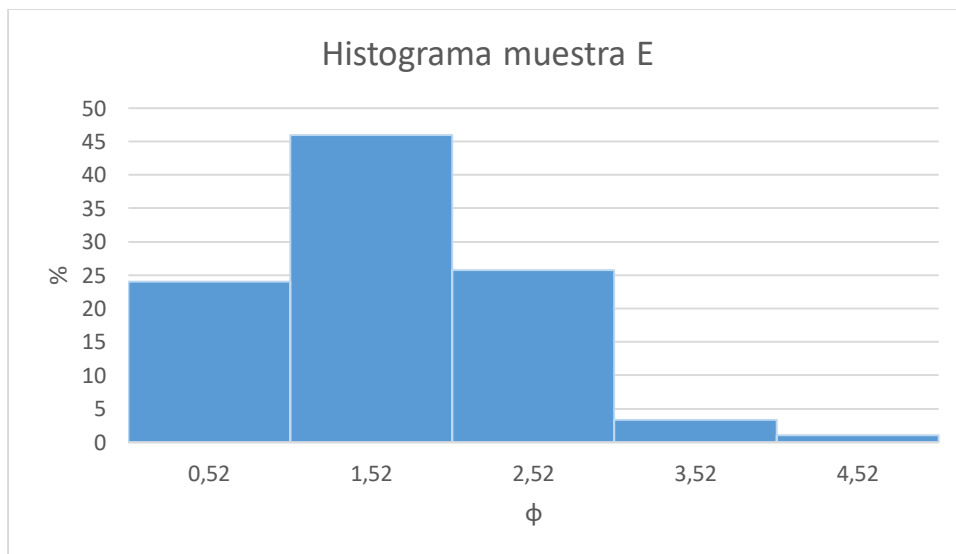


Figura 3.11: Se observa la distribución de los granos y que estos quedan retenidos preferentemente entre valores de phi de 0,52 y 1,52.



A partir del programa GRADISTAT se obtienen los parámetros estadísticos resumidos en la Tabla 3.6.

Parámetro	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	Muestra E
Mediana (ϕ)	1,82	1,45	2,41	1,6	1,1
Medio (ϕ)	1,898	1,407	2,39	1,562	0,997
Selección	0,715	0,555	0,304	0,395	0,852
Asimetría	-0,054	0,018	0,324	0,102	-0,042
Curtosis	0,839	0,970	1,006	0,927	1,024

Tabla 3.6: Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos con el programa GRADISTAT.

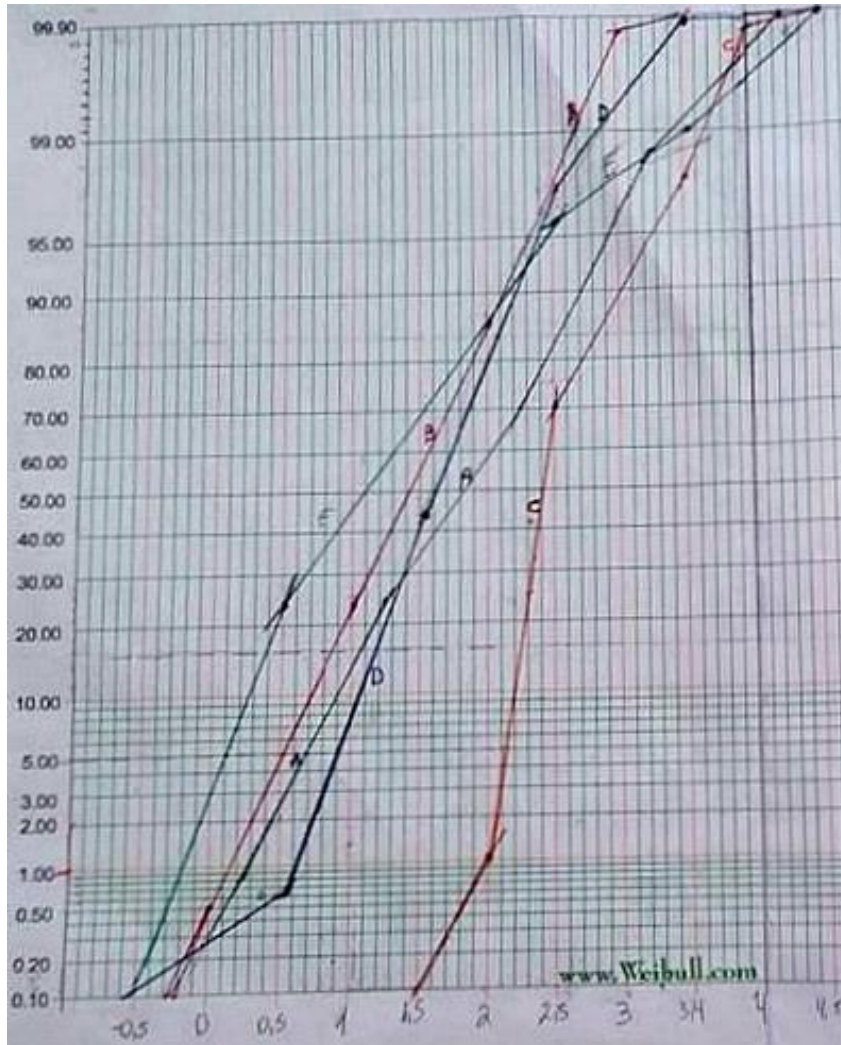
Luego, observando las tablas descritas por Folk y Ward (1957) se resumen en la Tabla 3.7 los parámetros descriptivos para cada muestra.

Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	Muestra E
Arena media	Arena media	Arena fina	Arena media	Arena gruesa
Selección media	Selección moderada	Selección muy buena	Selección buena	Selección media
Simétrica	Simétrica	Asimetría muy positiva	Asimetría positiva	Simétrica
Platicurta	Mesocurta	Mesocurta	Mesocurta	Mesocurta

Tabla 3.7: Descripción cualitativa para cada muestra.

Finalmente se adjunta un gráfico con las frecuencias acumulativas en papel probabilístico (Figura 3.12). En este caso es clara la ausencia de la carga de tracción en la muestra A, algo que no es usual de encontrar en los distintos ambientes sedimentarios. Por otra parte, se logra observar la carga de saltación la cual presenta una pendiente moderada y finalmente se identifica una carga de suspensión pequeña. Todas estas características son típicas de encontrar en ambientes de playa. Si se comparan las muestras A, B y D principalmente para comparar la curva de la muestra A con las curvas de dos muestras cuya proveniencia se sabe que es de una playa, se puede observar que las tres muestras comparten las características antes mencionadas con la excepción de la carga de tracción que en el caso de A no aparece. Las principales variaciones se observan con la muestra D ya que esta presenta una carga de tracción muy desarrollada, lo cual concuerda con el hecho de que esta muestra presenta un tamaño de grano mayor y por lo tanto es de esperar que estos sean transportados por este medio en un ambiente de alta energía como lo es una playa.

Figura 3.12: Frecuencias acumulativas en papel probabilístico.



3.4 Análisis de microtexturas en granos de cuarzo

Con los resultados de los análisis previos se decidió realizar un estudio de micro texturas de cuarzo en las muestras A y B, esto debido a la gran similitud que presentaban en cuanto a mineralogía y parámetros granulométricos. Las muestras utilizadas son aquellas que fueron retenidas en la malla #35 (500 μm). Dado que el objetivo de estos estudios es para uso forense y en ese aspecto es importante conservar todo tipo de evidencia, se decidió no tratar las muestras para eliminar los carbonatos, óxidos de hierro, materia orgánica, arcillas y partículas de grano fino. Por lo que solo se realizó un baño delicado de los granos en agua destilada. Además, al observar los granos en el microscopio binocular se pudo ver que estos no presentaban una gran cantidad de partículas añadidas

y aquellos que tenían algún recubrimiento de carbonato simplemente no se seleccionaron, por lo que no era necesario hacer una limpieza muy exhaustiva de estos, pues su superficie ya estaba relativamente limpia.

Luego usando un microscopio binocular se seleccionaron manualmente 50 granos de cuarzo, para que se consideren como representativos de la muestra, este número de granos fue seleccionado luego de haber revisado diversos estudios (Pye, 2004; Bull y Morgan, 2006; Vos, 2014) Estos granos se montaron en una cinta de carbón doble faz la que se ubica sobre el stub. Para este análisis el modelo de SEM utilizado corresponde al Quanta 3D 200i. En cuanto a la configuración del equipo, se trabajó en el modo de bajo vacío, voltaje de 15 kv, spot size 5 y se llenó la cámara con vapor de agua a una presión de 70 Pa. La ventaja de trabajar en el modo de bajo vacío es que no es necesario realizar el recubrimiento, en oro o carbono, de los granos.

Se selecciona el conjunto de micro texturas a partir de lo observado en las imágenes SEM (Tabla 3.8 y 3.9) y lo leído en la bibliografía. Luego se realiza un gráfico de frecuencias para representar aquellas micro texturas cuya ocurrencia es predominante (Figura 3.18). Con estos resultados se busca poder realizar una interpretación del ambiente sedimentario del cual provendría la muestra A y hacer una comparación entre las muestras con el objetivo de identificar los procesos a los que fueron sometidas, pudiendo hacer un descarte de aquellas que evidencien una historia sedimentaria distinta.

