



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN
SEDIMENTOS DE LA LAGUNA EL CONEJO DEL MUNICIPIO DE ALTAMIRA,
TAMAULIPAS”**

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta
Ing. Jonathan Soriano Mar
G06071407

Director de tesis
Dr. Ulises Páramo García

Co-director de tesis
Dr. Juan Javier González Barbosa



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Cd. Madero, Tam. **11 de junio de 2021**

OFICIO No. : U.063/21
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN DE TESIS

C. JONATHAN SORIANO MAR
No. DE CONTROL G06071407
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE LA LAGUNA EL CONEJO DEL MUNICIPIO DE ALTAMIRA, TAMAULIPAS”

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	ULISES PÁRAMO GARCÍA
SECRETARIO:	DR.	JUAN JAVIER GONZÁLEZ BARBOSA
VOCAL:	DR.	LUCIANO AGUILERA VÁZQUEZ
SUPLENTE:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	ULISES PÁRAMO GARCÍA
CO-DIRECTOR:	DR.	JUAN JAVIER GONZÁLEZ BARBOSA

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por mi patria y por mi bien"

MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
MACG 'mdcoa'



Declaración de Originalidad

Por este medio declaro que este documento de tesis titulado "DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE LA LAGUNA EL CONEJO DEL MUNICIPIO DE ALTAMIRA TAMAULIPAS" es producto de mi trabajo original y que no infringe los derechos de terceros, tales como derechos de publicación, derechos de autor, patentes y similares.

Además, declaro que en las citas textuales que he incluido en el presente trabajo, así como los resúmenes que he realizado de publicaciones ajenas, se indica explícitamente los datos de los autores y publicaciones.

En caso de incurrir en infracciones de los derechos de terceros derivados de este documento de tesis, acepto la responsabilidad exclusiva de dicha infracción, relevando de ésta a mi Director y Codirector de tesis, así como al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero y a sus autoridades.

Para constancia de lo anteriormente expuesto, se firma esta declaración a los 11 días, del mes de junio, del año 2021, en la ciudad de Altamira, Tamaulipas.



Jonathan Soriano Mar

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico:

A Dios por darme la vida y demostrarme que siempre está conmigo brindándome salud.

A mi esposa Ivette, por ser paciente, amorosa y mi principal motivación.

A mis padres Gilberto y Natividad, por su amor e incondicional apoyo en todo lo que me propongo.

A mis hermanos Gilberto y Nadia, por ser un gran ejemplo de perseverancia.

Sin todos ustedes no habría logrado esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis Dr. Ulises Páramo García, por compartir sus conocimientos y enseñanzas con paciencia, siempre dispuesto a apoyarme en todas las etapas de este proyecto, gracias por permitirme trabajar con usted.

Al Dr. Juan Javier González Barbosa, gracias por su orientación y disposición en sus asesorías, sus consejos y apoyo para la realización de este trabajo.

Al Dr. Luciano Aguilera Vázquez, por sus enseñanzas en el aula y sus instrucciones que contribuyeron a que el presente escrito se realizara de la mejor manera posible.

Al Dr. Pedro Martín García Vite, gracias por haberme apoyado en la revisión y correcciones del presente trabajo.

A la Dra. María de Lourdes Guevara Franco, por su asesoría en los avances semestrales y apoyo con el contacto para el equipo de tamizado.

Al Laboratorio de Ingeniería Química – Pesados, del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero por apoyarme con el equipo de tamizado.

Al Dr. Ysmael Verde Gómez y al Laboratorio de Investigación en Materiales para Energía y Medio Ambiente del TECNM/Campus Cancún por apoyarme con los análisis SEM-EDX.

Al Centro de Estudios Tecnológicos del Mar N° 9, por su apoyo con el préstamo de la herramienta para el muestreo de sedimentos durante el desarrollo del presente trabajo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de realizar este proyecto de investigación otorgándome la beca con número: 961796.

Por último, quiero agradecer a mis compañeros de generación Erick y Alberto; así como a mis padres y hermanos, por apoyarme en los momentos de dificultad. En especial, agradezco a mi esposa Ivette quien siempre estuvo a mi lado para motivarme.

Muchas gracias a todos.

Determinación del nivel de contaminación por metales pesados en sedimentos de la laguna El Conejo del municipio de Altamira Tamaulipas.

Jonathan Soriano Mar

Resumen

Debido al creciente aumento de los procesos industriales, y a la falta de regulaciones ambientales adecuadas para las descargas de los residuos generados de dichos procesos, la contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados va en crecimiento y no se le da la importancia que requiere. En el Estado de Tamaulipas se encuentra una gran cantidad de cuerpos de agua que se localizan en las cercanías de diversas industrias, como es el caso de la Laguna del Conejo, localizada en el kilómetro 4.8 del Boulevard de los Ríos en el municipio de Altamira Tamaulipas, la cual podría estar sujeta a las descargas de algún tipo de contaminante proveniente de los procesos industriales. Por lo anterior, se busca establecer un estudio que determine, en primera instancia, el tipo de sedimento presente en el cuerpo lagunar, comenzando con la extracción de muestras y su transporte al laboratorio para la realización de las pruebas de caracterización granulométrica, según las normas aplicables (NMX-AA-132-SCFI-2016). La determinación granulométrica del tipo de sedimento se realizará bajo los lineamientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual se encuentra comprendido en la norma ASTM D2487-17, además se determinará el pH a cada muestra de sedimento siguiendo la norma ASTM D 4972-01 así como la conductividad presente, con el objetivo de identificar y asociar la presencia de especies iónicas con los resultados de las pruebas de potencial de hidrógeno, conductividad y granulometría. Para la identificación del tamaño de grano de los suelos se realizó una Microscopía electrónica de barrido (SEM) y para la cuantificación de los metales pesados y otros componentes se utilizó la Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Con la información recabada de la clasificación sedimentaria se obtuvo un conjunto de datos que fueron analizados con una herramienta de aprendizaje automatizado con el fin de asociar patrones con las características de los sedimentos y permitiera identificar algún fenómeno característico del cuerpo lagunar.

Determination of the contamination level by heavy metals in sediments of the El Conejo lagoon in Altamira, Tamaulipas.

Jonathan Soriano Mar

Abstract

Due to the increasing growth of industrial processes, and the lack of adequate environmental regulations for the discharges of the waste generated from said processes, resulting in contaminated water bodies by heavy metals and important environmental implications. In the State of Tamaulipas there are many bodies of water nearby several industry plants, such as the Laguna del Conejo, located at kilometer 4.8 of Boulevard de los Ríos in the municipality of Altamira Tamaulipas, which could be subject to discharges of some type of pollutant from industrial processes. Therefore, it seeks to establish a study that determines, in the first instance, the type of sediment present in the lagoon body, starting with the extraction of samples and their transport to the laboratory for the performance of the granulometric characterization tests, according to the standards (NMX-AA-SCFI-2016). The granulometric determination of the type of sediment will be carried out under the guidelines of the Unified Soil Classification System (SUCS), which is included in the ASTM D2487-17 standard, in addition, the pH of each sediment sample will be determined following the ASTM D 4972-01 standard as well as the conductivity, with the objective of associating the presence of ionic species with the results of the tests of hydrogen potential, conductivity and particle size. For the identification of the grain size of soils, a Scanning Electron Microscopy (SEM) was performed and for the quantification of heavy metals and other components, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) was used. With the information collected from the sedimentary classification, a set of data was obtained that was analyzed with an automated learning tool to associate patterns with the characteristics of the sediments and to identify some characteristic phenomenon of the lagoon body.

Índice General

Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Índice Tablas.....	XII
Índice de Figuras.....	XIII
Nomenclatura.....	XV
1 Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación del estudio.....	4
1.4 Hipótesis.....	5
2 Antecedentes/Marco Teórico.....	6
2.1 Metales pesados.....	6
2.2 Contaminación del agua.....	12
2.3 Contaminación del suelo por metales pesados.....	12
2.4 Sedimentos.....	13
2.5 Ambientes Sedimentarios.....	14
2.5.1 Ambiente Continental.....	14
2.5.2 Ambiente Marino.....	15
2.5.3 Ambiente de transición o costeros.....	16

2.6	Técnicas para la determinación del tamaño de partículas	16
2.6.1	Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).....	17
2.7	Data mining para el análisis de datos.....	18
3	Metodología.....	19
3.1	Identificación y delimitación del área de estudio.....	19
3.2	Toma de muestras.	20
3.3	Secado de muestras.	22
3.4	Determinación de potencial de Hidrógeno (pH) y conductividad.	23
3.5	Determinación granulométrica.....	24
3.5.1	Coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura.	25
3.5.2	Clasificación de suelos de grano grueso.	25
3.5.3	Clasificación de suelos de grano fino.	27
3.5.4	Determinación de los Límites de Consistencia.....	30
3.5.5	Criterios de clasificación de suelos bajo la norma ASTM D2488.....	30
3.6	Microscopia electrónica de barrido – Espectroscopía de Rayos X de energía dispersa.	32
3.7	Normas aplicables	33
4	Análisis y resultados	35

4.1	Identificación y delimitación del área de estudio.....	35
4.2	Toma de muestras.	36
4.3	Secado de las muestras.....	39
4.4	Determinación del pH en sedimentos.	41
4.5	Determinación de la conductividad en sedimentos.....	42
4.6	Determinación granulométrica.....	50
4.7	Microscopía electrónica de barrido y Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva.	57
4.8	Uso de técnicas de aprendizaje automático para el análisis de datos.....	66
4.8.1	Muestras tomadas en la temporada estacional de primavera.....	68
4.8.2	Muestras tomadas en la temporada estacional de verano.	68
4.8.3	Muestras tomadas en la temporada estacional de otoño.....	69
4.8.4	Muestras tomadas en las temporadas estacionales de primavera, verano y otoño.....	70
5	Conclusiones y recomendaciones	72
	Bibliografía	74

Índice Tablas

Tabla 3.2.1 Material para la toma de muestras.	20
Tabla 3.2.2 Cantidad de muestras para el muestreo exploratorio.	20
Tabla 3.3.1 Material para secado de muestras.	22
Tabla 3.4.1 Material pH y conductividad.	23
Tabla 3.5.1 Material para granulometría.....	25
Tabla 3.5.2 Criterios para establecer la dureza en estado seco.	31
Tabla 3.5.3 Criterios para establecer la dilatancia.	31
Tabla 3.5.4 Criterios para establecer la tenacidad.	32
Tabla 3.5.5 Identificación de suelos inorgánicos de grano fino por método manual-visual.	32
Tabla 4.2.2 Coordenadas de los puntos de muestreo.	38
Tabla 4.3.1 Pesos secos de los tres muestreos.	39
Tabla 4.4.1 Determinación del pH en sedimentos de los tres muestreos.....	41
Tabla 4.5.1 Valores de conductividad de los tres muestreos.	43
Tabla 4.5.2 Salinidad de un suelo de acuerdo con su conductividad electrica.	44
Tabla 4.5.3 Datos estadísticos del pH y la conductividad.	45
Tabla 4.5.4 pH y conductividad por secciones de muestra sedimentaria (M3).	47
Tabla 4.6.1 Porcentaje granulométrico y clasificación textural de los tres muestreos.	50
Tabla 4.6.2 Coeficientes de uniformidad y curvatura de los tres muestreos.	52
Tabla 4.6.3 Tipo de suelo correspondiente a los sedimentos del primer muestreo.	53
Tabla 4.6.4 Clasificación sedimentaria correspondiente al segundo muestreo.	54
Tabla 4.6.5 Clasificación sedimentaria correspondiente al tercer muestreo.....	55
Tabla 4.7.1 Componentes elementales de la muestra #4 del EDS.....	64
Tabla 4.7.2 Componentes elementales de la muestra #8 del EDS.....	65
Tabla 4.7.3 Límites máximos permisibles de metales en sedimentos.	65

Índice de Figuras

Figura 3.1.1 Área de estudio: Laguna El Conejo.....	19
Figura 3.2.1 Draga tipo Ekman con lazo y plomada.	22
Figura 3.3.1 Secado de muestras	23
Figura 3.4.1 a) Medidor de pH y b) conductímetro portátil.	24
Figura 3.5.1 Curva granulométrica con coeficientes de uniformidad y curvatura.	26
Figura 3.5.2 Carta de plasticidad de Casagrande.....	29
Figura 3.5.3 Equipo empleado para determinación granulométrica. a) Tamices #10 (2 mm.), #18 (1 mm.), #80 (0.180 mm.), #200 (0.075 mm.) y fondo de tamices y b) Vibrador mecánico para granulometría del Laboratorio de Ingeniería Química – Pesados, del ITCM.....	29
Figura 4.1.1 Extensión de la laguna El Conejo.	35
Figura 4.2.1 Prototipo de muestreo vertical.....	36
Figura 4.2.2 Zona de muestreo: a) y b) Localización geográfica de los 15 puntos del primer muestreo, c) Localización geográfica de los 39 puntos del segundo y tercer muestreo, d) Centro de Investigación en Petroquímica del ITCM.	37
Figura 4.3.1 Determinación de los pesos secos de las muestras de sedimentos.	40
Figura 4.5.1 Conductividad en sedimentos de los tres muestreos.	44
Figura 4.5.2 Gráfica de pH y conductividad M1.	45
Figura 4.5.3 Gráfica de pH y conductividad M2.	46
Figura 4.5.4 Gráfica de pH y conductividad M3.	46
Figura 4.5.5 Gráfica de pH por secciones del tercer muestreo.	49
Figura 4.5.6 Gráfica de conductividad por secciones del tercer muestreo.	49
Figura 4.6.1 Curva granulométrica.	51
Figura 4.7.1 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #10 de abertura de 2 mm. ..	57
Figura 4.7.2 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #18 de abertura de 1 mm. ..	58
Figura 4.7.3 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #40 de abertura de 0.425 mm.....	58
Figura 4.7.4 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #80 de abertura de 0.180 mm.....	59

Figura 4.7.5 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #140 de abertura de 0.106 mm...	59
Figura 4.7.6 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #200 de abertura de 0.075 mm...	60
Figura 4.7.7 SEM de la muestra #4, correspondiente al recipiente de fondo de los tamices, tamaños < 0.075 mm.....	60
Figura 4.7.8 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #10 de abertura de 2mm. ...	61
Figura 4.7.9 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #18 de abertura de 1mm. ...	61
Figura 4.7.10 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #40 de abertura de 0.425 mm...	62
Figura 4.7.11 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #80 de abertura de 0.180 mm...	62
Figura 4.7.12 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #140 de abertura de 0.106 mm..	63
Figura 4.7.13 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #200 de abertura de 0.075 mm..	63
Figura 4.8.1 Datos de muestreo de primavera de la laguna El Conejo.....	68
Figura 4.8.2 Datos de muestreo de verano de la laguna El Conejo.	69
Figura 4.8.3 Datos de muestreo de otoño de la laguna El Conejo.....	70
Figura 4.8.4 Datos de muestreo de primavera, verano y otoño_1 de la laguna El Conejo..	71

Nomenclatura

SEM	Microscopía electrónica de barrido.
EDS	Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva.
LMP	Límites máximos permisibles.
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos.
C_u	Coficiente de uniformidad del suelo.
C_c	Coficiente de curvatura del suelo.
ASTM	Sociedad estadounidense para pruebas y materiales.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
CEQG	Guía Canadiense de Calidad Ambiental.
EPA	Agencia de protección ambiental de Estados Unidos.
N.A.	No Aplica.
Ret.	Retenidos.
D_{60}	Diámetro de partícula correspondiente al 60% del material que pasa en la curva granulométrica.
D_{30}	Diámetro de partícula correspondiente al 30% del material que pasa en la curva granulométrica.
D_{10}	Diámetro de partícula correspondiente al 10% del material que pasa en la curva granulométrica.
LL	Límite líquido.
IP	Índice de plasticidad.
SP	Arena mal graduada.
SW	Arena bien graduada.
SM	Arena limosa.
CL	Arcilla de baja plasticidad.
NOM	Norma Oficial Mexicana
CEQG	Guías de Calidad Ambiental Canadiense (Canadian Environmental Quality Guidelines)
ISQG	Guía provisional de calidad del sedimento (Interim Sediment Quality Guidelines)
PEL	Nivel de efecto probable (Probable Effect Level)
NOAA	Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (National Oceanic and Atmospheric Administration)

1 Introducción

Los metales pesados forman parte de los constituyentes de la corteza terrestre, de las rocas, suelos y sedimentos. Con el paso de los años, su concentración natural en estos medios se ha ido modificando, debido a su recurrente utilización en procesos industriales, de servicios o de transformación, así como en las actividades antropogénicas [1].

En la zona costera del pacífico, con el fin de evaluar la presencia de metales pesados en el agua de mar, se realizó un estudio en donde se tomaron muestras a lo largo de un año, en las cuatro estaciones para determinar algunas variables que pudieran indicar la presencia de dichos metales, encontrando como resultado bajas concentraciones de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc [2].

Además, se han encontrado altas concentraciones de metales pesados como el plomo, níquel, cadmio y manganeso en los suelos y en la calidad del agua utilizada para riego agrícola, impactando en gran medida a la diversidad de cultivos de consumo humano [3].