3.4.1 Muestra A (Arenas de origen desconocido asociadas a la estafa)

Esta muestra corresponde a aquella correspondiente a los granos de arena que fueron puestos como reemplazo de la mercancía, es decir la muestra estafa. Respecto a la forma y apariencia de los granos observados en las imágenes SEM de esta muestra, se observa que la mayoría de los granos presentan una forma elongada (6% son esféricos) y con bordes redondeados, solo un 6,25% de los granos presentan bordes bulbosos. Además, la superficie de los granos, en su mayoría se ve afectada por una abrasión. También se observan áreas grandes suavizadas o pulidas. Su relieve es bajo a medio y un número importante evidencia los efectos de la disolución química de sílice, aunque en intensidad baja a media.

En detalle, se observa que las micro texturas predominantes corresponden a: marcas en forma de V, rasguños y orificios curvos/rectos, además de cráteres y marcas en forma de media luna. Las marcas en formas de V se observan en distintos tamaños y orientación. En su mayoría no están orientados y su forma es irregular, lo que indica un origen mecánico de estas, mientras que hay otro grupo cuyo tamaño es mayor y en el que las Vs presentan una forma más regular y en algunos casos muestran una orientación (aunque esta no es evidente), estas se asocian a un origen químico. La frecuencia de estas en la superficie de los granos es media, sin embargo, aparecen en casi la totalidad de los granos. Las fracturas concoidales son muy escasas, las pocas que se logran observar, no están bien preservadas y son de tamaño medio (100 μm). En algunos granos se logra observar platos invertidos, aunque en baja proporción. En cuanto a las microtexturas de origen químico, lo que predomina son los pits de disolución y en menor cantidad películas de sílice. Predomina claramente la disolución química por sobre la precipitación. En un par de granos se logra observar pequeños cristales cúbicos, en cuanto a las partículas adheridas, estas no son abundantes. En las Figuras 3.13 y 3.14, se logran observar algunos de los granos más representativos de las micro texturas antes mencionadas.

Figura 3.13: Se observan granos de cuarzo pertenecientes a la muestra A con distintas formas. (A) sub-elongado, presenta gran cantidad de marcas con forma de media luna y en menor medida surcos curvos (B) elongado, presenta marcas con forma de V y en menor medida surcos profundos, (C) bulboso, se pueden observar depresiones elongadas y por último (D) corresponde a un grano esférico.

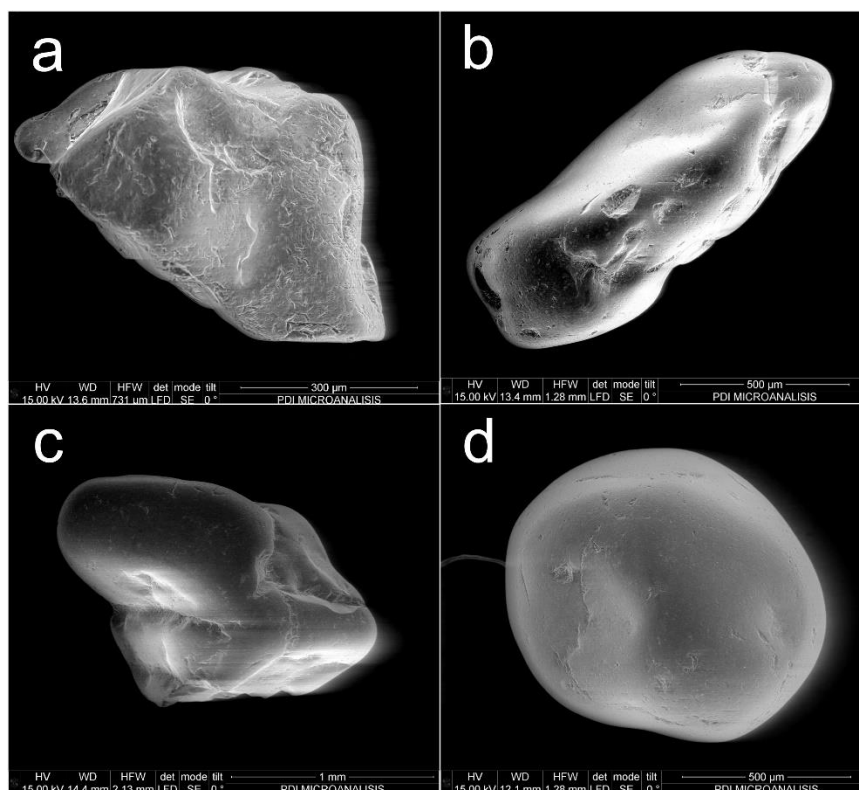
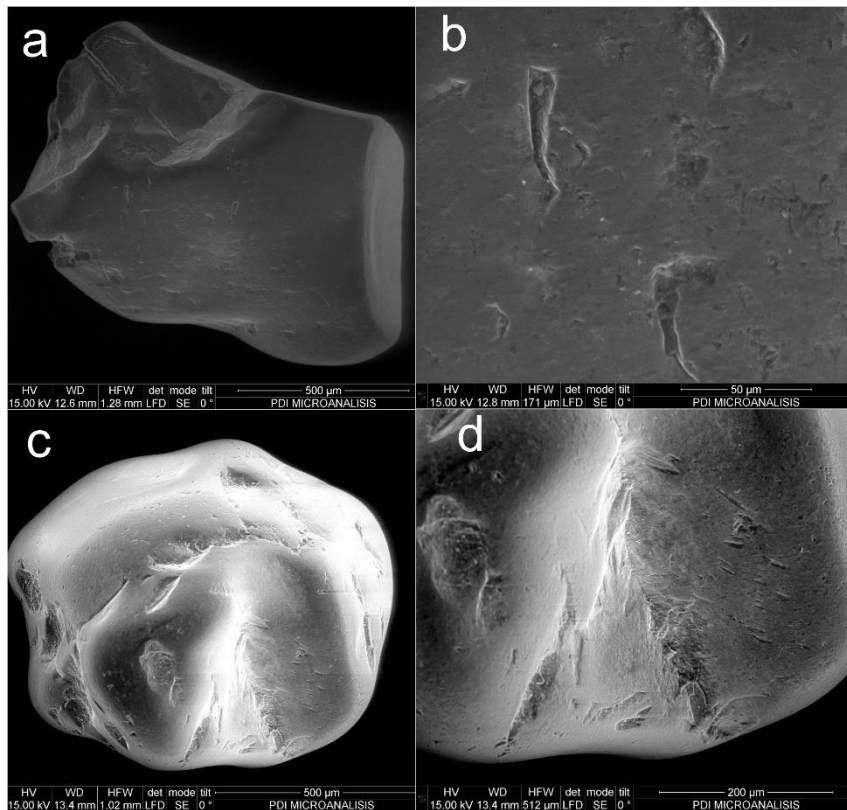


Figura 3.14: Granos obtenidos a partir de la muestra A, (a) Grano elongado con bordes sub-redondeados. Evidencia un plano de fractura y además presenta abundantes marcas con forma de V en su superficie y en menor medida surcos curvos, (b) es una ampliación de (a), donde es posible observar pits de disolución con forma irregular, (c) grano sub-elongado en el que se pueden observar grandes surcos, (d) ampliación de (c) en donde se logra ver las marcas en forma de V además de algunos surcos rectos.



3.4.2 Muestra B (Playa de Miami, Florida, Estados Unidos)

Esta muestra fue tomada en la playa de Miami. Respecto a la forma y apariencia de los granos estos son claramente elongados y sub-redondeados, similar a la muestra anterior, aunque en este caso no se observan granos esféricos. Un 8% de los granos presenta bordes bulbosos. Respecto a la superficie de los granos, en comparación a la muestra A, esta se observa menos afectada por abrasión natural y a su vez, los bordes de los granos son menos redondeados. En algunos casos se observan superficies suavizadas o pulidas. Su relieve al igual que la muestra A, es bajo a medio. Nuevamente predomina la disolución química por sobre la precipitación.

Respecto a las microtexturas, predominan las marcas en forma de V, los surcos (curvos y rectos), rasguños y en algunos casos grandes cráteres. También se pueden observar marcas con forma de media luna, aunque en un porcentaje bastante menor que las otras microtexturas. Nuevamente se observan marcas en forma de V de origen mecánico y químico, además en estos granos, a diferencia de la muestra A, se logran observar claramente Vs orientadas, cubriendo superficies completas de algunos granos. La frecuencia de estas marcas en la superficie de los granos es de media a alta (50-75% de la superficie del grano). Se observa una mayor cantidad de surcos curvos que rectos y los rasguños son casi inexistentes. Además, se pueden encontrar en algunos granos fracturas concoidales de tamaño pequeño a medio (10-100 μm) relativamente bien preservadas. También se logran ver de forma más clara escalones rectos y curvos, aunque no es una característica predominante. En cuanto a las microtexturas de origen químico predominan los solution pits, esos se presentan en variados tamaños y con forma circular y rectangular. Una baja cantidad de granos presenta microtexturas asociadas a la acción del viento, prácticamente no se observan platos invertidos, tampoco crestas serpenteantes, ni arcos gradados.

También, se logra apreciar una cantidad significativa de partículas adheridas, sin identificar, de diversos tamaños. Otro resultado importante es que en poco más de la mitad de los granos (54%) se logra observar diatomeas no muy bien preservadas (Figura 3.17). En las Figuras 3.15 y 3.16, se logran observar alguno de los granos más representativos de las micro texturas antes mencionadas.

Figura 3.15: Granos pertenecientes a la muestra B, (a) Grano subelongado, (b) ampliación de (a) en donde es posible observar en detalle los pits de disolución orientados, (c) grano elongado en el que se logran observar platos invertidos, (d) se aprecian las marcas en forma de V y pits de disolución, (e) grano bulboso, presenta marcas con forma de V y con forma de media luna, en (f) se logran observar pits de disolución circulares.

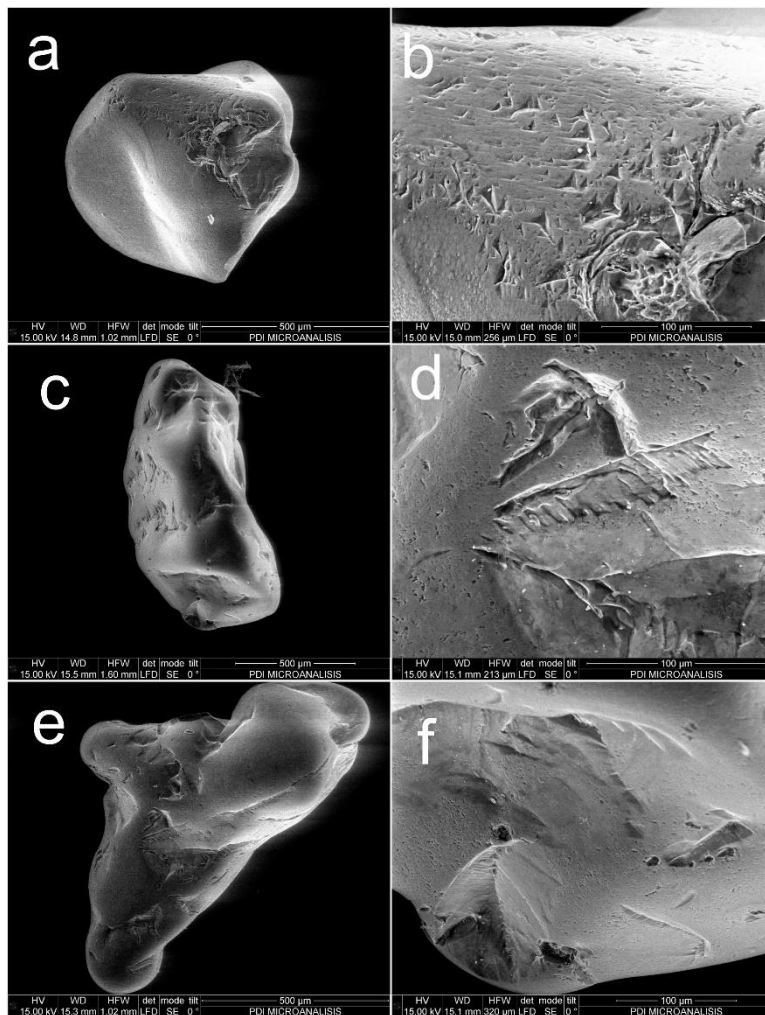


Figura 3.16: Grano pertenecientes a la muestra B, (a) Grano elongado cuya superficie se presenta suavizada y con múltiples fracturas concoidales pequeñas, (b) ampliación de las fracturas concoidales de (a), (c) grano elongado que presenta una fractura y múltiples marcas con forma de V y (d) ampliación de rasguños observados en (b), en (e) se observa un grano elongado con bordes subangulosos, la abrasión de su superficie es alta, (f) es un grano con grandes hoyos en su superficie, además de marcas de V de mayor tamaño, también se observan marcas con forma de media luna.

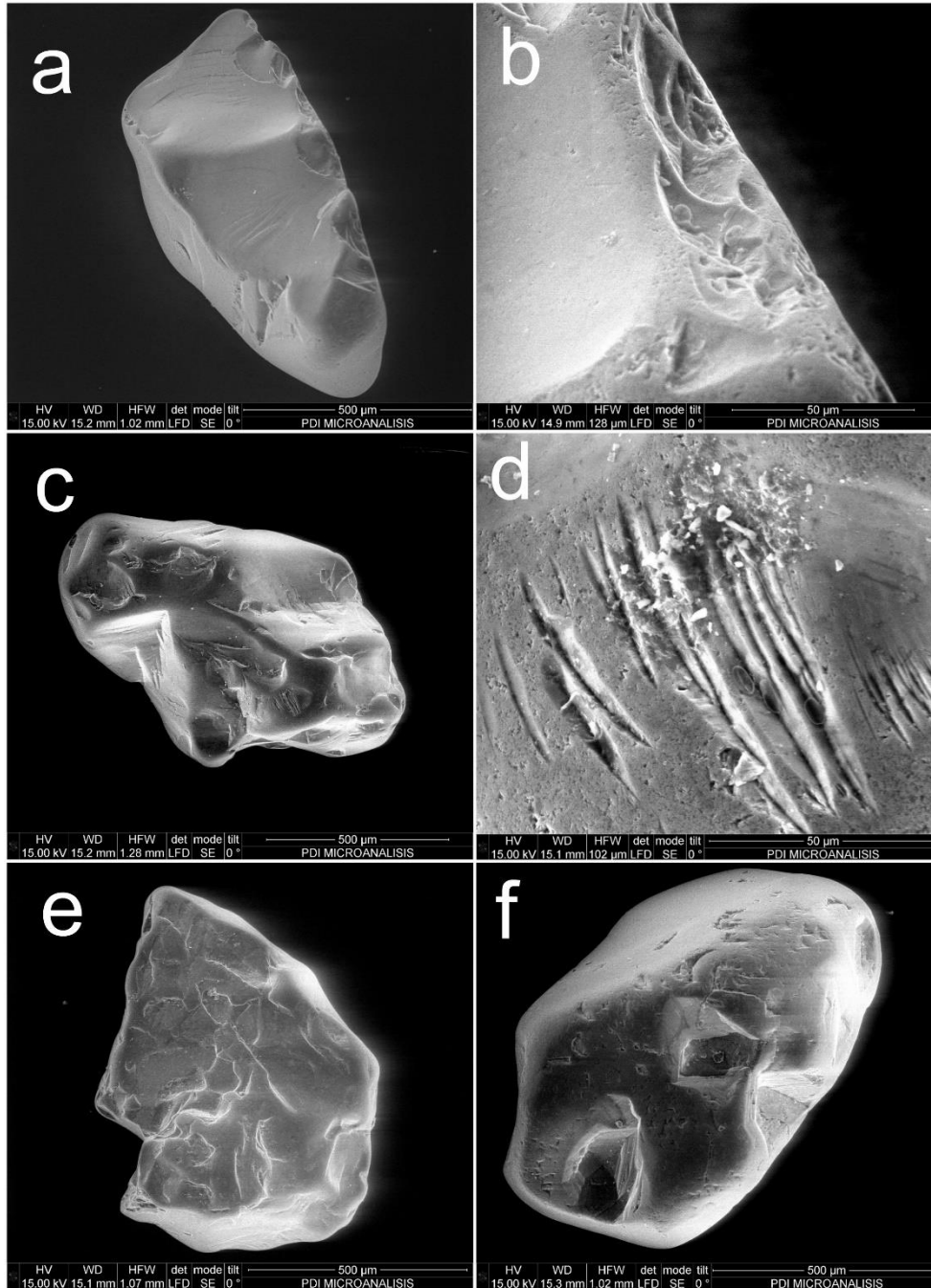
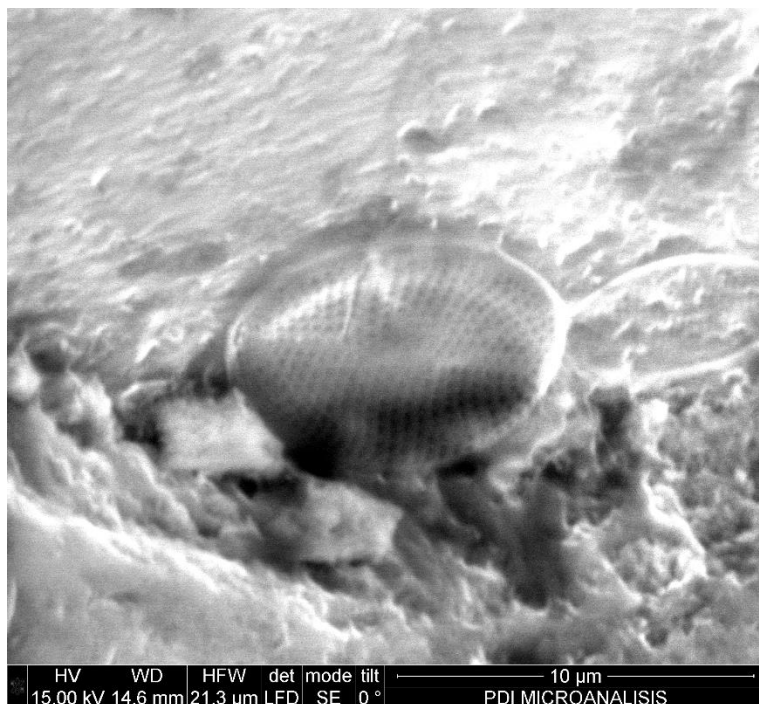


Figura 3.17: Una de las diatomeas observada en la muestra B.