En el estado de Puebla y Veracruz, también se han encontrado estudios sobre los niveles de concentración de metales pesados en el agua para uso agrícola, pero sus resultados indicaron una baja concentración de metales en el agua para riego y de uso urbano determinando que el mayor riesgo está en las descargas de aguas residuales hacia los ríos las cuales sobrepasan los límites permitidos de cadmio, mercurio y plomo [4].

En la zona costera del Golfo de México se han estudiado los niveles de contaminación de algunas lagunas del sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, encontrando concentraciones anormales de metales pesados debido a diversos tipos de contaminación, ejemplos de ello son las descargas municipales [5] y las descargas procedentes de las refinerías en donde se han podido encontrar altas concentraciones de metales pesados como el Vanadio, Cromo, Hierro, Níquel, Zinc y Plomo en aguas y sedimentos a diversas profundidades [6].

Así mismo, la industria minera es una gran fuente de contaminación por metales pesados, ya que al extraer los minerales de las rocas se generan disturbios medioambientales, y suelos con limitaciones químicas y biológicas para el desarrollo de la vegetación, así como los respectivos riesgos a la salud, algunos de los metales que se encuentran son el plomo, cadmio, zinc y arsénico a diversas distancias y profundidades [7], [8].

Existen diversas técnicas de remediación para la contaminación por metales pesados, éstas se clasifican como convencionales y no convencionales, las técnicas convencionales buscan limitar la disponibilidad y movilidad de los metales pero no disminuyen el nivel de toxicidad y volumen de los metales [9] mientras que las no convencionales se fundamentan en las técnicas convencionales pero éstas buscan ser más eficientes en cuanto a tiempos de remoción [10] un ejemplo de estas últimas técnicas es la fitorremediación, en donde algunas plantas al entrar en contacto con los metales pesados reaccionan fisiológicamente permitiendo excluir, indicar o acumular dichos metales en sus tejidos, ayudando a remediar el medio en donde se encuentran [11].

Otra técnica no convencional utilizada en la remediación de suelos es la electrorremediación la cual se fundamenta en la generación de un campo eléctrico en el suelo por la aplicación de una corriente directa [12], los mecanismos de movilización pueden ser electro osmosis o electroforesis [13] obteniendo beneficios en cuanto a la migración puntualizada de los metales pesados en sedimentos y en aguas del tipo residual [14].

En el municipio de Altamira Tamaulipas se encuentra uno de los 5 puertos industriales más importantes de México, en las cercanías de esta zona se localizan diversos cuerpos lagunares, los cuales pudieran estar sujetos a algún tipo de descarga de algún proceso industrial, una de las lagunas que conforman el conjunto de embalses es la Laguna del Conejo, la cual se ubica pasando el kilómetro 4.8 del Boulevard de los Ríos en este municipio, por ello es importante la realización de un estudio

que determine la caracterización física de los sedimentos identificando los tamaños de grano y sus componentes elementales con la intención de localizar algún contaminante metálico y estimar de forma cuantitativa la cantidad existente en el cuerpo sedimentario.

1.1 Planteamiento del problema

Debido al creciente aumento de los procesos industriales y a un control inadecuado en las descargas de los residuos generados de dichos procesos, la contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados va en crecimiento y no se le da la importancia que requiere, por ello es conveniente establecer un estudio que determine el nivel de contaminación en el cuerpo sedimentario de la Laguna del Conejo, con el objetivo de identificar el tipo de contaminantes presentes y en qué proporción se encuentran para determinar si constituyen un peligro para la comunidad ecológica que rodea el embalse lagunar.

En algunos periodos del año, al recorrer el cuerpo de agua se observa en la superficie lagunar y en la vegetación un pigmento verde que mancha las plantas y que, de acuerdo con los pescadores de la zona, tiene una consistencia viscosa en forma de nata y presenta mal olor.

Para resolver la problemática de la ausencia de técnicas sencillas que puedan determinar el tamaño de partícula de los sedimentos lagunares, este trabajo busca establecer una metodología confiable y reproducible para la caracterización física de los sedimentos haciendo uso de la Microscopía electrónica de barrido y la Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva para determinar las especies metálicas localizadas en los sedimentos, para que, en caso de ser factible, se proponga una metodología o técnica de remediación mediante la movilización de los contaminantes metálicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General.*

Determinar el nivel de contaminación por metales pesados en los sedimentos de la Laguna El Conejo, del municipio de Altamira Tamaulipas.

1.2.2 *Objetivos Específicos.*

- Localizar el área de estudio.
- Realizar la extracción de muestras de los sedimentos de la laguna El Conejo.
- Caracterizar físicamente las muestras de los sedimentos de la laguna El Conejo.
- Identificar los metales pesados existentes en sedimentos por medio de la Microscopía electrónica de barrido y la Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva.
- Predecir el grado de contaminación de los sedimentos por metales pesados.
- Determinar la viabilidad de movilización de las especies metálicas presentes en los sedimentos.

1.3 Justificación del estudio

El sector industrial ha mostrado un crecimiento considerable en los últimos tiempos, siendo una parte importante de la economía de nuestra sociedad al transformar las materias primas en diversos productos necesarios para la vida cotidiana, tal es el caso de la zona en donde se centra este trabajo.

De acuerdo con [15][16][17], cada año las industrias de la zona conurbada de Altamira vierten más de 12 millones de metros cúbicos de aguas procedentes de sus diversos procesos industriales y sanitarios a los cuerpos de agua aledaños, en los cuales su afectación es notoria, muestra de ello es el olor que emana de la laguna, la muerte de las especies que habitan en la laguna y la coloración diversa que presenta el cuerpo de agua.

Por ello, el reto de este trabajo es realizar un estudio que determine el nivel de contaminación por metales pesados en los suelos lagunares mediante la caracterización sedimentológica y haciendo uso de técnicas de identificación y cuantificación de metales (SEM-EDS), para que con los resultados

obtenidos se pueda determinar la viabilidad de movilización y proponer una metodología de remediación del cuerpo sedimentario.

Se considera que los beneficios de este estudio son diversos, desde el aspecto del cuidado de la flora y fauna de la laguna, así como la salud y alimentación de los pobladores de las zonas aledañas y los consumidores del producto proveniente de la pesca del lugar.

1.4 Hipótesis

Las descargas provenientes de los procesos industriales, residuales y sanitarios producen altos niveles de contaminación que exceden los límites máximos permisibles de metales pesados en los sedimentos de la laguna El Conejo del municipio de Altamira Tamaulipas.

2 Antecedentes/Marco Teórico

En el estado del arte se llevó a cabo una revisión de la literatura relacionada con estudios e investigaciones sobre la contaminación por metales pesados en sedimentos partiendo de los análisis internacionales, seguido de las investigaciones nacionales, continuando con las locales. La contaminación por metales pesados es en la actualidad una de las problemáticas más grandes que afectan los recursos hídricos, atmosféricos, sedimentarios y alimentarios [18].

2.1 Metales pesados.

Se considera un metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr/cm^3 cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalinotérreos) [19].

Un metal pesado es un miembro de un grupo de elementos químicos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas. Se incluyen principalmente metales de transición, algunos semimetales, lantánidos, y actínidos. Muchas definiciones diferentes han propuesto basarse en la densidad, otras en el número o peso atómicos, y algunas en sus propiedades químicas o de toxicidad [20].

Los organismos vivos requieren diferentes cantidades de metales pesados, pequeñas cantidades de hierro, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno y zinc son requeridas por los humanos, pero en cantidades excesivas pueden dañar nuestro organismo. Otros metales pesados como mercurio, plutonio, y plomo son metales tóxicos que no tienen un efecto vital o beneficioso para el organismo, y su acumulación en el tiempo y en el cuerpo de los animales puede causar serias enfermedades, como por ejemplo saturnismo o envenenamiento por mercurio.

Algunos elementos que son normalmente tóxicos, para algunos organismos, bajo algunas condiciones pueden ser beneficiosos, por ejemplo, el vanadio, el wolframio, incluso el cadmio [21].

En 2011, L. Espinoza *et al.* [22] realizaron un estudio al ecosistema de manglar de la Ciénaga Grande de Santa Marta en Colombia debido a la alteración físico química de sus sedimentos por las actividades antropogénicas; el objetivo fue conocer el potencial de movilidad y biodisponibilidad de los metales Cr, Mg, Ni, Cu, Zn, Cd, As y Pb en sedimentos superficiales del manglar que pudiera afectar a la flora y fauna de la región, la prueba se realizó siguiendo el esquema de extracción secuencial de Tessier y aplicando la técnica de Espectrometría de Plasma Inductivamente Acoplado, encontrando como resultados que las concentraciones de los elementos metálicos en las fracciones móviles son muy bajas y no presentaban un riesgo ambiental.

En 2013, E. F. Tello-Rodríguez *et al.* [23] realizaron un estudio en la Laguna el Paraíso región Lima Perú, en donde se buscó evaluar los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua y las concentraciones de los elementos químicos en los sedimentos de la laguna. Las técnicas utilizadas fueron Fluorescencia de Rayos X por energía dispersa y Espectroscopía de Absorción Atómica, encontrando como resultado que los niveles de concentración de los parámetros fisicoquímicos del agua (Oxígeno disuelto, pH y alcalinidad), en promedio cumplen con los estándares nacionales de calidad ambiental en referencia a las zonas marino-costeras. Así también se encontró que las concentraciones de los metales Cu y Zn presentaron valores muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por los lineamientos de calidad de sedimentos internos, concluyendo que los sedimentos no tienen efectos tóxicos sobre la biota local.

En el 2013, J. Herrera-Núñez *et al.* [24] realizaron un estudio a los sedimentos superficiales del Río Pirro en Costa Rica, debido al peligro que constituyen los metales pesados para la vida acuática, haciendo uso de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica encontraron que la concentración de los metales Cd, Ag, Se, Sn, Ni, Cr, Cu, B, Zn, Hg, Ba, Pb, Mn, As y Al fueron muy elevadas para la mayoría de las muestras analizadas en los diferentes puntos de muestreo, su distribución no fue homogénea, concluyendo que existe un grave problema ambiental derivado de las diversas fuentes de contaminación como son el vertido de aguas residuales sin tratamiento, la infiltración de aguas negras, aguas de uso agrícola, metalúrgicas y metalmecánicas, determinando que el peligro más grande es la incorporación de los niveles excesivos de metales en la cadena trófica.

En ese mismo año, Z. Banu *et al.* [25] realizaron un estudio al Río Turag en Bangladesh debido a la invasión de aguas residuales no tratadas y el vertido de desechos sólidos que han degradado la calidad del río, por ello en este estudio se analizaron las concentraciones de Cr, Pb, Zn, Cu y Cd debido a su alta toxicidad haciendo uso de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica, obteniendo los resultados de las siguientes concentraciones; Cd: 0.00-0.80, Cr: 32.00-75.50, Cu: 46.30-60.00, Pb: 28.30-36.40 y Zn: 94.60-190.10 mg/ kg en sedimentos. Los valores de Cr, Cu y Zn indican una moderada contaminación mientras que los valores de Pb y Cd indicaron valores de baja contaminación de acuerdo con los valores que se utilizaron de referencia y que fueron tomados de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés, United States Environmental Protection Agency), concluyendo que los resultados obtenidos no exceden los límites permisibles, por lo tanto el grado de contaminación de los sedimentos del río Turag es de bajo a moderado.

En 2015, R. Laino-Guanes *et al.* [26] realizaron una evaluación sobre la concentración de metales pesados en la cuenca alta del río Grijalva, dado que algunas comunidades de la zona fronteriza de Guatemala con México se abastecen del agua proveniente de este río, se buscó encontrar la repercusión que tendría en materia de salud además el interés futuro de desarrollar la minería en esa zona, se evaluó el contenido de metales (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) en agua superficial y sedimentos durante dos épocas: lluvia y seca en las cuencas de los ríos Xelajú y Bacantón, así como en las subcuencas del río Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal; se tomaron como referencia los valores máximos permisibles para agua y sedimentos de las normativas de México y Canadá, se aplicó la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con atomización con flama obteniendo como resultados que las concentraciones de Hg rebasan los límites máximos permisibles establecidos por ambas normas de referencia tanto en épocas de lluvia como en épocas de seca en todas las cuencas, mientras que las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn fueron mínimas y no excedieron los límites máximos permisibles de la Norma Mexicana, sin embargo en algunos casos si excedieron los límites establecidos por la norma canadiense, concluyendo que el metal que se presenta con mayor frecuencia es el Hg excediendo los límites máximos permisibles de ambas normas, mientras que las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn están por debajo de los límites máximos permisibles.

En 2016, G. José-Bracho *et al.* [27] realizaron un estudio al agua y sedimentos del lago Maracaibo en Venezuela con el objetivo de determinar la calidad del agua y sedimentos debido a las diversas actividades antropogénicas como son las descargas de aguas residuales, depósitos de basura, residuos

industriales líquidos y sólidos, actividad petrolera y agrícola, y materiales orgánicos acarreados por ríos y drenajes pluviales. Encontrando como resultado que en referencia a los metales (Ba, B, Cr, Fe, Cd, Pb y Zn) las concentraciones están por debajo de los límites permisibles establecidos por el decreto N° 883 de la Norma para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos de Venezuela. Concluyendo que la contaminación por incremento de nutrientes (nitrógeno y fósforo) está determinada por la influencia de los ríos y vertederos de agua residual.

A principios del 2019, M. Fuentes- Hernández *et al.* [28] realizaron un estudio que tenía como objetivo evaluar la potencialidad de algunos metales pesados para provocar daños al ecosistema del golfo de Cariaco en Venezuela. Para ello se determinaron las concentraciones de los metales en los sedimentos y los índices de contaminación y riesgo ambiental. Además, se realizó una prueba de supervivencia con *Artemia salina*. Las concentraciones totales ($\mu\text{g/g}$) fueron: Cu (29-91), Cd (1.9-4.9), Cr (4-36), Ni (10-33), Pb (3-9) y Zn (32-112). Todas las concentraciones de metales fueron menores que los estándares de calidad de sedimentos marinos, concluyendo que el riesgo potencial de toxicidad por metales es insignificante comprobado por las pruebas realizadas en el estudio determinando que no existe una amenaza de daño por metales pesados en los sedimentos del saco del Golfo de Cariaco.

En México, también se han realizado estudios sobre la contaminación ambiental, tal es el caso del estudio elaborado en 1995 por A. Hansen *et al.* [29] cuyo objetivo fue estimar la descarga de metales al río Lerma por parte de más de 3000 industrias localizadas por la zona de la cuenca Lerma-Chapala, mediante el análisis de los sedimentos de diversas estaciones distribuidas en toda la cuenca, la técnica fue Espectrofotometría de Absorción Atómica obteniendo como resultado el incremento de seis metales (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn) y determinando que los sedimentos suspendidos son el principal vector en el transporte de contaminación por metales mientras que los sedimentos del fondo actúan como fase de acumulación de las especies metálicas.

En 2003, J. García-Aragón *et al.* [30] realizaron un estudio sobre la contaminación por metales pesados en el embalse José Antonio Alzate en el estado de México, debido a que existen muchas industrias de diversos giros como el metalmecánico, químico y textil las cuales descargan aguas residuales al río Lerma y la presa en la que se realizó este estudio está en el curso del río; por ello se aplicó la técnica de Espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía a las muestras

de sedimentos extraídas de diversos puntos del embalse, los resultados que se obtuvieron fueron que con base a las normas de Canadá y Estados Unidos de América, las concentraciones encontradas para la mayoría de metales no muestran una alta concentración en sedimentos.

Por otra parte, en 2013 Y. Pérez-Cruz *et al.* [31] determinaron mediante un estudio, la concentración de Cd, Cr, Ni, Pb y V en sedimentos y almejas en la reserva de la biósfera Pantanos de Centla en Tabasco, México por la técnica de Espectrofotometría de absorción atómica obteniendo como resultados que los metales que superaron los límites máximos permisibles en sedimentos fueron el Cd, Ni, Pb, y V, mientras que en las almejas fueron el Cd, Cr, Ni, y V.

En 2014, Y. Canedo-López *et al.* [32] realizaron un estudio en el que se evaluaron los niveles de metales pesados en sedimentos de la Laguna de Términos, Campeche; para el análisis de metales pesados se emplearon aproximaciones geoquímicas (normalización) y estadística multivariada. La técnica utilizada fue espectrometría de plasma inducido. Adicionalmente, se determinó el contenido de materia orgánica y la granulometría. Las concentraciones de metales pesados encontradas en este trabajo son relativamente bajas. El análisis de Componentes Principales indicó que algunas de las estaciones cercanas a la boca de la Laguna de Atasta, río Chumpán y río Palizada, presentan concentraciones más allá de los rangos de fondo locales y por lo tanto se consideran sitios vulnerables a la contaminación por metales pesados.

En 2014, J. Alcalá *et al.* [33] determinaron la presencia de metales pesados en sedimentos de un sistema ribereño fragmentado por usos de suelo como indicador de contaminación ambiental en San Luis Potosí, México. Se utilizó la técnica de ICP-MS para determinar Pb, Cd, Cu and Zn. El uso de suelo incide en la acumulación de Cu, Zn y Cd, siendo la zona agrícola la que cuenta con mayores concentraciones. Los límites normales de Cu, Cd, Zn y Pb en sedimentos establecidos por la Canadian Environmental Quality Guidelines fueron rebasados. Con otras fuentes se definieron que los niveles máximos de Cu, Cd y Pb presentaron una condición alta de contaminación. Esta condición es atribuida a la dinámica de usos de suelo, descargas de aguas residuales, desechos sólidos urbanos, agrícolas y ganaderos, recomendándose continuar su evaluación ambiental.