3.4.3 Comparación muestra A y B

Finalmente, en la Tabla 3.8, se encuentra la leyenda con las texturas encontradas y la Figura 3.18, muestra el porcentaje de ocurrencia de las micro texturas en la muestra A y B. Se puede observar que en ambos casos predominan las marcas en forma de V, pero al analizar las imágenes en detalle se puede observar que la frecuencia en que estas se presentan sobre la superficie de los granos es mucho mayor en la muestra B. En la muestra A es mucho más difícil visualizar estas marcas en forma de V, al menos aquellas de origen mecánico. Otra diferencia importante es la ausencia de diatomeas en A, ya que estas se asocian a ambientes sub-acuosos. En las discusiones se analizará más en detalle la similitud entre ambas muestras en relación a las microtexturas observadas.

Número	Micro texturas
1	Elongado
2	Subelongado
3	Esférico

4	Bulboso
5	Borde angular
6	Borde sub angular
7	Borde redondeado
8	Borde Sub redondeado
9	Fractura concoidal pequeña (<10um)
10	Fractura concoidal media (<10um)
11	Fractura concoidal grande (<10um)
12	Escalones curvos
13	Escalones rectos
14	Crestas curvas
15	Superficie de clivaje plana
16	Arcos gradados
17	Grietas de percusión con forma de V
18	Pits con forma de V
19	Pits con forma de V orientados
20	Surcos y rasguños curvos/rectos
21	Platos invertidos
22	Marcas de percusión crescénticas
23	Abrasión por fatiga
24	Estriaciones paralelas
25	Planos/platos de fractura
26	Superficies suavizadas
27	Solution pits
28	Películas de sílice
29	Sobre crecimiento cristalino
30	Bajo relieve
31	Relieve medio
32	Relieve alto
33	Depresiones elongadas
34	Partículas adheridas
35	Grietas curvas/circular/poligonal

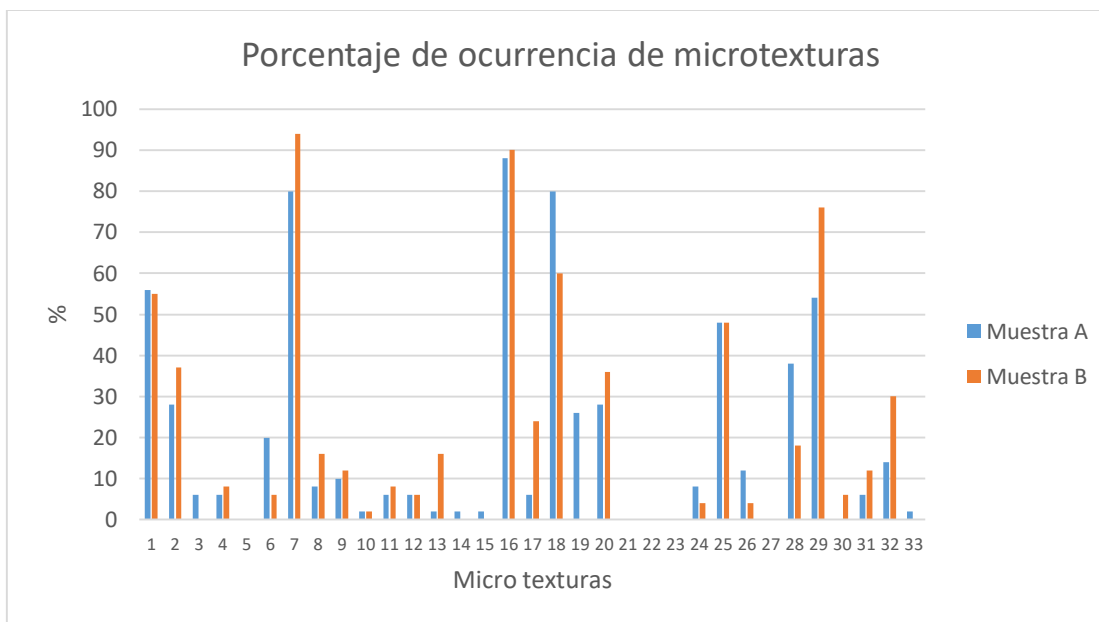
Tabla 3.8: Microtexturas seleccionadas para realizar el análisis de los granos de cuarzo de las muestras A y B.

Micro-texturas	Muestra A	Muestra A (%)	Muestra B	Muestra B (%)
Elongado (e)	h	56	h	56
Sub-Elongado (se)	m	28	m	36
Esférico (s)	-	6	-	-
Bulboso (b)	l	6	l	8

Borde angular	-	0	-	0
Borde sub angular	-	20	-	6
Borde redondeado	h	80	h	94
Fractura concoidal pequeña (<10um)	l	8	l	16
Fractura concoidal media (<10um)	l	10	l	12
Fractura concoidal grande (<10um)	l	2	l	2
Escalones curvos	l	6	l	8
Escalones rectos	l	6	l	6
Crestas curvas	l	2	l	16
Superficie de clivaje plana	-	2	-	0
Arcos gradados	-	2	-	0
Grietas de percusión con forma de V	m/h	88	h	90
Pits con forma de V orientados	l	6	m/h	24
Surcos y rasguños curvos/rectos	m	80	m	60
Platos invertidos	l/m	26		
Marcas de percusión crescénticas	l/m	28	l/m	36
Abrasión por fatiga	-	-	-	-
Estriaciones paralelas	-	-	-	-
Planos/platos de fractura	-	0	-	0
Superficies suavizadas	-	8	-	4
Solution pits	l/m	48	l/m	48
Películas de sílice	l/m	12	l	4
Sobre crecimiento cristalino	-	-	-	0
Bajo relieve	l	38	l	18
Relieve medio	h	54	h	76
Relieve alto	-	0	-	6
Depresiones elongadas	l	6	L	12
Partículas adheridas	l	14	L	30
Grietas curvas/circular/poligonal	-	2	-	0

Tabla 3.9: Frecuencia de abundancia de las micro texturas en la superficie de los granos y su frecuencia de ocurrencia en porcentaje. h: alto, m: medio, l: bajo, -: escaso/ausente o no aplica a la descripción.

Figura 3.18: Gráfico en el que se puede comparar la ocurrencia de micro texturas en ambas muestras. Se observa que estas son bastante similares y que predominan las micro texturas 1,7,16,18,25 y 29.



3.5 Análisis RAMAN

Se seleccionaron 10 granos de cada una de las muestras que fueron elegidas para el análisis SEM, en este caso las muestras A y B. Estos granos fueron analizados a través con un microscopio confocal RAMAN, marca WITec y modelo Alpha 300M+. En la Figura 3.19, se pueden observar los espectros obtenidos para cada muestra. Se compararon los espectros obtenidos con aquellos proporcionados por el Laboratorio de Geología de Lyon para el cuarzo (Figura 3.20), y se pudo observar que los granos estudiados correspondían a cuarzo alfa.

A continuación, se presentan diez espectros RAMAN, pertenecientes a algunos de los granos de cuarzo analizados de las muestras A y B, además de un espectro de referencia.

Figura 3.19: Algunos de los espectros RAMAN que fueron tomados de los granos de las muestras A y B.

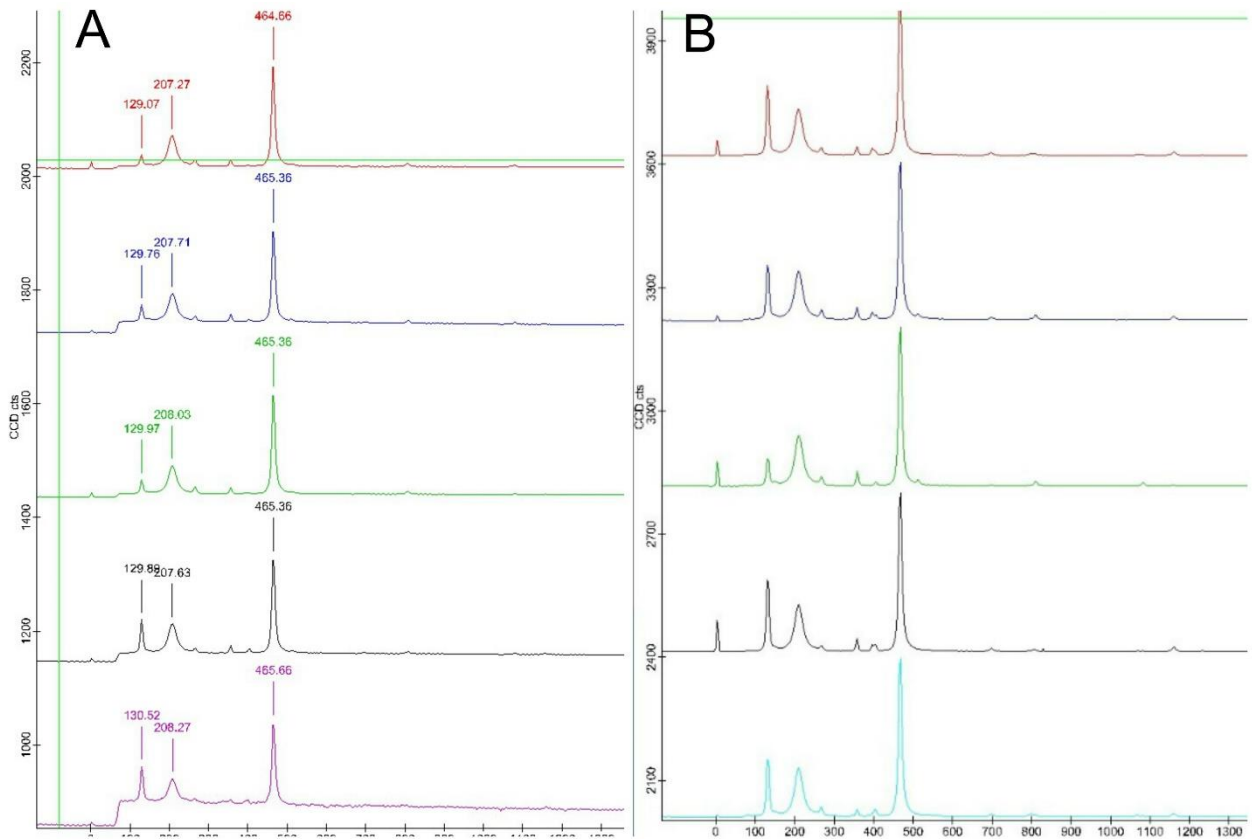


Figura 3.20: Espectro RAMAN referencial para el cuarzo- α obtenido de la base de datos online generada por el Laboratorio de Geología de Lyon.

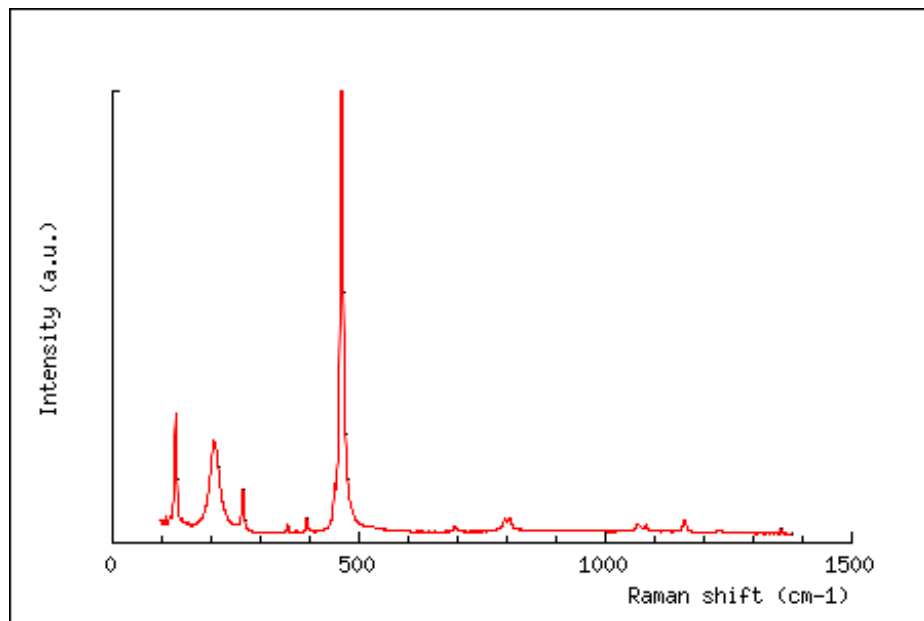
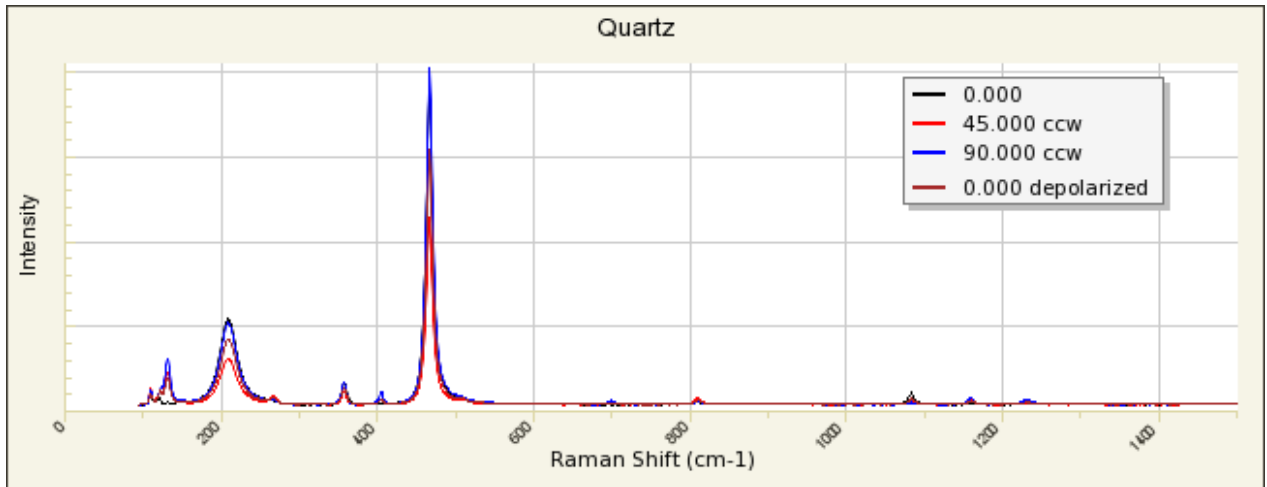
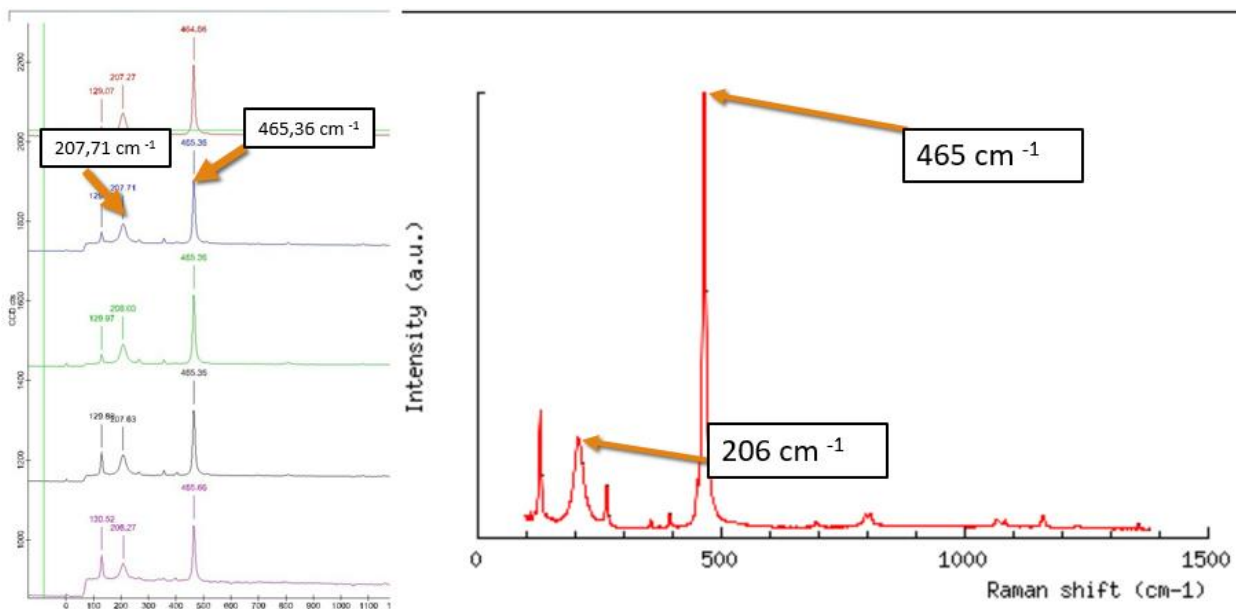


Figura 3.21: Otro espectro referencial para el cuarzo- α obtenido de la página web del proyecto RRUFF, que corresponde a una muestra de cuarzo obtenida en la localidad de Spruce Claim, Washington, USA.



Al comparar los espectros con aquellos de referencia se puede ver que todos los granos analizados presentan dos peaks representativos del cuarzo- α (trigonal), uno de menor intensidad cercano a los 206 cm⁻¹ y el de mayor intensidad en los 465 cm⁻¹(ver Figura 3.22). Con esto se confirma que los granos analizados en el SEM efectivamente eran cuarzo.

Figura 3.22: Comparación entre 5 de los 10 espectros obtenidos a partir de granos de la muestra A, con un espectro de referencia obtenido de la base de datos online generada por el Laboratorio de Geología de Lyon. Se indican los peaks relevantes.