En 2018, H. Rubio-Arias *et al.* [34] realizaron un estudio cuyo objetivo fue conocer la contaminación por metales en sedimentos de la Laguna de Bustillos en Chihuahua, México comparando dos métodos de digestión (agua regia y peróxido). La prueba se realizó en un espectrofotómetro de emisión óptica

por plasma acoplado inductivamente cuantificando cromo (Cr), hierro (Fe), litio (Li), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni), zinc (Zn), cobalto (Co), cobre (Cu), plomo (Pb) y estroncio (Sr). La concentración de Cr, Fe, Mn, Ni, Zn, Cu y Pb no excedió las normas nacionales o internacionales y para Li, Mg, Co y Sr no existen estándares. Se concluye que el sedimento se encuentra con niveles de metales que no representan un peligro para el ecosistema.

En ese mismo año, C. Flores *et al.* [35] realizaron un estudio a la laguna de las Ilusiones en Villahermosa Tabasco, con el fin de analizar algunos parámetros físicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto, entre otras pruebas) y las concentraciones de metales pesados en agua y sedimentos superficiales haciendo uso de la técnica de Espectrofotometría de absorción atómica, regidos por las normas NOM-021- Semarnat-2000 (Semarnat, 2000), NOM-147-Semarnat/SSA1-2004. La norma NMX-AA-132-SCFI-2006 fue utilizada para determinar las concentraciones de metales pesados. Se obtuvo de resultado que los metales pesados asociados al agua Cd, Ni, Cr, Mn, Zn, Al y Pb, están por debajo de los límites establecidos por la norma respectiva, mientras que la concentración de Cd, Ni, Cr, Mn, Zn, Pb y Al en los sedimentos exceden los límites máximos permisibles establecidos por las normas canadienses y estadounidenses. Concluyendo que la laguna está contaminada por descargas ilícitas de aguas negras procedentes de las viviendas cercanas, desechos de hospitales y por la infiltración de otras lagunas contaminadas.

En cuanto a los estudios realizados en las cercanías del lugar en donde se elaboró el presente trabajo, se encontró que en 2006 [5], se analizaron las concentración de metales pesados (Cu, Ni y Pb) en los sedimentos de la laguna de Pueblo Viejo, las marismas de Altamira, Tamaulipas y la laguna de San Andrés a lo largo de tres épocas del año, época de lluvia, seca y norte. Las muestras se analizaron mediante la técnica de EAA empleando para su extracción digestión ácida tomando como referencia los límites establecidos por las Normas Canadienses de calidad en sedimentos para soportar y mantener la vida acuática. En cuanto a los resultados se encontró que el metal que presenta mayor concentración promedio en los sedimentos de las tres lagunas es el Cobre, excediendo el límite máximo recomendado para el soporte y mantenimiento de la vida acuática sólo en las marismas de Altamira y la Laguna de Pueblo Viejo, de igual forma las concentraciones de Níquel exceden dichos límites en ambas lagunas, mientras que las concentraciones de Plomo no exceden los límites en ninguna laguna.

Para tener un claro enfoque del objetivo de esta investigación, es necesario partir de conocimientos básicos sobre los elementos que se abordarán en este trabajo, por ello, partimos de la premisa que la contaminación es la presencia o acumulación de todos aquellos agentes externos o sustancias que afectan de forma negativa el entorno, la salud de la flora y fauna de un ecosistema o de una región determinada.

Existen diferentes tipos de contaminación, de acuerdo con el ambiente en donde se susciten las alteraciones para el desarrollo de la vida y los procesos de los ecosistemas, si generalizamos en esto, consideramos tres elementos importantes en la naturaleza que están sujetos a la contaminación, el agua, el aire y el suelo.

2.2 Contaminación del agua.

Se estima que en la tierra existen aproximadamente $1,385,000,000 \text{ km}^3$ de agua, de los cuales un poco más del 97% es salada y el resto se encuentra congelada en los polos y sólo una pequeña parte está disponible para nuestras necesidades y esta pequeña proporción se encuentra en riesgo debido a la contaminación proveniente de las diversas actividades humanas y su disminución va en aumento debido al calentamiento global [36].

Se considera como contaminante al exceso de materia o energía que perturbe negativamente las actividades o procesos que ocurren dentro del agua; el origen de la contaminación del agua es muy variado, pero se consideran fuentes de ello los diversos tipos de desechos: urbanos, industriales (minería, química, etc.), la agricultura, además de los derrames accidentales o intencionales de sustancias tóxicas, la erosión natural, los efluentes de las plantas depuradoras [37], las actividades avícolas y porcinas por medio de la incorporación de los desechos fecales hacia los suelos los cuales tienden a lixiviar diversas sustancias como nitratos alcanzando los acuíferos en profundidad [38].

2.3 Contaminación del suelo por metales pesados.

El suelo es un cuerpo natural y dinámico que cambia con el tiempo y el espacio, es soporte de una gran variedad de organismos, entre ellas la vegetación, pues de ella dependen las actividades agrícolas, fuente de alimento para la humanidad. Se considera un sistema abierto que presenta

cambios de materia y energía con el medio, en donde se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología y propiedades.

Este cuerpo también se encuentra sujeto a alteraciones en su composición debido a diversos tipos de contaminación, como lo son la contaminación por hidrocarburos y por metales pesados. La contaminación de suelos por metales pesados sucede en diversas situaciones y en distintos niveles, desde el consumo y uso de productos que los contienen en pequeñas cantidades, hasta los residuos generados por las grandes empresas metalúrgicas, cementeras, mineras y de procesos químicos, que no cuentan con un buen manejo de los mismos y sin pensar en las consecuencias realizan acciones contra las leyes ambientales vertiéndolos, para que posteriormente estos residuos se dirijan a las redes de drenaje y continúen su curso contaminando las cuencas hidrológicas (ríos, lagos, pantanos, lagunas y mares) hasta ser precipitados o depositados en los sedimentos [39].

2.4 Sedimentos.

Para hablar sobre sedimentos es necesario y de forma muy abstracta, hablar sobre la formación de las rocas. Dentro de nuestro planeta se encuentran corrientes magmáticas provenientes del manto, ricas en minerales en suspensión, dichas corrientes tienden a buscar zonas de menor presión, dirigiéndose a través de fracturas en la corteza o en los límites de las placas tectónicas y dorsales que se dirigen a la superficie terrestre, en su búsqueda de zonas de mayor estabilidad dan paso a la formación de volcanes, los cuales formarán el primer tipo de rocas, las rocas ígneas, éstas se clasifican en dos tipos, las plutónicas y las volcánicas.

Las primeras sufren un proceso lento de solidificación, es decir se enfrían más lentamente y a mayor profundidad, lo que permite la formación de cristales de tamaño visible en su composición, a diferencia de las volcánicas que sufren un proceso contrario, su solidificación suele ser relativamente rápida y ello causa que en su composición estas rocas no presenten cristales de fácil visualización, estas rocas en ocasiones son expulsadas por los cráteres de los volcanes y su enfriamiento es rápido. Después de su depósito, y al paso del tiempo las rocas ígneas sufren procesos de erosión y desgaste, por parte de diversos agentes climatológicos y procesos hidrológicos, lo que da pie a la formación de sedimentos de roca que serán depositados en otros lugares [40].

2.5 Ambientes Sedimentarios.

Los ambientes sedimentarios son una parte de la superficie terrestre que se diferencia física, química y biológicamente de las zonas adyacentes [41]. En un medio sedimentario o en parte de este puede producirse erosión, no depósito o sedimentación, normalmente alternando en diferentes etapas. Los procesos sedimentarios son los causantes del transporte y depósito de los sedimentos. El número de medios sedimentarios actuales es finito y pueden ser clasificados.

2.5.1 Ambiente Continental.

Estos ambientes están regidos por la erosión y la deposición asociada a las corrientes [42]. La sedimentación en el medio continental se produce en un gran número de sitios diferentes. Podemos ordenarlos en aquellos que están relacionados con:

1. El agua en estado líquido.
 - Medios fluviales:
Son los valles de los ríos, la sedimentación sucede en la llanura de inundación y en el cauce del río, su sedimentación es detrítica.
 - Abanicos aluviales:
Son los sedimentos generados por los torrentes provenientes de las montañas y que son depositadas al final de su recorrido. Su sedimentación es detrítica con conglomerados, areniscas y lutitas.
 - Medios lacustres:
Los lagos son lugares de sedimentación de aguas continentales y de emergencia de aguas subterráneas. La sedimentación en estos medios es detrítica, con fragmentos más gruesos en la orilla de los lagos y más finos conforme más lejos de la orilla, así como también existe precipitación química en el interior de ellos formando evaporitas.
2. El agua en estado sólido.
 - Medios glaciares y periglaciares:
Sedimentación que sucede en las zonas glaciares montañosas y zonas aledañas, su sedimentación es detrítica, sin grano selección llamadas morrenas.
3. El viento.
 - Medios eólicos-desérticos:

Sedimentación detrítica cuyo agente característico es el viento, existe grano selección, el ejemplo más conocido son las dunas. Los desiertos pueden ser de arena y de rocas.

2.5.2 *Ambiente Marino.*

Como su nombre lo indica, son aquellos depositados debajo del mar, y su forma de clasificación está dada según su posición geográfica, en:

1. Plataformas continentales.

Por definición, es una parte del continente sumergido en el mar que tiene muy poca pendiente, su profundidad llega hasta los 150 metros y su extensión puede llegar hasta las 200 millas marinas. En referencia al medio sedimentario, es una zona de gran acumulación de sedimentos junto con los medios costeros, dentro de la plataforma continental se diferencian dos tipos de medios de plataforma:

- Medios de plataforma carbonatada.

Una plataforma carbonatada es un cuerpo sedimentario que posee un relieve topográfico, y está compuesto de depósitos calcáreos propios de la zona (autóctonos) [43]. Estos medios se encuentran relacionados con los arrecifes.

- Medios de plataforma detrítica.

Cuerpo en donde los sedimentos que se forman son detritos provenientes de la zona continental.

2. Taludes continentales.

Zona sumergida del continente que presenta una gran pendiente. Los sedimentos encontrados en esta zona se depositan de manera inestable formando corrientes de turbidez. Los sedimentos son detríticos y de tipo arenas y lutitas.

3. Abisales.

Zona encontrada en los fondos abisales, es decir, las zonas más profundas del mar, en ellas hay muy poca sedimentación y la sedimentación existente es de contenido silíceo proveniente de los esqueletos de los seres vivos, y existe también una porción mínima de sedimentos muy finos formados por arcillas.

2.5.3 *Ambiente de transición o costeros.*

Este tipo de ambiente sedimentario es el que se localiza en la zona de transición entre el ambiente continental y el marino [43], y en él se encuentran los medios siguientes:

1. Playas. Se definen como zonas de depósitos no consolidados de arena y grava a lo largo del litoral, también son formaciones en la costa denominadas por procesos asociados al oleaje, con ambientes de alta energía.
2. Deltas. Es un medio de depósito formado en la desembocadura de un río por los sedimentos fluviales, normalmente tienen forma triangular.
3. Estuarios. Lugar en donde se une la desembocadura de un río con el mar, haciendo que se mezclen el agua dulce del río con el agua salada del mar cuando sube la marea. Suelen tener una forma característica de embudo, y es en la parte más ancha en donde sucede la mezcla del agua.
4. Marismas y albuferas.
 - Marisma: Ecosistema húmedo en donde crecen plantas herbáceas en el agua, el agua es una mezcla de agua dulce y salada, aunque en ocasiones existen marismas con agua salada.
 - Albufera: Laguna litoral de agua salada o un poco salobre, que está separada del mar por un pequeño cordón de arena, pero está conectado al mar por uno o varios puntos.

2.6 **Técnicas para la determinación del tamaño de partículas.**

Los sedimentos presentan en su composición una diversidad de tamaños de partículas que van desde >4.75 milímetros considerados como materiales gruesos (gravas), entre 4.75 y 0.075 milímetros considerados como materiales gruesos de grano medio (arenas) y menores a 0.075 milímetros considerados como materiales finos (limos y arcillas). Uno de los análisis más empleados para la determinación del tamaño de grano debido a la sencillez de su aplicación es el tamizado, esta técnica se fundamenta en la colocación de una columna de tamices de diferente apertura de malla en orden decreciente sobre un equipo de vibración mecánica, en donde se introducirá el material sedimentario para su clasificación en diferentes tamaños de partícula.

También existen técnicas que son mucho más precisas en la identificación del tamaño de grano y que sirven como complemento para la información obtenida por el método de tamizado, gracias a la utilización de herramientas tecnológicas modernas como es el caso de la Microscopía.

2.6.1 *Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).*

Es la técnica de análisis de materiales realizada por el microscopio electrónico de barrido, por sus siglas en inglés SEM (Scanning Electron Microscope) en donde es utilizado un haz de electrones en vez de un haz de luz (como normalmente sucede en un microscopio tradicional) para formar una imagen con gran detalle teniendo en consideración una determinada área de enfoque. Este microscopio cuenta con un detector de energía dispersiva (EDS-Energy Dispersive Spectrometer) permitiendo la captación de rayos X provenientes de la muestra analizada. Los microscopios electrónicos suelen acompañarse de dispositivos detectores de electrones, por ejemplo:

Detector de electrones secundarios (SE): Presenta una imagen en blanco y negro de la zona superficial de la muestra examinada. La señal emitida por este detector es la que presenta con mayor detalle la imagen de la superficie ya que tiene una mejor resolución.

Detector de electrones retrodispersados (BSE): De igual forma que el detector SE, este también muestra imágenes superficiales, pero de una resolución inferior. La ventaja que presenta este detector en comparación con el anterior es que tiene una mayor sensibilidad a las variaciones en el número atómico de los elementos superficiales de las muestras analizadas. Por ejemplo, si la muestra presenta una superficie regular de apariencia completamente lisa, la imagen presentará diferentes tonalidades de gris en función de que existan varias fases con distintos elementos.

Según [44] el SEM-EDS se ha convertido en una técnica de microanálisis de suma importancia que se utiliza ampliamente en diversos campos de la ciencia e investigación, desde las ciencias médicas hasta el campo de la ingeniería y ciencias forenses.

Esta técnica presenta un espectro con picos característicos que permiten la localización e identificación de la mayoría de los elementos presentes en la tabla periódica y que componen el material analizado en su estado elemental [45].

En la actualidad muchos de los equipos de SEM están complementados con EDS lo que ha permitido que la técnica sea una herramienta confiable al brindar información tanto cualitativa como cuantitativa.

2.7 Data mining para el análisis de datos.

La minería de datos tiene como finalidad el manejo y análisis de datos, desde pequeñas cantidades hasta enormes conjuntos de datos mediante la utilización de diversas herramientas de inteligencia computacional que permitan explorar de manera automática los datos con el fin de localizar patrones o tendencias que pudieran indicar el comportamiento de estos [46].

Las tendencias o patrones que persiguen se pueden localizar mediante el uso de algoritmos de búsqueda o estadísticas como es el caso de las redes neuronales. Para la utilización del data mining es necesario considerar los objetivos a conseguir con el análisis de los datos, como se van a procesar los datos, determinar un modelo y finalmente analizar los resultados obtenidos [47].

Existen diversos programas para el Data mining, uno de ellos es Weka® que es una plataforma de software creada por la universidad de Waikato en Nueva Zelanda que posee una extensa colección de algoritmos de machine learning, diseñados para su uso en el manejo y transformación de datos mediante la aplicación de herramientas como la clasificación, regresión, clustering y visualización de los datos analizados. Esta herramienta será la utilizada para el análisis de los resultados obtenidos de las diversas pruebas que presenta este trabajo.

3 Metodología

Los materiales utilizados en la parte experimental del presente trabajo se presentan a continuación, posteriormente los procedimientos de las actividades establecidas.

3.1 Identificación y delimitación del área de estudio.

El área de interés del presente trabajo, en el cual se pretende determinar los niveles de contaminación por metales pesados en sedimentos, comprende la laguna El Conejo, localizada en el municipio de Altamira en el estado de Tamaulipas la cual se muestra en la figura 3.1.1:

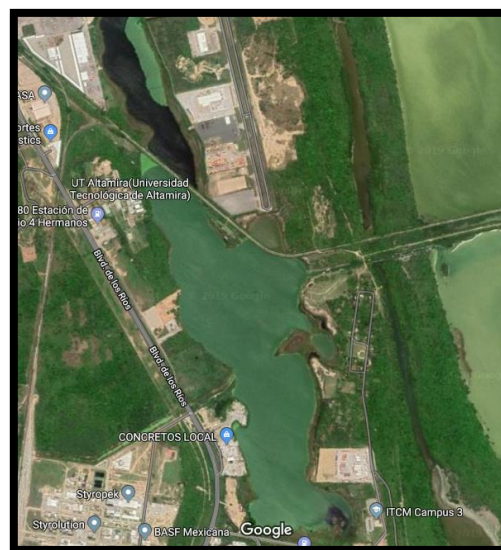


Figura 3.1.1 Área de estudio: Laguna El Conejo

3.2 Toma de muestras.

La metodología para la toma de muestras de sedimento está sujeta a la NMX-AA-132-SCFI-2016 (Muestreo de suelos para la determinación de metales y metaloides y manejo de la muestra), en su especificación para el muestreo exploratorio, cuyo objetivo es obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y, en su caso, la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical. En la tabla 3.2.1 se indica el material necesario para la toma de muestras:

Tabla 3.2.1 Material para la toma de muestras.