3.6 Estudios actualmente realizados en la PDI relacionados con la geología

Actualmente en la sección de microanálisis del Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones el principal análisis que se realiza es el de residuo de disparo. Sin embargo, también se han hecho estudios que, en parte, conciernen a la geología, como por ejemplo casos de falsificación de joyas, en los que a través del SEM logran visualizar la composición de las distintas capas que presentan, pudiendo identificar si estas solo presentan un recubrimiento de un cierto elemento o si son macizas. Lo mejor de esto es que gracias a las técnicas no destructivas, ya no es necesario dañar la evidencia para poder realizar estudios en ella. Además, la sección de ecología y medio ambiente está muy ligada a estudios de contaminación de suelos, aguas (como ríos y mares), aire, etc. En estos casos un geólogo puede ser de gran utilidad, más aún si está especializado en geoquímica ambiental o en hidrogeología.

Este año 2016 la sección de microanálisis adquirió un equipo de Difracción de Rayos X. La llegada de este equipo abre aún más las posibilidades para la geología aplicada a casos forenses, ya que uno de los estudios que se espera realizar es el análisis de suelos, por lo que la interpretación de los difractogramas puede ser hecha por un geólogo, que

no solo puede aprender la parte técnica de identificar los peaks, si no que más importante aún, entiende de la proveniencia y asociación de minerales en la tierra y por lo tanto tendrá un mejor criterio al momento de identificar los minerales presentes en las muestras y en su posterior interpretación.

4 DISCUSIONES

El caso central de estudio de esta memoria corresponde a un delito en el que mercancía importada desde Hong-Kong hacia Chile (con escala en Miami), fue reemplazada por sacos de arena (Figura 4.1). El objetivo, es poder definir en cuál de estos tres lugares, en los que la especies pudieron se manipuladas, se llevó a cabo el intercambio.

Figura 4.1: Mapa que muestra la trayectoria que siguió la mercancía que fue reemplazada.



De acuerdo a los mapas geológicos de los tres lugares geográficos estudiados, la muestra A, correspondiente a la estafa, provendría con mayor probabilidad de Norteamérica. Al observar un mapa geológico de Chile o Hong-Kong se observa un claro dominio de afloramientos ígneos. En el caso de Chile los afloramientos sedimentarios y metamórficos también aparecen en la costa, pero subordinados en abundancia respectos a los antes mencionados. En Hong Kong se observa algo similar, los afloramientos sedimentarios son de edad paleozoica y se observan en muy pocos lugares. Mientras

que, al analizar la geología de Florida (Figura 4.1), esta es totalmente diferente a la de los otros dos lugares. Predominan las rocas sedimentarias, principalmente calcáreas (calizas y dolomitas), arenas cuarcíferas, limo y arcillas. Las rocas del basamento en Florida son principalmente plutónicas y volcánicas, pero estas prácticamente no afloran en superficie.

Por lo tanto, es de esperar que la mineralogía observada en la muestra A, sea muy diferente a lo observado en las otras muestras, esto debido a la evidente diferencia entre las rocas fuentes de los distintos lugares geográficos. Dado que en la muestra A se observa casi en su totalidad solo granos de cuarzo, se puede inferir que esta provendría de Miami, ya que en otro caso se esperaría encontrar otros minerales además del cuarzo como, por ejemplo, feldespato o biotita. La geología de Miami puede ser revisada en detalle en la colección digital que tiene la Universidad de Florida. En su página web es posible observar el mapa geológico de Florida, columnas estratigráficas con las formaciones de la zona, además de un completo resumen de la historia geológica de Florida. En el caso de Hong Kong, toda esta información se puede obtener de la página web del Servicio Geológico de Hong Kong, específicamente en el Departamento de Desarrollo e Ingeniería Civil del Gobierno.

Otro detalle importante, corresponde el elevado porcentaje de platino encontrado en la muestra A. Descartando una posible contaminación en el laboratorio en el que se realizaron los análisis geoquímicos, ya que la probabilidad de que esto ocurra es prácticamente nula, tomando en consideración que en el equipo de fluorescencia de rayos-X las muestras nunca tienen contacto directo con este, es coherente pensar en una contaminación asociada a alguna actividad antropogénica, ya que ninguna de las zonas geográficas estudiadas presenta estos niveles anómalos de platino en sus depósitos o afloramientos. De esta forma este dato se vuelve muy relevante, ya que, en caso de asociar la muestra a una de las tres áreas, serviría como una especie de trazador en caso de que se hubiese logrado encontrar más sacos con las mismas características de la muestra A. Una opción, es que la muestra haya sido tratada para usos industriales. Los usos más comunes de la arena suelen ser en la industria de la construcción, así como también se utilizan para chorrear partes metálicas, ya sea para suavizar una superficie, darle alguna forma o remover algún contaminante. Este tipo de abrasión se conoce más comúnmente como “sand-blasting”. Por lo tanto, considerando que la muestra A haya sido tratada para algún uso industrial o alterada por alguna acción antropogénica, se debe considerar como opción que el sitio en el que se realizó la estafa pueda haber sido en alguno de los aeropuertos por donde paso la mercancía. Al pensar en esto y comenzar a buscar alguna explicación para el platino, una de las posibilidades es que esta arena, que fue puesta como reemplazo, haya estado en alguna sala en la que se pudiesen encontrar estas partes de los aviones en las que se utiliza el platino como, por ejemplo, termocuplas, boquillas de combustibles, por mencionar algunas o que haya sido utilizada como abrasivo para el tratamiento de algún metal en el mismo aeropuerto. Luego si estas partes por algún motivo desprendieron parte de este platino y estuvieron en contacto con la muestra A, es altamente probable que esta haya sido contaminada.

En el análisis granulométrico llama la atención que en la muestra A hay una serie de tamaños ausentes (los más gruesos), esto se refleja al observar su curva acumulativa, la cual no presenta curva de tracción, lo que es de esperar considerando que son los granos de mayor tamaño los que se transportan por tracción. En arenas industriales, suelen sacarse ciertos tamaños de granos, dependiendo de cuál será su uso, por ejemplo, existen abrasivos en los que se extraen los granos gruesos, así como en la construcción se hace todo lo contrario y se suele dejar las fracciones más gruesas. Las arenas industriales son extraídas de lechos de ríos y de playas principalmente, por lo que no se debe descartar la opción de que la muestra A sea de uso industrial. Comparando los parámetros de la muestra A con las demás, es evidente que la muestra B es la más similar a esta, se podría pensar que al menos el medio de transporte y energía del ambiente del cual provienen es similar. Las principales diferencias se deben a la ausencia de la fracción más gruesa en la muestra A, lo que podría haber generado que el tamaño promedio de grano sea menor, la selección sea mejor y que no haya una curva de tracción. Las otras muestras claramente fueron afectadas de distinta manera por el medio de transporte, esto se puede observar en las diferencias obtenidas en los valores

estadísticos y en las curvas acumulativas. Habría sido ideal haber tenido acceso, por ejemplo, a la colección de arenas de Miami que posee el geólogo Palenik, para de esta forma poder tener una mayor variabilidad de muestras para comparar.

Respecto al análisis de microtexturas de los granos de cuarzo a través de imágenes SEM, es importante considerar que dado que el objetivo de la presente memoria es ver la factibilidad de poder comenzar a desarrollar el campo de la Geología Forense en el país, se trató de hacer todos los estudios de la forma más realista posible, es decir, tomando en cuenta solo los equipos disponibles en el Laboratorio de Criminalística de la Policía de Investigaciones, y el tiempo que puede llegar a tomar cómo máximo un análisis, ya que, dada la cantidad de evidencias que se trabajan en el laboratorio, y sumado a otras actividades administrativas, es poco factible pasar meses trabajando solo con una evidencia. Tampoco se trataron las muestras con químicos, ni ultra sonido, para limpiar los granos, ya que al hacer esto se podría haber eliminado evidencia que podría ser útil para identificar o acotar el posible origen de la muestra. De la misma forma, dado que, el laboratorio no cuenta con el equipo para cubrir los granos en oro o cobre, se decidió trabajar en alto vacío, ya que la idea es ver la factibilidad de hacer estos estudios con los instrumentos que están disponibles y de esta forma analizar si es suficiente con los resultados obtenidos llegar a una conclusión. Dicho lo anterior, con lo que fue posible observar en la muestra A, y comparando con la muestra B que fue la seleccionada a analizar en el SEM ya que era la que presentaba la mayor similitud en cuanto a mineralogía y granulometría, es posible inferir un ambiente de proveniencia para esta muestra, aunque se sugeriría intentar obtener imágenes SEM con aún mejor calidad, así como también habría sido interesante haber analizado con el EDS aquellos cristales cúbicos observados en la muestra A y otras partículas adheridas, para verificar su composición, lo que sería un aporte en la interpretación del origen de las muestras. Dicho esto, a partir de la comparación de las imágenes y de la frecuencia en la que se observaron las microtexturas, se ve que ambas presentan similares características, pero la principal variación se da en qué tan abundantes son en superficie ciertas microtexturas características como por ejemplo las marcas en forma de V. Rasgos de transporte eólico, son prácticamente nulos, lo que predomina es una asociación de microtexturas características de un ambiente sub-acuático. Lo que queda por debatir, al menos en el caso de la muestra A cuyo origen se desconoce, es si esta corresponde efectivamente a un ambiente de playa. Los ambientes eólicos y glacial quedan totalmente descartados ya que no se presentan la asociación de microtexturas que caracteriza a estos dos. Por lo tanto, los ambientes que quedan son el de playa y fluvial. Lo que pone en duda que la muestra A corresponda efectivamente a un ambiente de playa es el hecho de que las marcas de V por ejemplo, que es una de las microtexturas más comunes en este ambiente, no son del todo claras y tampoco son tan abundantes en la superficie del grano. Se pueden mencionar dos procesos, uno que generó las microtexturas asociadas a un ambiente de alta energía y otro posterior relacionado con la apariencia del grano, es decir, que generó el alto redondeamiento de los bordes y el pulido de las microtexturas