1. Draga tipo Ekman con lazo y plomada.	2. Embarcación menor.
3. Recipiente para muestras.	4. Marcadores permanentes.
5. GPS.	6. Flexómetro.
7. Bolsas de plástico.	8. Balanza analítica digital.
9. Bitácora de registro.	

La norma [48], indica la cantidad de muestras a recolectar de acuerdo con el tipo de muestreo a realizar, pero debido a que el número de muestras está limitado hasta superficies menores a 300,000 m^2 , se presenta una ecuación para determinar la cantidad de muestras para superficies mayores. Con las muestras verticales se busca identificar la presencia de metales en superficie y con las muestras verticales, su posible migración hacia capas de suelo a mayor profundidad. La cantidad de muestras a tomar se presenta en la tabla 3.2.2:

Tabla 3.2.2 Cantidad de muestras para el muestreo exploratorio.

Superficie del área de estudio (Hectáreas)		Número mínimo de puntos de muestreo superficial	Número mínimo de pozos verticales
De	Hasta superficies menores a		
0.1	0.2	6	1
0.2	0.3	7	1
0.3	0.4	8	2
0.4	0.5	9	2
0.5	0.7	10	2
0.7	1.0	11	2
1.0	2.0	12	2
2.0	3.0	14	3
3.0	4.0	16	3
4.0	5.0	18	4

Superficie del área de estudio (Hectáreas)		Número mínimo de puntos de muestreo superficial	Número mínimo de pozos verticales
De	Hasta superficies menores a		
5.0	6.0	19	4
6.0	7.0	20	4
7.0	8.0	21	4
8.0	9.0	22	4
9.0	11.0	23	5
11.0	12.0	24	5
12.0	14.0	25	5
14.0	16.0	26	5
16.0	18.0	27	5
18.0	20.0	28	6
20.0	22.0	29	6
22.0	25.0	30	6
25.0	28.0	31	6
28.0	30.0	32	6

Para superficies mayores a 30 hectáreas (300 000 m²) el número mínimo de puntos de muestreo superficial se calcula aplicando la Ecuación 1 [48].

$$n = 11.71A^{0.3} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

n es el número mínimo de puntos de muestreo.

A es la superficie del suelo del área de estudio expresada en hectáreas.

Para superficies mayores a 30 hectáreas (300 000 m²) el número mínimo de pozos verticales se calcula aplicando la Ecuación 2:

$$n = 2.26A^{0.31} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

n es el número mínimo de pozos verticales.

A es la superficie del suelo del área de estudio expresada en hectáreas.

La herramienta de muestreo está conformada por una draga tipo Ekman con lazo y plomada cuya función es recuperar muestras de sedimento que se encuentran en la interfaz agua-sedimento del embalse lagunar. Esta herramienta cuenta con un par de mandíbulas que se abren y cierran por medio

de un mecanismo a tensión que al presionarlo cuando las mandíbulas están abiertas, libera la tensión y realiza el cerrado de dichas mandíbulas permitiendo así la captura de muestra sedimentaria.

Para su utilización, la draga se prepara para la colecta de muestra abriendo sus mandíbulas y se tira al fondo de la laguna desde una embarcación menor en la superficie del espejo de aguas, al tocar el fondo se suelta la plomada que viaja a través del lazo hasta el mecanismo de la draga, al golpearlo se libera el mecanismo permitiendo el cierre de las mandíbulas de la draga y recuperando la muestra, una vez hecho esto se extrae la draga del fondo lagunar hacia la superficie para la recuperación y manejo de la muestra, la draga tipo Ekman se presenta en la figura 3.2.1:

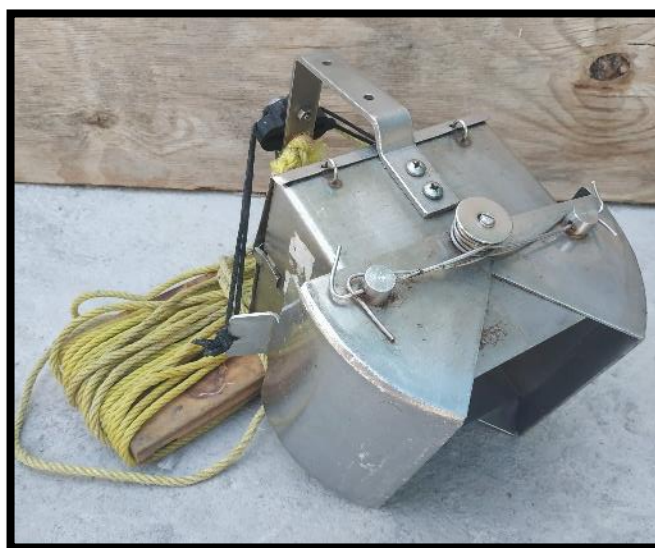


Figura 3.2.1 Dragas tipo Ekman con lazo y plomada.

3.3 Secado de muestras.

El secado de las muestras de sedimento se realiza posteriormente a la extracción y transporte al laboratorio, en la Tabla 3.3.1 se indica el material necesario para el desarrollo de esta prueba:

Tabla 3.3.1 Material para secado de muestras.

1. Muestras de sedimento lagunar.	4. Charola o recipiente de aluminio.
2. Horno de secado.	5. Marcadores indelebles.
3. Balanza analítica digital.	

Con las muestras en el laboratorio, se procede a colocarlas en charolas de aluminio para secarlas en un horno marca VWR® modelo 89511-404 a una temperatura constante de 110°C durante 16 horas como lo indica la norma [49]. Posteriormente al secado, las muestras que lo requieran se disgregan para la obtención del valor del pH y de la conductividad. En la figura 3.3.1 se muestran tres imágenes, en a) las muestras previas al secado, en b) el horno durante el periodo de secado y en c) las muestras secas.

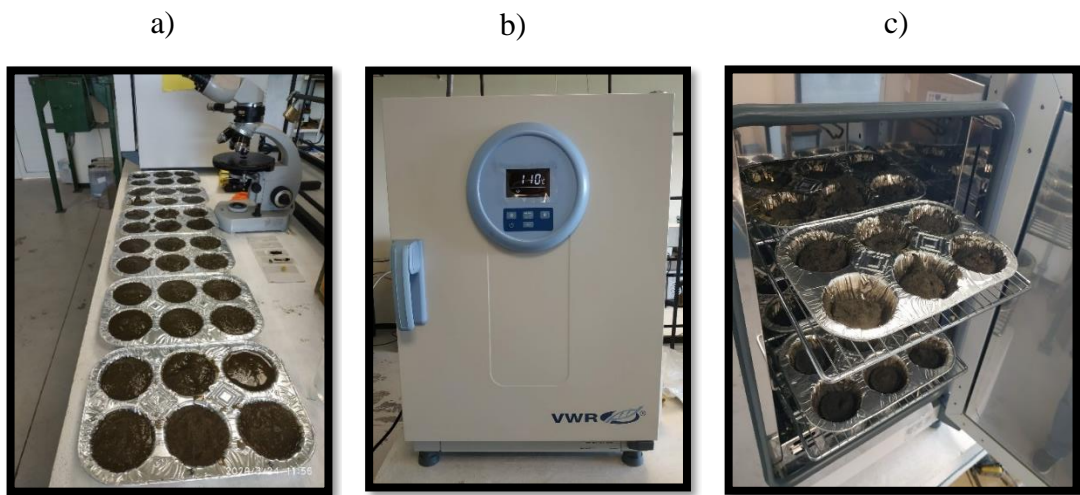


Figura 3.3.1 Secado de muestras

3.4 Determinación de potencial de Hidrógeno (pH) y conductividad.

La determinación del potencial de Hidrógeno en suelos según lo establecido por la norma ASTM D4972-19 [50], se puede obtener mediante dos métodos, el Método A, que se realiza con un medidor de pH equipado con un sistema de electrodos de vidrio-calomel; y el Método B con papel de pH. Para este trabajo se obtuvo la medición por el primer método. A continuación, en la tabla 3.4.1 se presenta el material necesario para la obtención de los valores de pH y conductividad de las muestras:

Tabla 3.4.1 Material pH y conductividad.

1. Muestras de sedimento previamente secado.	4. Agua desionizada.
2. Medidor de pH.	5. Vasos de precipitado de 50 mL.
3. Agitador.	6. Conductímetro portátil.

Después de secar las muestras en el horno se depositan aproximadamente 10 g de sedimentos en recipientes de vidrio y se agregan 10 ml de agua desionizada marca Fermont®. Mezclar bien y dejar reposar por 1 h. Posteriormente se introduce el dispositivo medidor de pH de marca Metrohm® modelo 913 y se toma la lectura. La mezcla debe estar aproximadamente a temperatura ambiente (15° a 25°C) al momento de la medición.

El valor de la conductividad de la muestra se realiza después de la toma del pH, introduciendo el conductímetro portátil de marca Dines® modelo TDS meter en la mezcla de sedimento con agua desionizada. En la figura 3.4.1 a) se muestra el medidor de pH utilizado y en 3.4.1 b) el conductímetro portátil.

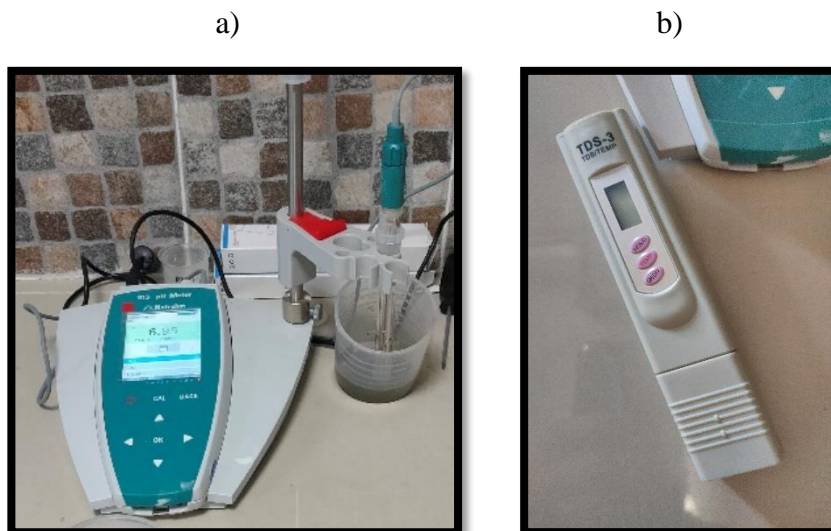


Figura 3.4.1 a) Medidor de pH y b) conductímetro portátil.

3.5 Determinación granulométrica.

La determinación granulométrica de los sedimentos se realizó bajo lo establecido por la norma ASTM D2487-17 [51] que rige al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para la realización de esta prueba fue necesaria la utilización de una serie de tamices de distinto tamaño de abertura de malla y un equipo de vibración mecánica, en la tabla 3.5.1 se presentan los materiales necesarios para esta prueba:

Tabla 3.5.1 Material para granulometría.

1. Tamiz de 2 mm (#10).	5. Tamiz de 1 mm (#18).
2. Tamiz de 0.425 mm (#40).	6. Tamiz de 0.180 mm (#80).
3. Tamiz de 0.106 mm (#140).	7. Tamiz de 0.075 mm (#200).
4. Tapa y fondo de tamices.	8. Equipo de vibración mecánica.

Este sistema diferencia el suelo en dos tipos de textura: grano grueso y grano fino, definiendo como suelos de grano fino aquellos suelos en los que el 50% o más de su contenido pasa a través del tamiz 0.075 mm (#200), en caso contrario, se dice que el suelo es de grano grueso. Los suelos de grano fino se clasifican a su vez en limos (M) y arcillas (C), mientras que los de grano grueso se clasifican en gravas (G) o arenas (S).

3.5.1 *Coefficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura.*

Para determinar si el suelo está bien graduado (W) o mal graduado (P) es necesario obtener los valores de los Coeficientes de uniformidad (C_u) y el Coeficiente de curvatura (C_c).

El Coeficiente de uniformidad es el valor obtenido de la proporción entre los diámetros de partícula que corresponden al 60% y al 10% del material más fino en la curva granulométrica [51]. El Coeficiente de curvatura es el valor obtenido de la proporción entre los tamaños de partículas correspondientes al 60%, 30% y 10% del material más fino en la curva granulométrica [51].

3.5.2 *Clasificación de suelos de grano grueso.*

Para caracterizar un suelo de grano grueso y determinar si es arena o grava debe hacerse pasar el material a través del tamiz 4.75 mm (#4) y si el 50% o más de la fracción gruesa pasa a través de él, entonces se considera el suelo como arena (S), de lo contrario sería una grava (G), en el SUCS se emplean en general dos letras para definir un suelo, para el caso de suelos de grano grueso, la primera letra indica si el suelo es una grava escribiendo una “G” y en caso de ser una arena se escribirá una letra “S”.

La segunda letra depende de la cantidad de finos que contenga el suelo, si la cantidad de finos, es decir, la cantidad de suelo que pasa el tamiz 0.075 mm es menor al 5% entonces el suelo se dice que

está limpio y se clasifica con base en su granulometría, en este caso, el segundo símbolo podrá ser una “W” o una “P” en función de si el suelo está bien graduado o mal graduado respectivamente.

Dada la curva granulométrica de una grava, esta será una grava bien graduada si el coeficiente de uniformidad de la curva granulométrica es mayor a 4 y el coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3, en caso contrario se dice que la grava está mal graduada.

De forma similar, dada la curva granulométrica de una arena, esta será una arena bien graduada si el coeficiente de uniformidad de la curva granulométrica es mayor a 6 y el coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3, en caso contrario se dice que la arena está mal graduada.

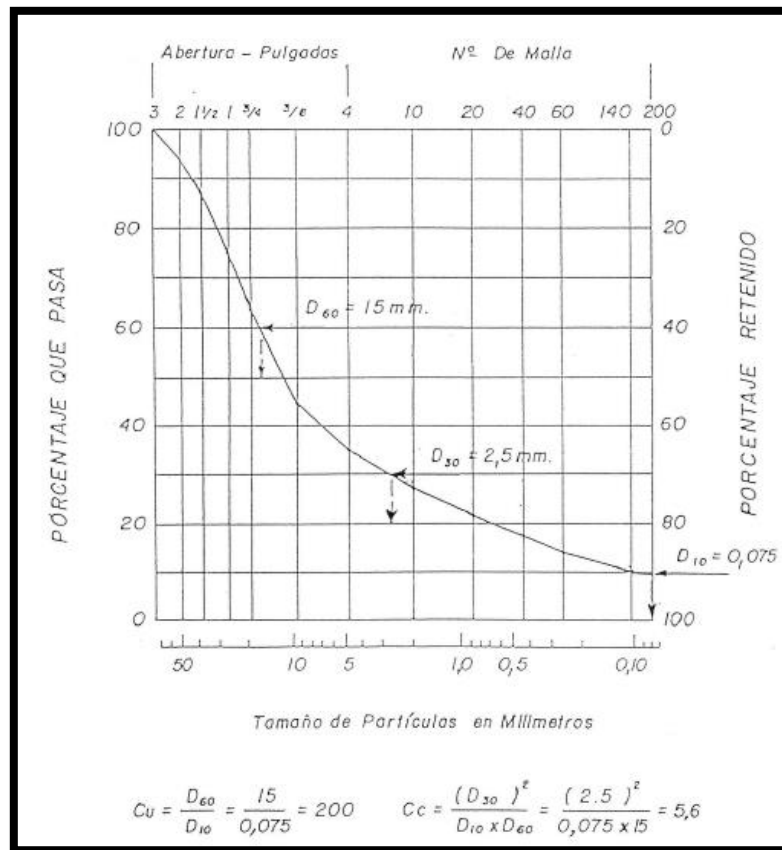


Figura 3.5.1 Curva granulométrica con coeficientes de uniformidad y curvatura [51].

Si la cantidad de finos del suelo es superior del 12% entonces se dice que el suelo está sucio y se clasifica con base en la plasticidad de los finos, en este caso, el segundo símbolo que acompaña a la

“G” de grava o a la “S” de arena podrá ser una “M” o una “C” en función de si los finos del suelo son limosos o arcillosos.

Para determinar la naturaleza de los finos se emplea la carta de plasticidad de Casagrande, en donde se tiene el valor del límite líquido del suelo en el eje de las abscisas y el valor del índice de plasticidad en el eje de las ordenadas. Los finos del suelo serán del tipo limoso si la combinación límite líquido-índice de plasticidad del suelo cae por debajo de la línea A o bien cuando el índice de plasticidad del suelo sea inferior a 4.

Los finos del suelo serán del tipo arcilloso si la combinación límite líquido-índice plástico cae sobre la línea A o por encima de ella siempre y cuando el índice de plasticidad del suelo sea igual o mayor a 7.

Una situación especial se da cuando la combinación límite líquido-índice de plasticidad del suelo cae sobre la línea A o por encima de ella y el índice de plasticidad del suelo se encuentra entre 4 y 7, en este caso los finos son de origen arcilloso-limoso y se utiliza la combinación de símbolos GC-GM o SC-SM para clasificar el suelo que queda definido como una grava o arena arcillosa-limosa.

Finalmente, si el contenido de finos se encuentra entre el 5% y el 12% entonces se lleva a cabo una clasificación dual, clasificando al suelo por su granulometría como si se tratara de un suelo limpio y por su plasticidad como si se tratara de un suelo sucio, una vez hecho esto se unen ambas clasificaciones.

3.5.3 Clasificación de suelos de grano fino.

La clasificación de los suelos de grano fino se realiza en función de la plasticidad que presenta el suelo y para ello se emplea la carta de plasticidad de Casagrande, en cuyo gráfico se ubica el valor del límite líquido del suelo en el eje de las abscisas y el valor del índice de plasticidad en el eje de las ordenadas.

En el SUCS se emplean en general dos letras para definir un suelo, en el caso de los suelos de grano fino la primera letra indica si el suelo es un limo en cuyo caso se representa con una “M” o una arcilla en cuyo caso se representa con una “C”, la segunda letra indica si el suelo es de baja plasticidad “L”

o de alta plasticidad “H”. La distinción entre limos y arcillas se realiza con base en si la pareja límite líquido-índice de plasticidad de un suelo determinado cae por encima o por debajo de la denominada línea A obtenida de la Ecuación 3:

$$IP = 0.73(LL - 20) \dots\dots\dots\text{Ecuación 3}$$

Por su parte, la recta vertical que pasa por el límite líquido igual a 50 separa los suelos de alta plasticidad de los de baja plasticidad, así un suelo se clasificará como un limo cuando la combinación límite líquido-índice de plasticidad del suelo cae por debajo de la línea A o bien cuando el índice de plasticidad del suelo es inferior a 4.

Definido el suelo como un limo, en el caso de que el límite líquido sea inferior a 50, el suelo será un limo de baja plasticidad correspondiéndole el símbolo “ML”, en caso contrario, es decir, si el límite líquido es igual o superior a 50 el suelo será un limo de alta plasticidad “MH”.

Un suelo se clasificará como una arcilla cuando la combinación límite líquido-índice de plasticidad del suelo cae en la línea A o por encima de ella siempre y cuando el índice de plasticidad del suelo sea superior o igual a 4.

Definido el suelo como una arcilla en el caso de que el límite líquido sea inferior a 50, el suelo será una arcilla de baja plasticidad correspondiéndole el símbolo “CL”, en caso contrario, es decir, si el límite líquido es igual o superior a 50 el suelo será una arcilla de alta plasticidad “CH”.

Existe un caso especial que se da cuando el suelo es una arcilla, pero su índice de plasticidad es inferior a 7, en este caso se dice que el suelo es una arcilla limosa de baja plasticidad y se representa por la combinación de símbolos “CL-ML”, en la figura 3.5.2 se presenta la carta de plasticidad de Casagrande.

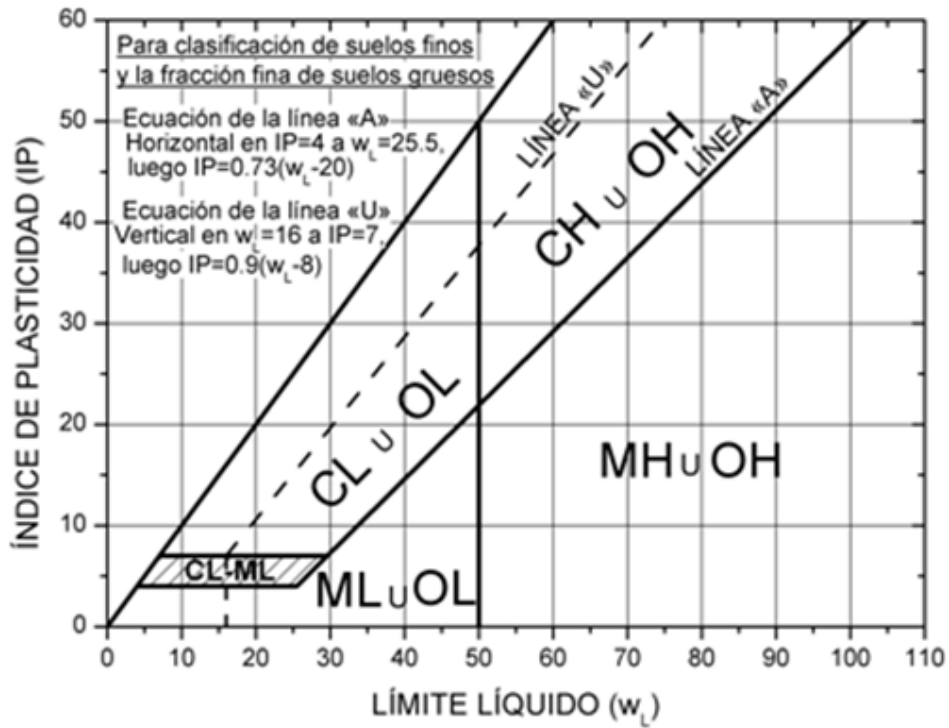


Figura 3.5.2 Carta de plasticidad de Casagrande [51].

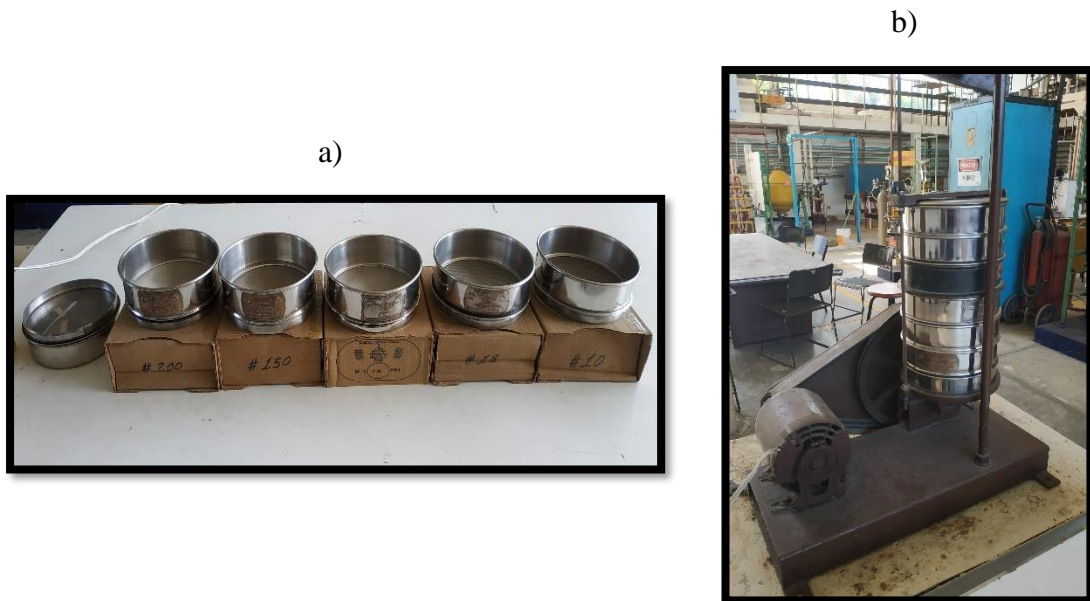


Figura 3.5.3 Equipo empleado para determinación granulométrica. a) Tamices #10 (2 mm.), #18 (1 mm.), #80 (0.180 mm.), #200 (0.075 mm.) y fondo de tamices y b) Vibrador mecánico para granulometría del Laboratorio de Ingeniería Química – Pesados, del ITCM.

3.5.4 *Determinación de los Límites de Consistencia.*

Los procedimientos para la determinación del Límite líquido, Límite plástico e Índice de plasticidad del suelo, conocidos como los “Límites de Atterberg” o “Límites de consistencia”, están establecidos por la norma ASTM D4318-17e1 [52], en donde se indica que la determinación de dichos límites se deben realizar a los sedimentos que pasan el tamiz de 0.425 mm (N° 40).

El Límite líquido se obtiene haciendo pruebas en las que una porción de la muestra de sedimento es colocada en una copa de bronce, la muestra se divide en dos por una herramienta ranuradora y posteriormente es dejada fluir a causa de los impactos generados por las caídas continuas de la copa en un dispositivo mecánico llamado Copa Casagrande. Existen dos métodos para la determinación del límite líquido [52]:

1. El Método A, requiere 3 o más tanteos con distintos contenidos de humedad, los datos son calculados y graficados para obtener una relación que permita determinar el límite líquido.
2. El Método B, usa los datos desde dos tanteos con un contenido de agua multiplicado por un factor de corrección para determinar el límite líquido.

El límite plástico se determina presionando la masa del suelo (tomada del ensayo previo) y formando con ella (rodándola) un hilo o rollo de 3.2 mm (1/8 de pulgada) de diámetro, obteniendo una pequeña porción de suelo plástico hasta que su contenido de agua sea reducido a un punto en el cual el rollo se quiebre y ya no pueda ser presionado y reenrollado. El contenido de agua del suelo en este punto se reporta como el límite plástico. El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

3.5.5 *Criterios de clasificación de suelos bajo la norma ASTM D2488.*

Los criterios de clasificación de suelos descritos en [51] pueden ser complementados con esta norma que establece una metodología práctica para la clasificación de suelos finos mediante un procedimiento manual-visual, en los casos que no se dispone del material suficiente para la determinación de los límites de plasticidad por que la recuperación de la muestra fue mínima debido

a la pequeña capacidad de recolección de muestra o debido a la poca cantidad de material fino propio de la muestra sedimentaria [53]. Es importante mencionar que esta determinación se realiza a los sedimentos que pasan el tamiz #40 (0.425 mm), en donde los criterios que se establecen para la asignación de una clasificación sedimentaria manual-visual son: la dureza (en seco), la dilatancia y la tenacidad.

La dureza en seco es un parámetro que establece la relación de esfuerzo que una esfera de 1/2 pulgada (12 mm) de diámetro del sedimento en estado seco es capaz de soportar al ser sometida a una presión ejercida con las manos, estableciendo 5 niveles de dureza según [53], los cuales se presentan en la tabla 3.5.2:

Tabla 3.5.2 Criterios para establecer la dureza en estado seco.

Descripción	Criterios
Nula	El espécimen en seco se desmorona con el simple contacto de los dedos.
Baja	El espécimen en seco se desmorona con un poco de presión de los dedos.
Media	El espécimen en seco se rompe en pedazos o se desmorona con una de presión considerable de los dedos.
Alta	El espécimen en seco no se rompe con la presión de los dedos. El espécimen se rompería en pedazos entre el pulgar y una superficie sólida.
Muy alta	El espécimen en seco no se rompe entre el pulgar y una superficie sólida.

La dilatancia es la relación del tiempo en la que es posible apreciar el contenido de humedad (agua) contenida sobre la superficie de una porción de muestra sedimentaria al ser sometida a una vibración y la rapidez con la que dicha agua desaparece al apretar el sedimento; en la tabla 3.5.3 se presentan los criterios de dilatancia:

Tabla 3.5.3 Criterios para establecer la dilatancia.

Descripción	Criterios
Nula	No se aprecian cambios en la superficie.
Lenta	El agua aparece lentamente en la superficie del espécimen durante la vibración y no desaparece o desaparece lentamente al apretar el sedimento.
Rápida	El agua aparece rápidamente en la superficie del espécimen durante la vibración y desaparece rápidamente al apretar el sedimento.

La tenacidad es el esfuerzo de deformación que un rollo de sedimento de 1/8 pulgada (3 mm) de diámetro es capaz de soportar antes de fracturarse o romperse, es decir al momento de llegar a su límite plástico, para determinarlo es necesario establecer unos criterios los cuales se mencionan en la tabla 3.5.4:

Tabla 3.5.4 Criterios para establecer la tenacidad.

Descripción	Criterios
Baja	Solo se requiere ligera presión para enrollar el hilo de sedimento cerca del límite plástico. El hilo y los terrones son débiles y suaves.
Media	Se requiere media presión para enrollar el hilo de sedimento cerca del límite plástico. El hilo y los terrones tienen una rigidez media.
Alta	Se requiere presión considerable para enrollar el hilo de sedimento cerca del límite plástico. El hilo y los terrones tienen muy alta rigidez.

Después de haber obtenido los parámetros de la clasificación de la porción fina mediante los criterios mencionados, se puede saber si los finos con los que cuenta la muestra son del tipo limoso o arcilloso. En la tabla 3.5.5 se presenta esta información:

Tabla 3.5.5 Identificación de suelos inorgánicos de grano fino por método manual-visual.

Clasificación	Dureza (en seco)	Dilatancia	Tenacidad
ML	Nula a baja	Lenta a rápida	Baja o los hilos no se pueden formar
CL	Media a alta	Nula a lenta	Media
MH	Baja a media	Nula a lenta	Baja a media
CH	Alta a muy alta	Nula	Alta

ML = Limo de baja plasticidad, CL = Arcilla de baja plasticidad, MH = Limo de alta plasticidad, CH = Arcilla de alta plasticidad.

3.6 Microscopía electrónica de barrido – Espectroscopía de Rayos X de energía dispersa.

La Microscopía se realizó a los sedimentos que previamente fueron clasificados granulométricamente, con la intención de conocer los tamaños de partícula y complementar los resultados obtenidos por la granulometría, utilizando un Microscopio Electrónico de barrido de la marca TESCAN-VEGA 3 con un X-Ray radiation Bruker Nano detector (XFlash Detector 410-M) propiedad del Laboratorio de Investigación en Materiales para Energía y Medio Ambiente del TECNM/Campus Cancún, obteniendo imágenes provenientes de los electrones secundarios (SE) que

nos presentan una morfología superficial de la muestra, otra imagen proveniente de los electrones retrodispersados (BSE), asociada una mayor sensibilidad a las variaciones del número atómico de los componentes, indicando que a mayor número atómico más brillante es el material de la muestra, y estableciendo las composiciones químicas elementales que fueron obtenidas por la energía de rayos X generada por la reposición de los electrones de las cercanías a los espacios liberados por los electrones secundarios.

3.7 Normas aplicables

Para el desarrollo de las diversas pruebas realizadas a los sedimentos, se procedió a revisar las normativas vigentes en México que pudieran apoyarnos como fundamento, pero ante la inexistencia de estas se utilizaron otras legislaciones que sirvieron de punto de partida para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo. Dado que el enfoque primordial fue determinar los niveles de contaminación por metales pesados en sedimentos lagunares fue necesario apegarse a la NOM-001-SEMARNAT-1996 [54] para conocer los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en bienes nacionales. De igual manera fue importante conocer algunos criterios de las concentraciones de remediación de los suelos contaminados por algunos elementos como el Arsénico, Cadmio, Cromo, Plomo entre otros considerados en la NOM-147-SEMARNAT-2004 [55]. Cabe hacer mención que estas normas no se apegan en su totalidad a las necesidades del presente trabajo, pero es viable su utilización como un punto inicial de referencia.

De acuerdo con [5], [26], son de gran apoyo las normas extranjeras ya que ellas se apegan en mayor medida a los requerimientos de este trabajo, tal es el caso de los lineamientos canadienses de calidad de sedimentos (CEQG por sus siglas en inglés) [56], [57] que presentan las concentraciones numéricas destinadas a proteger y mantener la vida acuática a lo largo de su ciclo de vida durante un periodo indefinido de exposición a sustancias presentes en los sedimentos (metales pesados), éstos parámetros se indican en la guía provisional de calidad de sedimentos. De igual manera, se utilizaron como soporte las tablas de referencia rápida de detección (SQuiRT, por sus siglas en inglés) [58], para evaluar los riesgos potenciales de los sedimentos contaminados por diversos contaminantes, establecidas por la Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA, por sus siglas en inglés).

Las diversas pruebas que se realizaron a los sedimentos se fundamentaron en los lineamientos establecidos por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), la determinación del pH en suelos se apejó a la norma ASTM-D4972 [50], en cuanto a la clasificación de suelos se utilizó de referencia la norma ASTM-D2487 [51] para la fracción gruesa de los sedimentos y debido a que las muestras contenían poca cantidad de material fino, se complementó su clasificación con la norma ASTM-D2488 [53] mediante los criterios visuales y pruebas manuales que en ahí se establecen.

4 Análisis y resultados

4.1 Identificación y delimitación del área de estudio.

El primer acercamiento que se tuvo con el área de interés fue en el mes de Septiembre de 2019 para tener una inspección visual y encontrar los puntos de acceso al embalse, posteriormente con ayuda de imágenes satelitales se pudo determinar la extensión total de la laguna obteniendo un área de $1,047,000 \text{ m}^2$, en la figura 4.1.1 se presentan 3 imágenes, en a) el mapa de la laguna, en b) la imagen satelital y en c) la extensión lagunar en m^2 , pero debido a diversas situaciones climatológicas y dificultades para acceder debido a la alta vegetación no fue posible tener acceso a toda la superficie, sin embargo se tuvo acceso a $534,284 \text{ m}^2$ con lo cual se determinó la cantidad de muestras a extraer con base en la norma respectiva [48].