generadas por colisiones. Dado que las microtexturas que se habrían generado en un ambiente de alta energía no son lo suficientemente claras, no hay una evidencia que sea clara para poder hacer una separación de estos procesos, lo que llevaría a pensar que los granos más bien sufrieron un transporte prolongado bajo condiciones cambiantes. Esto último se contradice con un ambiente de playa. El otro punto que pone en duda que los granos efectivamente provengan de una playa, o más bien que haya estado en un medio con infiltración de agua, es la ausencia de diatomeas. Pero, si como se mencionó antes, la arena es efectivamente de uso industrial, es muy probable que las diatomeas hayan sido eliminadas al ser tratadas las arenas. En cuanto a los puntos a favor de un ambiente de playa, está el hecho de que la muestra sí presenta la asociación de microtexturas características, aunque no en la abundancia superficial esperada, pero esto en gran parte se puede deber a la calidad de las imágenes, por lo tanto, es posible que, haciendo imágenes con mayor resolución, sí sería posible observar con mayor frecuencia estas microtexturas diagnósticas. Ahora, si además tomamos en cuenta los resultados obtenidos del análisis granulométrico, la muestra A es muy similar a la muestra B, la cual sí se sabe que proviene de un ambiente de playa. Lo que habría sido útil, para poder hacer otra comparación, sería haber comprado una muestra de arena utilizada para “sand-blasting” y observar los granos en el SEM para poder compararla con A, mejor aún habría sido conseguir una muestra de los abrasivos utilizados en el aeropuerto de Florida para este tipo de abrasión.

Respecto a los resultados obtenidos a partir del análisis RAMAN, al comparar los espectros obtenidos, con los referenciales para el cuarzo (Figura 4.2) se puede observar que estos presentan los “peaks” característicos del cuarzo- α . Si se compara con los espectros de los polimorfos del cuarzo (Figura 4.3) resulta evidente que los granos que fueron estudiados corresponden efectivamente a cuarzo- α tanto en la muestra A como en la B. Este estudio ayuda entonces a corroborar a través de otro análisis que los granos seleccionados efectivamente corresponden a granos de cuarzo y que no fueron confundidos con algún otro mineral.

Figura 4.3: Se comparan los espectros de los cuarzos de la muestra A (izquierda) con un espectro de referencia de la Universidad de Lyon (derecha).

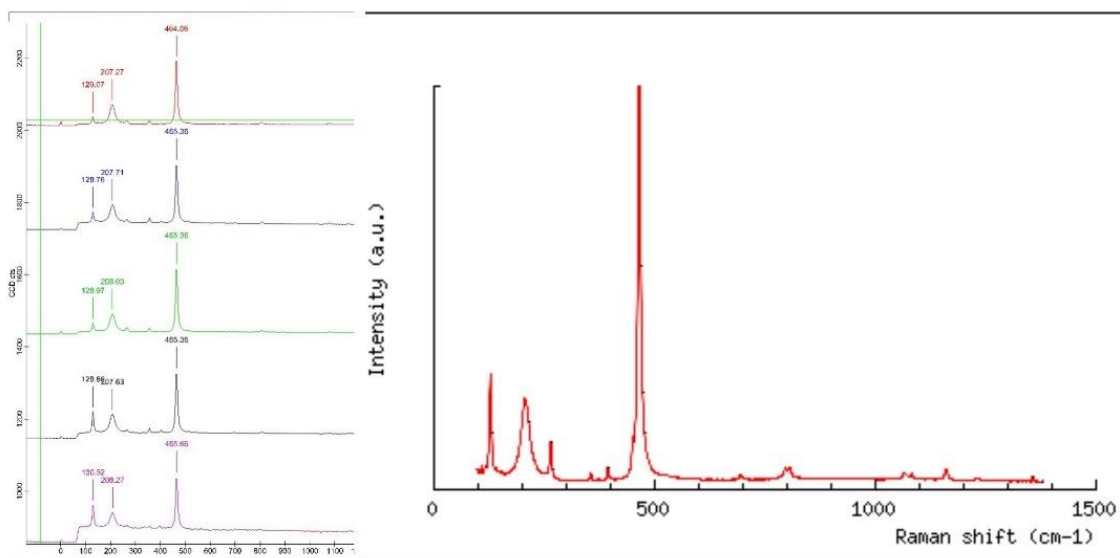
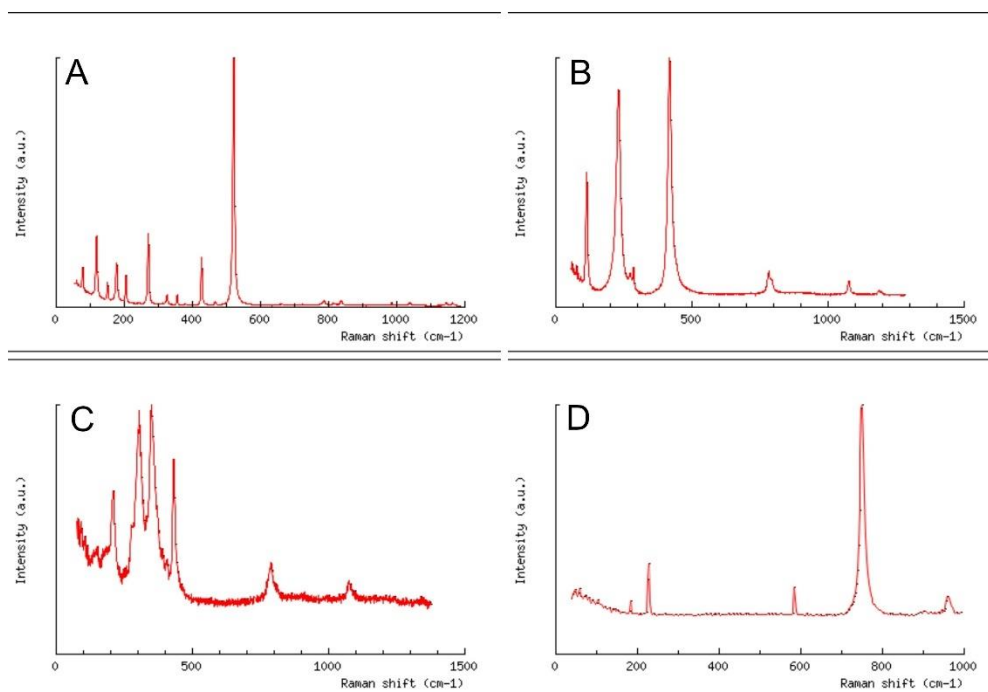


Figura 4.4: Espectros RAMAN de polimorfos del cuarzo (a) coesita, (b) cristobalita, (c) tridimita, (d) stishovita. Estos espectros fueron obtenidos a través de la base de datos online de la Universidad de Lyon.



En cuanto a la idea inicial de generar alguna especie de conexión entre el Departamento de Geología de la Universidad de Chile y el Laboratorio de Criminalística de la PDI, si bien, ya con el hecho de desarrollar parte de esta memoria en ese lugar y explicar cómo un geólogo podría ser efectivamente un aporte ya se genera un vínculo, para poder trabajar directamente en el laboratorio y poder analizar evidencia, es necesario postular como profesional, para luego de un año de preparación ser nombrado perito y de esta forma pasar a formar parte del equipo de trabajo del laboratorio.

5 CONCLUSIONES

Uno de los objetivos de esta memoria era poder determinar dónde se había generado el fraude, con todos los resultados obtenidos en esta memoria, es bastante evidente que la muestra A (estafa) no tiene su origen en Chile. La muestra A no presenta la mineralogía esperada de una muestra proveniente de las costas de Chile, lo que es corroborado por los análisis geoquímicos. Su granulometría tampoco se asemeja, al menos a las muestras de playa de Chile, para un mayor rango de comparación se pueden observar los análisis granulométricos hechos por Verdejo (1960) a lo largo de la costa chilena. La probabilidad de que la muestra A provenga de Hong Kong también es baja si se considera la información geológica de las costas de Hong Kong. Se puede ver que esta es similar a la de las costas chilenas y por lo tanto se esperaría encontrar otra asociación mineralógica en la muestra A. Finalmente, al analizar el marco geológico de la costa de Florida, este es muy distinto al de las otras costas antes mencionadas. Los afloramientos que conforman la costa de Florida son una roca fuente más probable para el tipo de arena analizada en la muestra A.