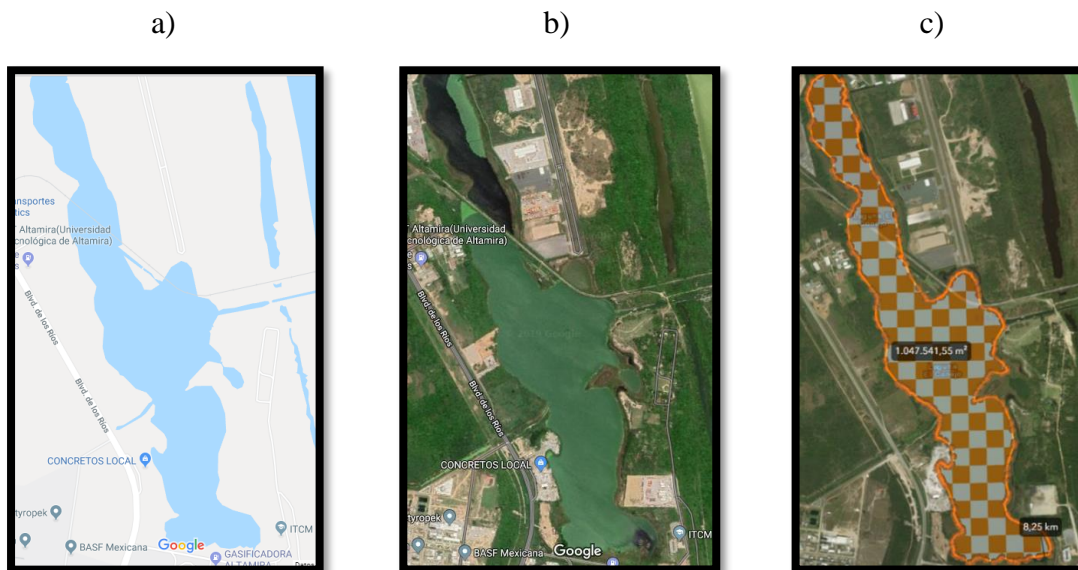


Figura 4.1.1 Extensión de la laguna El Conejo [59].

4.2 Toma de muestras.

La determinación del número de muestras a recuperar se hizo con base en el cálculo establecido en la norma [48] y que para el estudio establece una cantidad de 39 muestras necesarias y que corresponden con la extensión superficial del embalse. Se realizaron tres muestreos en diferentes épocas del año (2020); el primer muestreo se realizó en el mes de marzo, recuperando solamente 15 muestras. El segundo muestreo se llevó a cabo en el mes de junio, recuperando 39 muestras y el tercer muestreo se realizó en el mes de octubre recuperando de igual forma, 39 muestras.

La toma de muestras verticales no se logró en ninguno de los tres muestreos al no contar con el equipo adecuado; si bien se diseñó un prototipo de muestreador vertical, este no funcionó para el tipo de suelo de la laguna y por la dificultad para operarlo. En la figura 4.2.1 se muestra el prototipo diseñado para el muestreo vertical:

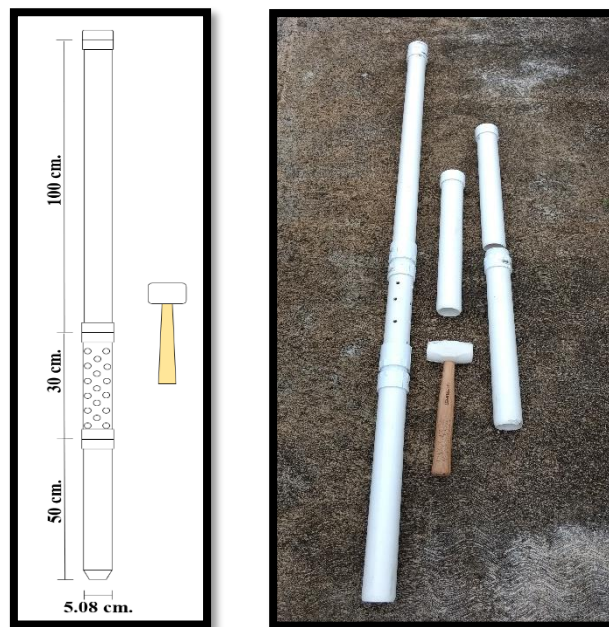


Figura 4.2.1 Prototipo de muestreo vertical

Los sedimentos recuperados en los tres muestreos fueron tomados en la interfaz agua-sedimento con una draga tipo Ekman (figura 3.2.1) en la sección norte y centro de la laguna en el primer muestreo y para el segundo muestreo se recuperaron muestras de las 3 secciones de la laguna. En la figura 4.2.2

a) y b) se presenta la localización geográfica de los 15 puntos del primer muestreo, en c) los 39 puntos del 2do y 3er muestreo y en d) el Centro de Investigación en Petroquímica del ITCM.

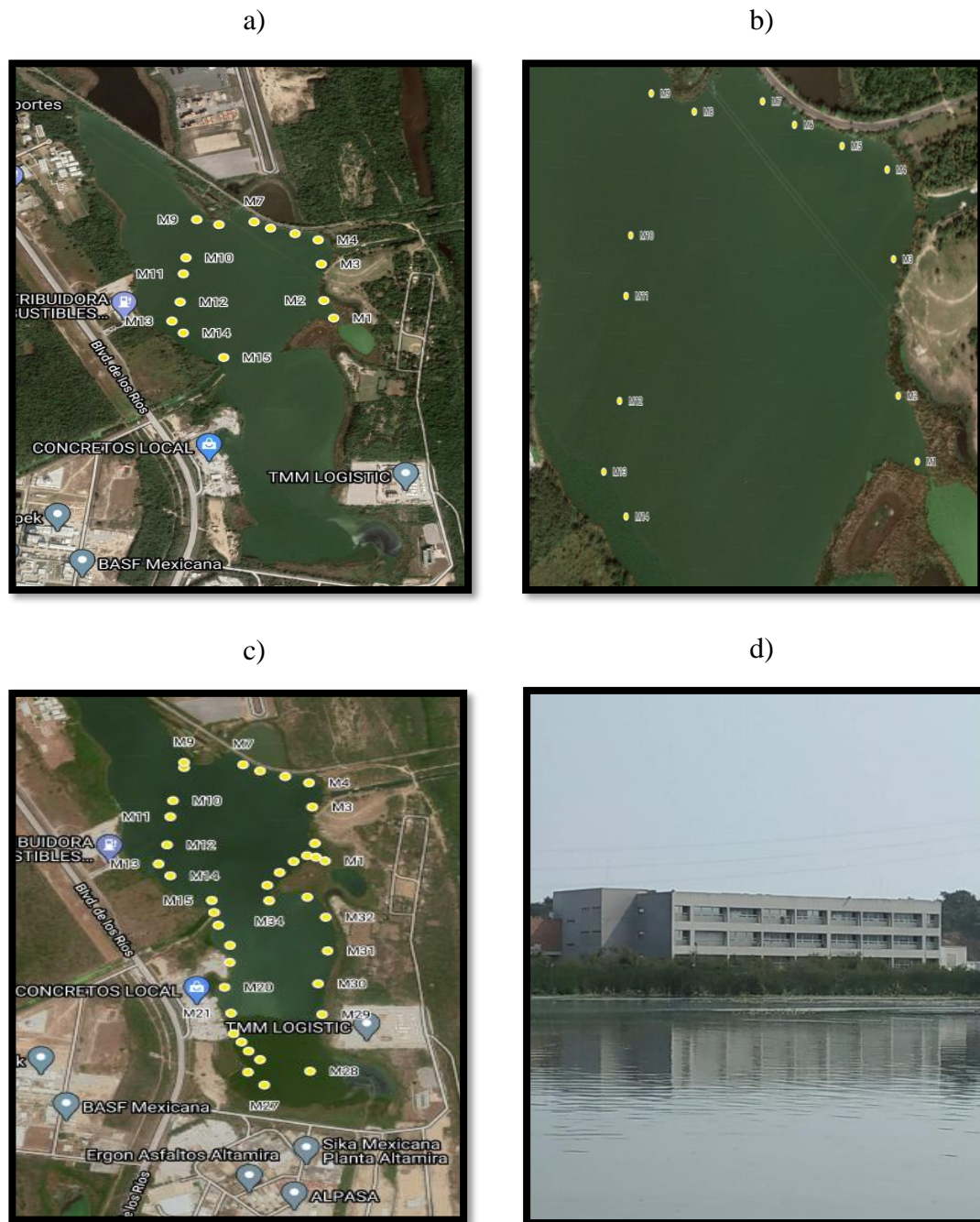


Figura 4.2.2 Zona de muestreo: a) y b) Localización geográfica de los 15 puntos del primer muestreo, c) Localización geográfica de los 39 puntos del segundo y tercer muestreo, d) Centro de Investigación en Petroquímica del ITCM.

En la tabla 4.2.2 se presentan las coordenadas geográficas de cada uno de los 39 puntos de muestreo. Cabe hacer mención que todas las muestras recuperadas fueron colocadas en bolsas de plástico con su identificación correspondiente para su traslado al laboratorio.

Tabla 4.2.2 Coordenadas de los puntos de muestreo.

Muestra	Coordenadas		Muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
1	22.42824963	-97.87964288	21	22.42221709	-97.88317524
2	22.4289167	-97.88041667	22	22.42140817	-97.88308337
3	22.4303611	-97.8805	23	22.42107	-97.88282
4	22.4313056	-97.88061111	24	22.42071	-97.88259
5	22.4315556	-97.88138889	25	22.42038	-97.88221
6	22.4317778	-97.88222222	26	22.41988516	-97.8826113
7	22.4320278	-97.88277778	27	22.41938	-97.88207
8	22.4319167	-97.88472222	28	22.41992205	-97.88057651
9	22.4321111	-97.88472222	29	22.42216626	-97.88018122
10	22.4306111	-97.88508333	30	22.42337	-97.88031
11	22.4299722	-97.88516667	31	22.42467	-97.87999
12	22.4288611	-97.88527778	32	22.42600808	-97.88006589
13	22.4281111	-97.88555556	33	22.42679	-97.88065
14	22.4276389	-97.88516667	34	22.42666	-97.88192000
15	22.4266667	-97.88380556	35	22.42726	-97.88198
16	22.42619310	-97.8837261	36	22.42776	-97.88157
17	22.42569227	-97.88359433	37	22.4282	-97.88111
18	22.42489020	-97.88320575	38	22.42843	-97.88067
19	22.42421611	-97.88321212	39	22.42837	-97.88038
20	22.42323520	-97.88338512			

4.3 Secado de las muestras

Las muestras fueron secadas en horno a una temperatura constante de 110°C durante 16 horas, posteriormente se pesaron las muestras obteniendo los siguientes resultados de cada uno de los muestreos, estos se presentan en la tabla 4.3.1:

Tabla 4.3.1 Pesos secos de los tres muestreos.

MUESTRA	PESO SECO (gr)		
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
1	175	323	314.5
2	105	179	136.6
3	86	500	88.5
4	195	509	104.3
5	289	616	152
6	543	223	79.8
7	360	155	529.4
8	345	486	71.5
9	42	118	166
10	220	185	110.8
11	90	146	159
12	60	230	95.5
13	125	208	77.1
14	267	219.5	328.7
15	303	159	106.8
16	-	296	181.9
17	-	245	419.5
18	-	489.5	67.2
19	-	385.5	196.3
20	-	490	107.5
21	-	248	96.8
22	-	474	60.7
23	-	731	253.5
24	-	420	104
25	-	307	264.5
26	-	558	134.5
27	-	571	73.4
28	-	318	93.2
29	-	278	100.8
30	-	354	94.2
31	-	277	87.1
32	-	255	74.3
33	-	595	80.8
34	-	94	80.8
35	-	153	270.9
36	-	148	321.5
37	-	320	23.5
38	-	415	229.7
39	-	430	126.3



Figura 4.3.1 Determinación de los pesos secos de las muestras de sedimentos.

El secado de las muestras es necesario para poder llevar a cabo la determinación granulométrica por la vía seca, ya que dicha prueba se debe realizar a las muestras sedimentarias carentes de humedad según lo establecido por la norma [49], la variación de los pesos de las muestras correspondientes a los tres muestreos se debió a la capacidad de recuperación de la draga que en algunos puntos se recuperó una menor cantidad de muestra.

4.4 Determinación del pH en sedimentos.

La determinación del pH en cada una de las muestras sedimentarias se realizó conforme lo establecido en la norma [41], los resultados obtenidos de cada una de las muestras de sedimento de los tres muestreos se presentan a continuación en la tabla 4.4.1:

Tabla 4.4.1 Determinación del pH en sedimentos de los tres muestreos.

Muestra	pH		
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
1	7.8	5.4	8.2
2	6.9	6.0	9.2
3	6.9	7.3	7.9
4	6.4	7.3	6.7
5	6.6	6.4	7.9
6	6.3	6.5	7.9
7	6.9	6.6	7.3
8	6.9	6.4	7.7
9	7.2	6.5	7.9
10	7.3	6.4	7.9
11	7.0	6.5	7
12	7.1	6.2	7.9
13	6.6	6.3	7.9
14	6.6	6.6	8.1
15	7.0	6.9	7.9
16	-	6.4	7.9
17	-	6.5	6.6
18	-	6.6	7.8
19	-	7.9	7.8
20	-	6.5	8.4
21	-	6.3	7.7
22	-	6.6	7.9
23	-	6.3	8
24	-	6.5	7.9
25	-	6.1	7.8
26	-	7.3	8
27	-	6.4	7.9
28	-	6.4	8
29	-	6.9	7.9
30	-	6.6	7.9
31	-	7.8	8.2
32	-	6.5	7.8
33	-	7.3	7.9
34	-	6.3	7.8
35	-	6.1	8.2
36	-	6.4	6.2
37	-	6.7	8.8
38	-	7.0	6.6
39	-	7.9	7.7

En el primer muestreo se presentaron valores neutros de pH, siendo 6.3 el valor más bajo y 7.8 el valor más alto, para el segundo muestreo se encontró un valor mínimo de 5.4 y un máximo de 7.9 siendo valores de pH de ligeramente ácidos a neutros y en el tercer muestreo el valor mínimo fue 6.2 y el máximo 9.2 valores de neutros a ligeramente alcalinos.

La relación entre el pH y la posible presencia de especies metálicas se debe a que la mayoría de ellos son insolubles en agua a valores neutros o básicos, pero son adsorbidos con facilidad por los sedimentos, los cuales al depositarse pueden llegar a las concentraciones entre 10^3 a 10^7 mayor que la columna de agua [60]. En [61] se indica que los valores de pH bajos crean un ambiente adecuado para la extracción de metales, pero cuando los valores de pH en suelo son demasiado bajos podría perjudicar a las condiciones orgánicas del mismo, impidiendo su posterior utilización con fines agrícolas.

Por otra parte, en [62] mencionan que cuando los metales se lixivian a través de los sedimentos, el azufre elemental de los suelos tiende a oxidarse dando como resultado la acidificación de los sedimentos, aunque no sería para el caso particular del presente estudio ya que los sedimentos presentan rangos de valores de pH mayoritariamente neutros.

4.5 Determinación de la conductividad en sedimentos.

La determinación de la conductividad en las muestras de sedimento se realizó posteriormente a la toma del pH; para la determinación de este parámetro es necesario que la muestra sedimentaria se encuentre en solución con agua desionizada, por ello es adecuada la toma de estos valores a las muestras que previamente se les tomó el pH.

Las lecturas obtenidas de los sedimentos de cada uno de los puntos de los tres muestreos se presentan a continuación en la tabla 4.5.1, cabe hacer mención que en la figura 4.5.1 se presenta una gráfica de distribución de los valores de conductividad de los tres muestreos para una mejor visualización de los datos.

Tabla 4.5.1 Valores de conductividad de los tres muestreos.

Muestra	Conductividad / (dS/m)		
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
1	2.166	0.81	0.036
2	2.73	1.33	0.084
3	2.336	0.5	0.486
4	2.3	0.252	1.34
5	1.555	0.478	1.5
6	1.715	0.606	1.042
7	1.196	1.596	0.086
8	1.374	0.29	0.146
9	1.998	1.474	0.066
10	5.013	0.212	0.358
11	6.23	1.452	0.218
12	4.66	0.508	1.286
13	4.05	0.81	0.806
14	1.382	1.248	0.24
15	1.25	1.32	1.064
16	-	1.128	0.33
17	-	0.33	0.058
18	-	0.188	0.222
19	-	0.582	0.498
20	-	0.52	1.654
21	-	0.88	1.158
22	-	0.632	0.47
23	-	0.44	0.2
24	-	0.326	0.61
25	-	0.476	0.284
26	-	0.48	0.704
27	-	0.98	1.394
28	-	0.42	0.842
29	-	1.444	0.388
30	-	1.132	1.304
31	-	1.264	0.244
32	-	0.844	0.768
33	-	0.608	0.764
34	-	0.95	0.808
35	-	1.446	0.222
36	-	1.772	0.224
37	-	0.54	0.76
38	-	0.398	0.46
39	-	0.78	1.074

Se encontraron valores de conductividad heterogéneos en los tres muestreos, en el primero la conductividad más baja registrada fue 1.196 dS/m y la más alta fue de 6.23 dS/m; para el segundo muestreo los valores encontrados fueron de 0.188 dS/m para el más bajo y 1.772 dS/m para el valor más alto, mientras que en el tercer se encontró que 0.036 dS/m fue el valor más bajo y 1.654 dS/m el

valor más alto. Los valores más altos se encontraron en el primer muestreo y los valores más bajos se presentaron en el tercer muestreo. La conductividad eléctrica está asociada al contenido de sales presentes en los sedimentos considerando que, a mayor concentración de sales en los suelos, mayor será la conductividad que presenten.

La norma mexicana [63] establece los rangos de los valores de conductividad para considerar la salinidad de los suelos, en la tabla 4.5.2 se presenta esta información:

Tabla 4.5.2 Salinidad de un suelo de acuerdo con su conductividad electrica.

Conductividad dS/m	Suelo (Criterio de salinidad)
< 1.0	Efectos despreciables de salinidad
1.1 – 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino.

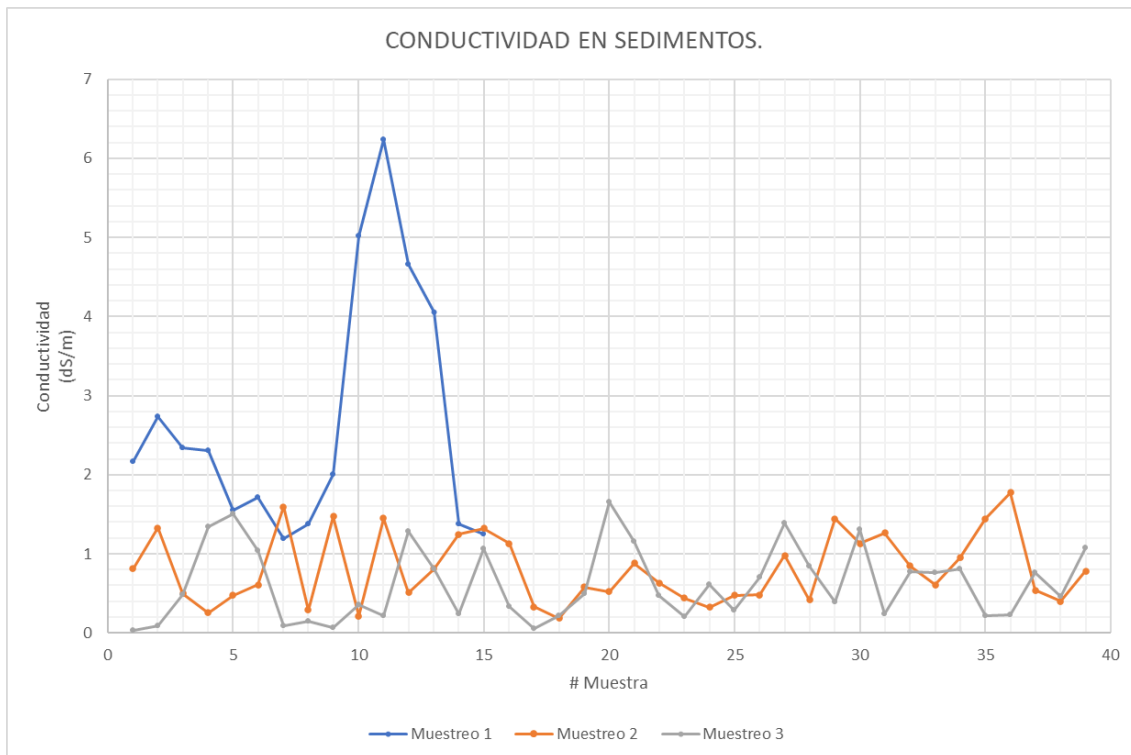


Figura 4.5.1 Conductividad en sedimentos de los tres muestreos.

En la figura 4.5.1 se observa una variación en el comportamiento de los valores de conductividad del primer muestreo con respecto a los del segundo y tercer muestreo, presentando mayores valores de conductividad obtenidos en el primer muestreo en comparación con los dos muestreos restantes; de acuerdo con estos datos y lo establecido en la norma [63] se considera que los suelos correspondientes al primer muestreo presentan una salinidad de ligeramente salina a salina, y en el segundo y tercer muestreo los suelos presentan una salinidad de muy ligeramente salino a despreciable.

Se analizaron estadísticamente los valores obtenidos del pH y conductividad de cada uno de los muestreos, determinando el promedio, la varianza y la desviación estándar, estos datos se presentan en la tabla 4.5.3:

Tabla 4.5.3 Datos estadísticos del pH y la conductividad.

	MUESTREO 1		MUESTREO 2		MUESTREO 3	
	pH	Conductividad	pH	Conductividad	pH	Conductividad
Promedio	6.90	2.66	6.63	0.81	7.80	0.62
Varianza	0.13	2.31	0.26	0.19	0.30	0.21
Desv. Std.	0.37	1.52	0.51	0.44	0.55	0.46

De acuerdo con los datos que se presentan en la tabla 4.5.3 se puede observar que no hubo una variación considerable en los valores promedio del pH en los tres muestreos, pero si hay una variación en los valores obtenidos de la conductividad del primer muestreo con respecto al segundo y tercero, así como la varianza y la desviación estándar. Se observa que los datos de la conductividad del primer muestreo presentan una mayor dispersión en comparación con los muestreos restantes. En las figuras 4.5.2 – 4.5.4 se presentan las gráficas de dispersión de los valores de pH y conductividad de los tres muestreos:

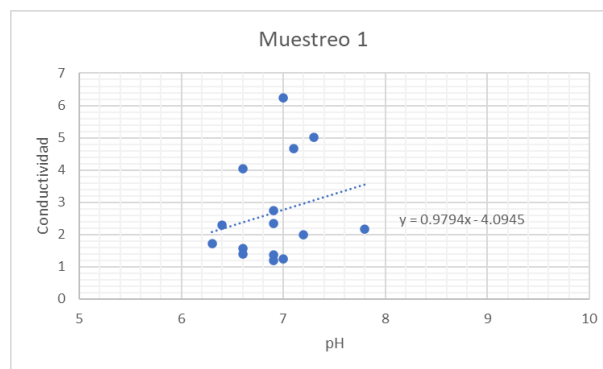


Figura 4.5.2 Gráfica de pH y conductividad M1.

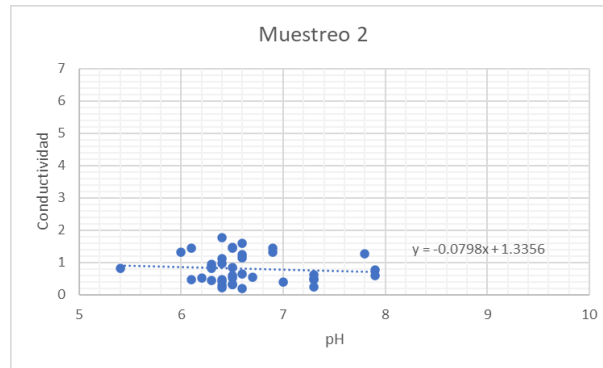


Figura 4.5.3 Gráfica de pH y conductividad M2.

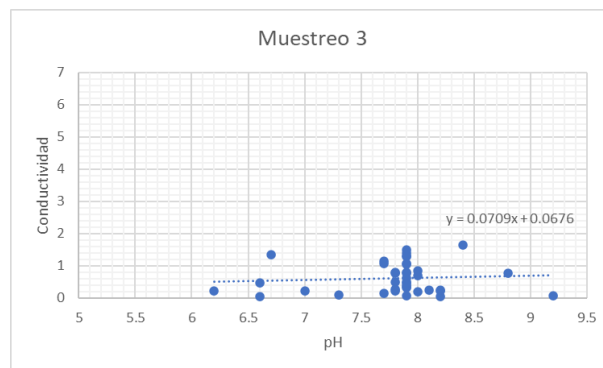


Figura 4.5.4 Gráfica de pH y conductividad M3.

La variación de la conductividad observada en los sedimentos del primer muestreo podría estar asociada al comportamiento climático de la fecha del muestreo y a los niveles de precipitación que se presentaron, el reporte de la CONAGUA [64] muestra que durante los primeros meses de 2020 los valores de precipitación fueron bajos, considerando que el primer muestreo se realizó en el mes de marzo, y a partir del mes de mayo hubo un incremento de los niveles de precipitación registrados los cuales continuaron hasta el mes de septiembre, es decir estos valores contemplan el segundo muestreo y el comienzo del tercero, por otra parte, el valor de la conductividad también puede tener relación en cierta medida con la composición sedimentaria de la muestra en donde se pueden presentar carbonatos, sulfatos, así como iones de magnesio, sodio, calcio, etc. Con la finalidad de obtener más información sobre el comportamiento de los valores de la conductividad y pH, se obtuvieron estos parámetros a cada uno de los diferentes tamaños de partícula de los sedimentos del tercer muestreo considerando 7 secciones según las diferentes aberturas de los tamices utilizados en la prueba de determinación granulométrica, estos datos se presentan en la tabla 4.5.4:

Tabla 4.5.4 pH y conductividad por secciones de muestra sedimentaria (M3).

Muestra	Apertura del tamiz													
	#10 (2 mm)		#18 (1 mm)		#40 (0.425 mm)		#80 (0.180 mm)		#140 (0.106 mm)		#200 (0.075 mm)		Fondo	
	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)
1	7.2	0.48	7.1	0.348	7.2	0.32	6.8	0.282	7.3	0.196	6.7	0.206	6.7	0.202
2	7.2	0.414	7.1	0.32	6.5	0.614	6.6	0.302	6.1	0.158	6.6	0.11	6.6	0.074
3	6.6	0.88	6.6	0.84	6.3	0.58	6.4	0.43	6.4	0.312	6.6	0.228	6.6	0.3
4	6.6	0.78	6.6	0.816	6.3	0.816	6.2	0.426	6.0	0.342	6.0	0.228	6.6	0.168
5	6.6	1.8	6.6	1.138	6.6	0.752	6.4	0.52	6.5	0.364	6.6	0.252	6.7	0.3
6	6.5	1.944	6.1	0.74	7.4	0.78	8.3	0.382	8.6	0.466	11.2	0.348	11.8	0.174
7	8.0	0.8	9.6	0.474	7.3	0.432	6.7	0.128	7.1	0.108	11.0	0.118	11.4	0.138
8	6.7	0.326	6.2	0.294	7.3	0.34	7.2	0.298	8.0	0.128	6.7	0.074	6.6	0.062
9	6.8	0.712	6.3	0.48	7.2	0.538	6.8	0.48	7.3	0.218	6.7	0.148	6.6	0.082
10	7.4	0.536	6.8	0.268	7.0	0.524	6.9	0.452	7.3	0.246	6.7	0.206	7.4	0.2
11	6.7	0.136	6.7	0.188	6.8	0.308	6.7	0.3	6.6	0.216	6.8	0.188	6.6	0.054
12	10.6	1.082	11.3	0.96	9.4	0.676	7.8	0.58	6.5	0.444	12.1	0.284	11.3	0.142
13	6.6	1.248	6.7	0.88	6.1	0.672	6.1	0.434	6.2	0.398	6.5	0.378	6.6	0.184
14	10.2	0.22	11.0	0.576	10.4	0.462	5.3	0.288	6.1	0.226	11.5	0.188	12.0	0.3
15	6.7	0.962	6.8	1.208	6.7	0.93	6.7	0.884	6.7	0.18	6.8	0.042	6.9	0.014
16	9.8	0.344	10.0	0.24	8.0	0.348	8.0	0.208	8.2	0.302	11.3	0.14	9.0	0.256
17	6.8	0.38	6.8	0.672	6.7	0.52	6.8	0.22	6.7	0.202	6.9	0.196	6.8	0.144
18	6.8	0.636	6.8	0.47	6.6	0.434	6.6	0.508	6.7	0.176	6.9	0.144	6.8	0.188
19	7.2	0.34	7.3	0.742	8.0	0.536	12.0	0.412	12.0	0.252	6.7	0.058	6.8	0.242
20	11.3	0.508	11.0	0.846	8.1	0.842	9.0	0.498	8.0	0.158	12.0	0.206	11.4	0.258
21	10.3	0.464	10.2	0.56	8.2	0.604	6.7	0.276	6.4	0.178	11.0	0.21	10.9	0.416
22	11.0	0.844	10.7	0.74	9.0	0.486	8.0	0.392	8.5	0.276	10.2	0.188	11.0	0.328
23	10.7	0.5	10.1	0.52	6.1	0.54	7.3	0.62	8.0	0.18	9.5	0.168	10.5	0.242
24	12.2	0.358	12.4	0.466	7.7	0.374	8.8	0.498	8.3	0.144	11.8	0.1	11.0	0.244
25	11.5	0.76	11.6	0.602	7.9	0.482	5.4	0.414	6.0	0.074	10.0	0.058	7.8	0.092
26	10.7	0.5	11.0	0.612	7.6	0.33	9.5	0.54	9.8	0.27	11.0	0.206	11.5	0.232
27	11.7	1.12	11.8	1.32	11.3	0.998	8.8	0.52	9.7	0.64	11.7	0.446	12.0	0.158
28	11.9	0.64	11.5	0.84	7.9	1.252	8.3	0.498	8.6	0.466	11.0	0.272	10.7	0.268
29	11.4	0.776	11.5	0.466	6.6	0.402	6.6	0.416	6.6	0.178	6.8	0.226	6.7	0.428

Muestra	Apertura del tamiz													
	#10 (2 mm)		#18 (1 mm)		#40 (0.425 mm)		#80 (0.180 mm)		#140 (0.106 mm)		#200 (0.075 mm)		Fondo	
	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)	pH	Cond. (dS/m)
30	6.7	0.954	6.8	1.032	6.8	0.88	6.8	0.712	6.8	0.48	6.7	0.312	6.7	0.312
31	6.7	0.74	6.7	0.848	6.7	1.09	6.8	1.044	6.7	0.488	6.8	0.254	6.8	0.608
32	6.8	0.914	6.7	0.748	6.7	0.636	6.8	0.52	6.8	0.332	6.8	0.198	6.8	0.338
33	10.0	1.068	10.0	0.72	7.3	0.586	4.9	0.466	5.0	0.454	9.7	0.32	10.0	0.208
34	10.4	0.628	10.3	0.614	9.3	0.948	7.5	0.344	8.7	0.432	10.7	0.392	9.4	0.508
35	9.7	0.44	10.0	0.68	8.7	0.418	8.8	0.24	7.8	0.132	9.8	0.118	9.6	0.226
36	9.9	0.918	9.9	0.522	8.9	0.412	8.5	0.396	9.9	0.296	11.0	0.378	10.1	0.238
37	9.6	1.21	9.8	1.012	8.8	0.76	7.9	0.446	8.2	0.34	10.0	0.396	10.3	0.172
38	9.9	1.438	10.4	1.308	9.1	1.026	6.9	0.678	8.0	0.398	8.4	0.07	10.1	0.052
39	10.1	1.754	10.0	0.56	8.8	0.494	6.8	0.6	6.0	0.476	10.2	0.16	11.0	0.428

Los valores de conductividad que se presentaron en cada uno de los diversos tamaños de partícula del 3er muestreo indican que la salinidad va de muy ligeramente salino a despreciable, mientras que los valores de pH fueron heterogéneos, mostrando un incremento en dicho valor a partir de la muestra #20 a la #39 presentado valores que van desde 6.7 hasta 12.2 los cuales son clasificados por la norma [63] como neutros a fuertemente alcalinos, es importante mencionar que estas muestras fueron recuperadas en la sección sur de la laguna.

A continuación, en las figuras 4.5.2 y 4.5.3 se presentan las gráficas de los valores de pH y conductividad por secciones de los sedimentos del tercer muestreo con la finalidad de visualizar mejor los datos recabados.

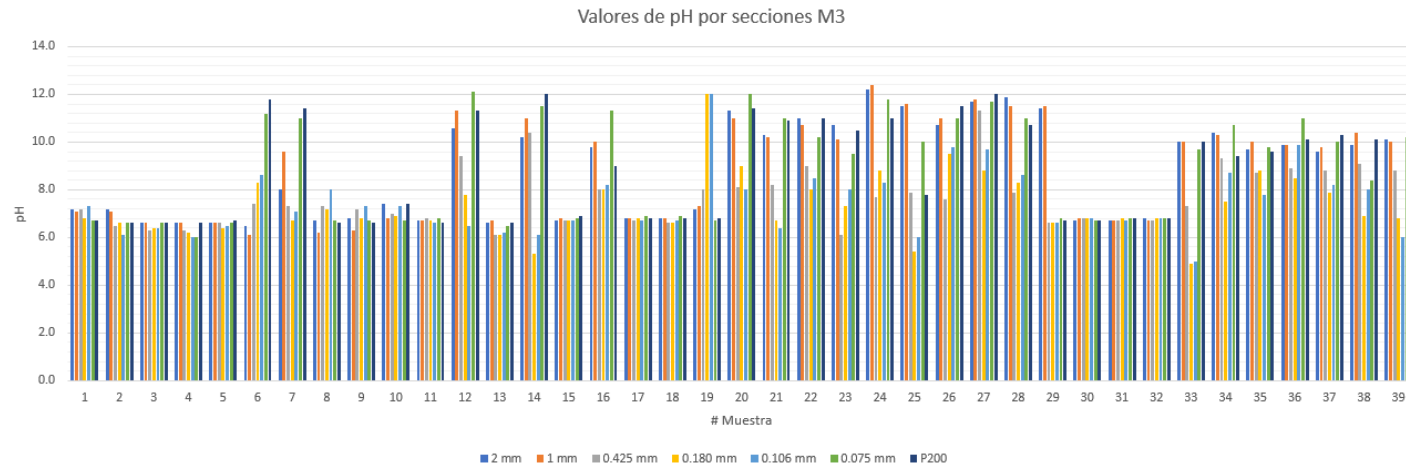


Figura 4.5.5 Gráfica de pH por secciones del tercer muestreo.