En cuanto a las micro texturas en los granos de cuarzo, estas son similares a las observadas en B con la única diferencia de que la frecuencia en superficie es menor y que son menos evidentes en las imágenes, lo que se podría adjudicar a la calidad de estas. Por lo que, para una mayor certeza, se recomendaría intentar mejorar la calidad de estas imágenes. Independiente de lo anterior, queda claro al menos que Chile queda excluido como posible origen de las arenas de la muestra A, esto debido a las claras diferencias observadas en mineralogía, geoquímica y granulometría. Al tener Hong-Kong una historia geológica muy diferente a la de las costas de Miami, es también posible excluir esta región por los mismos criterios mencionados para Chile. Mientras que la muestra B es efectivamente muy similar a la muestra A, en prácticamente todos los análisis realizados, por lo tanto, el origen más probable de las arenas es al menos en la costa de Florida. Es importante recordar que cuando se hace un análisis de material

geológico, más que buscar que una muestra sea idéntica a otra, es conveniente intentar identificar aquellas que son diferentes e ir excluyendo, ya que es imposible que dos muestras de arena sean exactamente iguales, siempre van a presentar variaciones. Y obviamente de haber podría tener acceso a los abrasivos que son utilizados en los aeropuertos, se podría haber llegado a una conclusión aún más certera.

Respecto al posible desarrollo de este campo en Chile, este es totalmente factible, ya que los equipos necesarios para hacer los análisis están disponibles y los profesionales también. La única dificultad puede radicar en las posibilidades de ingresar a alguno de los laboratorios que trabajan haciendo análisis en las distintas evidencias, ya que es imposible el desarrollo de este campo si no es en conjunto con las instituciones de justicia del país. Para poder empezar a poner en práctica en casos reales el uso de la evidencia geológica es importante poder empezar a establecer o buscar si internacionalmente ya existen protocolos para determinados análisis y técnicas de muestreo, ya que para poder presentar una evidencia frente a la corte y que esta tenga peso, es necesario poder demostrar la confiabilidad que tiene el método utilizado y que existen referencias que avalan el análisis. De la misma manera es también importante que las distintas áreas involucradas comiencen a interiorizarse con este tema, como también es necesario que el geólogo entienda y estudie cómo se deben presentar las evidencias, ya sea en el informe que entregue, como frente a un jurado. Esto último se logra aprender dentro del mismo laboratorio al momento de ingresar como profesional y empezar a prepararse para ser nombrado perito. También se recomienda que los profesionales interesados en esta área tengan la suficiente experiencia, ya que poniendo como ejemplo el análisis de micro texturas de cuarzo a través del SEM, es evidente que para una persona que lleva trabajando un tiempo prolongado en esa área, le será mucho más fácil poder identificar las micro texturas e incluso definir relaciones de corte en ellas, que alguien que recién se está interiorizando en ese tema. También, será mucho más eficiente al momento de buscar los mejores ajustes en el SEM para poder obtener imágenes con una excelente calidad.

Por lo tanto, se recomienda para futuros estudios analizar la posibilidad de poder obtener imágenes con mejor resolución para lograr observar con mayor claridad las microtexturas en los granos de cuarzo. También se sugiere hacer una selección de arenas industriales que tengan características similares las muestras analizadas y que sean de uso común en aeropuertos para poder comparar y verificar que las arenas contenidas en los sacos (muestra A-estafa) son efectivamente arenas industriales. Mejor aún sería poder obtener muestras directamente de los aeropuertos por los que pasó la muestra A. Por último, sería de gran utilidad poder desarrollar una estadística para el análisis de microtexturas en granos de cuarzo y de esta forma dar más validez a este tipo de estudio, por ejemplo, a través de un análisis multivariante.

En un principio se tenía la idea de poder analizar casos reales en Chile en que la geología podría haber sido un aporte, pero es claro que las evidencias no pueden ser manipuladas por nadie externo al laboratorio, por lo que este tema no se abordó.

Finalmente, es evidente el aporte que puede ser el correcto análisis e interpretación del material geológico para ser usado como evidencia en diversos delitos. Un buen geólogo con conocimiento de las variadas técnicas instrumentales con las que se cuenta hoy en día puede obtener importantes conclusiones que pueden ser una contribución a las otras evidencias de un delito, como quedó evidenciado en el caso que fue estudiado en la presente memoria. De esta manera se puede abrir un nuevo campo de estudio en Chile, que no solo genera un aporte al desarrollo de la Geología en otras áreas poco exploradas, sino que además al País.

6 BIBLIOGRAFÍA

Handbook of Raman Spectra. Espectros RAMAN de referencia del Laboratorio de Geología de Lyon [en línea] <<https://goo.gl/7yzTMe>> [consulta: 06 enero 2017]

RRUFF Project website. Database of RAMAN spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals [en línea] <<http://rruff.info/>> [consulta: 06 enero 2017]

Lane Ed. 1994. Florida's geological history and geological resources. Florida Geological Survey [en línea] Tallahassee, Florida. <<http://ufdc.ufl.edu//UF00000124/00001>> [consulta: 06 enero 2017]

Mapa Geológico de Hong Kong. 2006. Servicio Geológico de Hong Kong [en línea] <http://www.cedd.gov.hk/eng/about/organisation/geo_map_2.html> [consulta: 06 enero 2017]

Atlas de suelos de América Latina y el Caribe 2014. Comisión Europea [en línea] Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxembourg <<https://goo.gl/9OIcoS>> [consulta: 06 enero 2017]

Wentworth C. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30: 377-394.

Verdejo C. 1960. Estudio sedimentológico de arenas de playa en la costa de Chile central, entre las provincias de Santiago y Valparaíso. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago.

Krinsley D., Donahue J. 1968. Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *Geological Society of America Bulletin* 79: 743-748.

Krinsley D., Doornkamp J.C. 1973. *Atlas of Quartz Sand Surface Textures*. Cambridge 91 pp.

Folk R. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas 190 pp.

Higgs R. 1979. Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins. *Journal of Sedimentary Petrology* 49(2): 599-610.

Davis R. 1985. *Coastal Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, New York.

Krinsley D., Trusty P. 1985. Environmental Interpretation of quartz grain surface textures. *Department of Geology, Arizona State University* 148: 213-229.

Abd-Alla M. A. A. 1991. Surface textures of quartz grains from recent sedimentary environments along the Mediterranean Coast, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 13(3): 367-375.

Kingma K., Hemley R. 1994. Raman spectroscopic study of microcrystalline silica. *American Mineralogist* 79: 269-273.

Mahaney W.C. 2002. *Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications*. New York 237 pp.

Pye K. 2004. Forensic examination of rocks, sediments, soils and dusts using scanning electron microscopy and X-ray chemical microanalysis. *Forensic Geoscience: Principals, Techniques and Applications*. Geological Society of London 232: 103-122.

Pye K. 2005. Forensic Geology. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Encyclopedia of Geology* 261-264.

Bull P.A., Morgan R.M. 2006. Sediment fingerprints: A forensic technique using quartz sand grains. *Oxford University Centre of the Environment, University of Oxford* 46(2): 107-124.

Rawlins B., Kemp S., Hodgkinson E., Riding J., Vane C., Poulton C., Freeborough K. 2006. Potential and pitfalls in establishing the provenance of earth-related samples in forensic investigations. *Journal of Forensic Science*. 51(4): 832-845.

Morgan R.M., Bull P.A. 2007. Forensic Geoscience and Crime Detection: Identification, Interpretation and Presentation in Forensic Geoscience. Oxford University Centre for the Environment, University of Oxford.

Palenik S. 2007. Heavy minerals in forensic science. *Developments in Sedimentology* 58: 937-961.

Echlin P. 2009. Handbook of sample preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Springer 332 pp.

Madhavaraju J., García J., Hussain S., Pachaveedu S. 2009. Microtextures on quartz grains in the beach sediments of Puerto Peñasco and Bahía Kino, Gulf of California, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(2): 367-379.

Deane S. 2010. Quartz grain microtextures and sediment provenance: Using scanning electron microscopy to characterize tropical highland sediments from Costa Rica and the Dominican Republic. Thesis presented for the Master of Science Degree. University of Tennessee. Knoxville, 137 pp.

Murray, R.C. 2011. Evidence from the Earth, 2nd ed. Mountain Press, Missoula, Montana 200 pp.

Le Roux J.P. 2012. Apuntes de sedimentología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Fitzpatrick R.W. 2013. Encyclopedia of Forensic Sciences, Second Edition 206-212.

Sagripanti, G., Villalba, D., Aguilera, D., Giaccardi, A. 2013. Geología Forense: Métodos aplicados en la búsqueda de desaparecidos en la región central de Argentina. Revista de la Sociedad Geológica Argentina 70: 150-160.

Sepúlveda, S. 2013. Condiciones de sedimentación de secuencias sedimentarias holocenas en la isla Robinson Crusoe y sus implicancias en el alzamiento debido al crecimiento del hot-spot. Memoria de Título. Universidad de Chile. Santiago 222 pp.

Vos, K. 2014. Surface Textural Analysis of Quartz Grains by Scanning Electron Microscopy (SEM): From Simple Preparation to Environmental Interpretation. Earth Science Reviews 128: 93-104

Molina, C. 2014. Aportes de la Geología Forense en la investigación criminal en Colombia, Geología Colombiana. 37: 171-178.

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp.

Dawson L., Mayes R. 2015. Soil as Physical Evidence in Forensic Investigations. Introduction to Environmental Forensics. 12:457-481