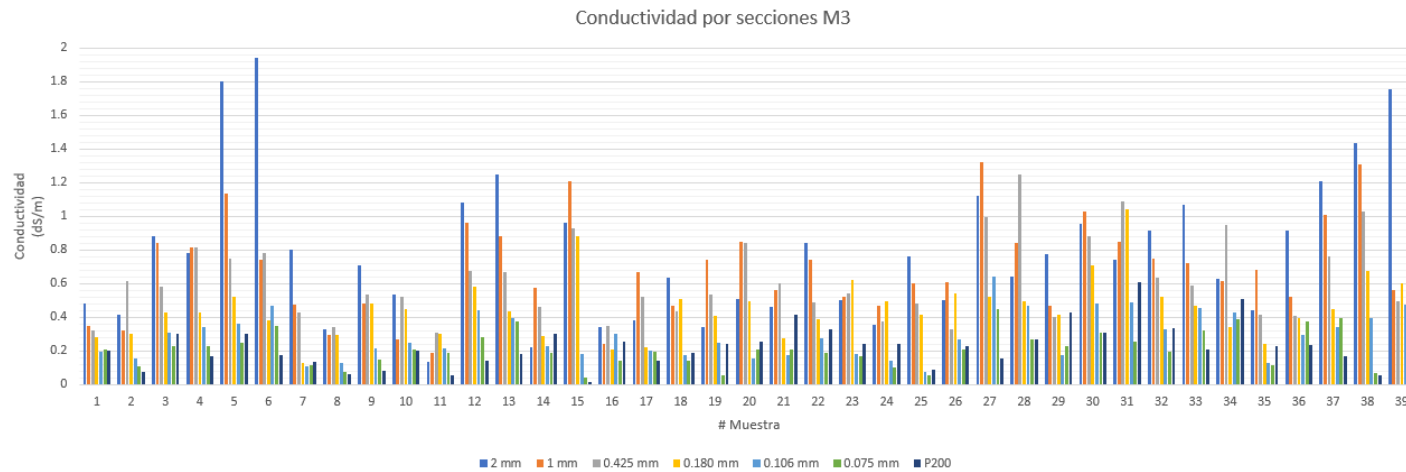


Figura 4.5.6 Gráfica de conductividad por secciones del tercer muestreo.

4.6 Determinación granulométrica.

Es de suma importancia para el presente estudio la determinación granulométrica ya que con ella se puede identificar la textura del suelo sujeto a análisis, sometiendo a las muestras al tamizado, analizando los pesos retenidos por las mallas (#4, #10, #18, #40, #80, #140, #200 y Pasa 200) que determinarán la proporción de gravas, arenas y finos de cada muestra, asociando los resultados a las texturas del tipo grueso o fino de los sedimentos según sea el caso. Los valores obtenidos de la determinación granulométrica bajo el SUCS aplicados a las muestras correspondientes a los tres muestreos se presentan en las tablas 4.6.1 - 4.6.9:

Tabla 4.6.1 Porcentaje granulométrico y clasificación textural de los tres muestreos.

Muestra	Muestreo 1				Muestreo 2				Muestreo 3			
	% G	% A	% F	Text.	% G	% A	% F	Text.	% G	% A	% F	Text.
1	0	92	8	G	0	100	0	G	0	99	1	G
2	0	20	80	F	0	98	2	G	0	99	1	G
3	0	91	9	G	0	99	1	G	0	94	6	G
4	0	94	6	G	0	99	1	G	0	96	4	G
5	2	93	5	G	0	99	1	G	0	99	1	G
6	2	95	3	G	0	98	2	G	0	96	4	G
7	0	95	5	G	0	95	5	G	0	100	0	G
8	0	96	4	G	0	99	1	G	0	98	2	G
9	0	45	55	F	0	95	5	G	0	98	2	G
10	0	63	37	G	0	92	8	G	0	96	4	G
11	0	22	78	F	0	91	9	G	0	99	1	G
12	0	22	78	F	0	91	9	G	0	99	1	G
13	0	21	79	F	0	89	11	G	0	95	5	G
14	2	93	5	G	0	96	4	G	0	99	1	G
15	0	98	2	G	0	95	5	G	0	99	1	G
16	-	-	-	-	0	99	1	G	0	87	13	G
17	-	-	-	-	0	99	1	G	0	100	0	G
18	-	-	-	-	0	99	1	G	0	97	3	G
19	-	-	-	-	0	99	1	G	0	98	2	G
20	-	-	-	-	0	99	1	G	0	92	8	G
21	-	-	-	-	0	99	1	G	0	92	8	G
22	-	-	-	-	0	99	1	G	0	91	9	G
23	-	-	-	-	0	100	0	G	0	99	1	G
24	-	-	-	-	0	97	3	G	0	93	7	G
25	-	-	-	-	0	99	1	G	0	99	1	G
26	-	-	-	-	0	99	1	G	0	92	8	G
27	-	-	-	-	0	99	1	G	0	96	4	G
28	-	-	-	-	0	99	1	G	0	98	2	G
29	-	-	-	-	0	96	4	G	0	82	18	G
30	-	-	-	-	0	97	3	G	0	95	5	G
31	-	-	-	-	0	98	2	G	0	86	14	G

Muestra	Muestreo 1				Muestreo 2				Muestreo 3			
	% G	% A	% F	Text.	% G	% A	% F	Text.	% G	% A	% F	Text.
32	-	-	-	-	0	99	1	G	0	88	12	G
33	-	-	-	-	0	99	1	G	0	88	12	G
34	-	-	-	-	0	96	4	G	0	83	17	G
35	-	-	-	-	0	96	4	G	0	99	1	G
36	-	-	-	-	0	96	4	G	0	95	5	G
37	-	-	-	-	0	99	1	G	0	97	3	G
38	-	-	-	-	0	99	1	G	0	100	0	G
39	-	-	-	-	0	99	1	G	0	84	16	G

Textura = G: Gruesa, F: Fina.

%G = %Gravas, %A = %Arenas, %F = %Finos.

Los datos que se obtuvieron del análisis granulométrico para el tipo de textura del suelo fueron del tipo grueso en su totalidad de los sedimentos correspondientes al segundo y tercer muestreo, encontrando algunas muestras de textura fina en el primer muestreo (5 de 15 muestras). Con los datos del porcentaje de gravas, arenas y finos de cada muestreo se procedió a elaborar las curvas granulométricas que nos indican el tamaño de partícula correspondiente al 10%, 30% y 60% del material que pasa las mallas, estos valores son necesarios para la determinación de los coeficientes de uniformidad y curvatura, elementos indispensables para la caracterización sedimentaria según lo establecido por el SUCS. En la figura 4.6.1 se presenta un ejemplo de la curva granulométrica correspondiente a la muestra #1 del primer muestreo.

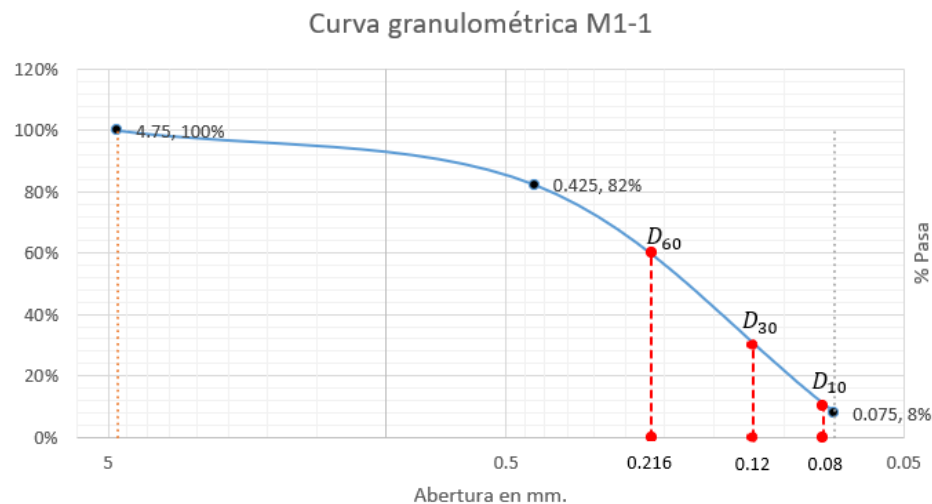


Figura 4.6.1 Curva granulométrica.

Se puede observar que la gráfica presentada es del tipo semilogarítmico, el eje de las abscisas que presenta la abertura de los tamices utilizados en la granulometría en mm se encuentra en escala logarítmica y el eje ordenado que localiza el porcentaje del material que pasa los tamices utilizados se encuentra en escala lineal, este tipo de gráfica es utilizado debido al gran rango de tamaños de partícula que presentan los suelos, y con la intención de que sean gráficas de menor tamaño.

Una vez obtenidos los valores D_{60} , D_{30} y D_{10} de las curvas granulométricas, es necesario determinar los coeficientes de uniformidad y curvatura los cuales se obtienen de la siguiente manera: Para determinar el coeficiente de uniformidad (C_u) se debe dividir el valor de D_{60} entre el valor de D_{10} y para obtener el coeficiente de curvatura se deberá dividir el cuadrado de D_{30} entre el producto de D_{10} por D_{60} , en la tabla 4.6.2 se presentan los valores de los coeficientes de uniformidad y curvatura de todos los sedimentos de los tres muestreos:

Tabla 4.6.2 Coeficientes de uniformidad y curvatura de los tres muestreos.

Muestra	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	C_u	C_c	C_u	C_c	C_u	C_c
1	2.7	0.8	5.5	0.6	2.2	0.9
2	N. A.	N. A.	9.0	0.7	2.3	0.8
3	2.6	0.8	2.7	0.8	8.4	0.6
4	2.2	0.9	2.5	0.8	9.8	0.7
5	2.3	0.9	2.8	0.8	8.7	0.7
6	2.2	0.8	5.3	0.6	10.0	1.2
7	2.2	0.9	11.3	1.3	2.2	0.8
8	2.6	0.8	2.2	0.9	2.9	0.8
9	N. A.	N. A.	10.5	1.0	2.7	0.8
10	N. A.	N. A.	13.0	1.2	3.4	0.8
11	N. A.	N. A.	11.0	0.8	2.2	0.8
12	N. A.	N. A.	8.4	0.6	9.2	0.9
13	N. A.	N. A.	12.7	0.9	9.5	0.7
14	2.3	0.9	9.2	0.7	2.2	0.9
15	2.2	0.8	9.7	0.8	7.7	0.6
16	-	-	4.2	0.7	N. A.	N. A.
17	-	-	2.3	0.8	2.1	0.8
18	-	-	2.2	0.9	3.1	0.8
19	-	-	2.2	0.9	2.8	0.8
20	-	-	2.1	0.9	10.0	0.7
21	-	-	2.2	0.9	7.8	0.6
22	-	-	2.1	0.9	7.5	0.6
23	-	-	2.1	0.9	2.3	0.8
24	-	-	2.7	0.8	5.9	0.6
25	-	-	2.4	0.8	2.4	0.8
26	-	-	2.3	0.8	6.3	0.6
27	-	-	2.2	0.9	7.1	0.6

Muestra	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	C_u	C_c	C_u	C_c	C_u	C_c
28	-	-	4.2	0.7	8.6	0.6
29	-	-	8.2	0.6	N. A.	N. A.
30	-	-	3.3	0.7	10.0	0.8
31	-	-	6.0	0.6	N. A.	N. A.
32	-	-	5.3	0.6	N. A.	N. A.
33	-	-	2.3	0.8	N. A.	N. A.
34	-	-	6.3	0.6	N. A.	N. A.
35	-	-	10.0	0.8	2.2	0.9
36	-	-	10.4	1.2	3.2	0.8
37	-	-	2.1	0.8	4.9	1.0
38	-	-	2.3	0.8	8.5	0.8
39	-	-	2.8	0.8	N. A.	N. A.

N. A. = No aplica

Para los casos que se muestran en la tabla en los que se aprecia N.A. en los coeficientes de uniformidad o curvatura se debe a que en las curvas granulométricas no fue posible identificar alguno de los valores correspondientes a D_{10} , D_{30} o D_{60} siendo esto un indicador de que existe una proporción considerable de material de tamaño menor a 0.075 mm (finos) y es necesario determinar los límites de consistencia o considerar la clasificación por medio de los parámetros manuales-visuales establecidos en [53] para poder clasificar el suelo según [51]. Los valores de los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) de las muestras de textura gruesa, son indispensables para caracterizar físicamente un suelo grueso según lo establecido por el SUCS, con base en estos datos se obtuvo la clasificación sedimentaria del primer muestreo (tabla 4.6.3):

Tabla 4.6.3 Tipo de suelo correspondiente a los sedimentos del primer muestreo.

Muestra	C_u	C_c	LL	IP	CLASIFICACIÓN
1	2.7	0.83	63	18	Arena mal graduada limosa
2	N.A.	N.A.	44	28	Arcilla de baja plasticidad
3	2.59	0.83	59	16	Arena mal graduada limosa
4	2.17	0.86	50	18	Arena mal graduada limosa
5	2.26	0.87	N.A.	N.A.	Arena mal graduada
6	2.23	0.84	N.A.	N.A.	Arena mal graduada
7	2.19	0.85	N.A.	N.A.	Arena mal graduada
8	2.58	0.82	N.A.	N.A.	Arena mal graduada
9	N.A.	N.A.	39	26	Arcilla de baja plasticidad
10	0	0	83	28	Arena limosa
11	N.A.	N.A.	43	30	Arcilla de baja plasticidad
12	N.A.	N.A.	34	22	Arcilla de baja plasticidad
13	N.A.	N.A.	37	24	Arcilla de baja plasticidad
14	2.25	0.85	72	22	Arena mal graduada limosa
15	2.24	0.83	N.A.	N.A.	Arena mal graduada

N. A. = No aplica

La clasificación granulométrica de los sedimentos correspondientes al segundo y tercer muestreo se realizó con base a lo establecido en [53], debido a que no se contaba con la cantidad suficiente de material fino para determinar los límites de consistencia. Se establecieron los parámetros de dureza, dilatancia y tenacidad de los sedimentos para poder clasificarlos. En la tabla 4.6.4 se presentan los parámetros mencionados para el segundo muestreo:

Tabla 4.6.4 Clasificación sedimentaria correspondiente al segundo muestreo.

Muestra	Dureza	Dilatancia	Tenacidad	% Finos	C_u	C_c	CLASIFICACIÓN
1	-	-	-	0	5.5	0.6	Arena mal graduada
2	-	-	-	2	9.0	0.7	Arena mal graduada
3	-	-	-	1	2.7	0.8	Arena mal graduada
4	-	-	-	1	2.5	0.8	Arena mal graduada
5	-	-	-	1	2.8	0.8	Arena mal graduada
6	-	-	-	2	5.3	0.6	Arena mal graduada
7	-	-	-	5	11.3	1.3	Arena bien graduada
8	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
9	-	-	-	5	10.5	1.0	Arena bien graduada
10	Baja	Lenta	Baja	8	13.0	1.2	Arena bien graduada limosa
11	Baja	Lenta	Baja	9	11.0	0.8	Arena bien graduada limosa
12	Baja	Lenta	Baja	9	8.4	0.6	Arena bien graduada limosa
13	Baja	Lenta	Baja	11	12.7	0.9	Arena bien graduada limosa
14	-	-	-	4	9.2	0.7	Arena mal graduada
15	-	-	-	5	9.7	0.8	Arena mal graduada
16	-	-	-	1	4.2	0.7	Arena mal graduada
17	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
18	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
19	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
20	-	-	-	1	2.1	0.9	Arena mal graduada
21	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
22	-	-	-	1	2.1	0.9	Arena mal graduada
23	-	-	-	0	2.1	0.9	Arena mal graduada
24	-	-	-	3	2.7	0.8	Arena mal graduada
25	-	-	-	1	2.4	0.8	Arena mal graduada
26	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
27	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
28	-	-	-	1	4.2	0.7	Arena mal graduada
29	-	-	-	4	8.2	0.6	Arena mal graduada
30	-	-	-	3	3.3	0.7	Arena mal graduada
31	-	-	-	2	6.0	0.6	Arena mal graduada
32	-	-	-	1	5.3	0.6	Arena mal graduada
33	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
34	-	-	-	4	6.3	0.6	Arena mal graduada
35	-	-	-	4	10.0	0.8	Arena mal graduada
36	-	-	-	4	10.4	1.2	Arena bien graduada
37	-	-	-	1	2.1	0.8	Arena mal graduada

Muestra	Dureza	Dilatancia	Tenacidad	% Finos	C_u	C_c	CLASIFICACIÓN
38	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
39	-	-	-	1	2.8	0.8	Arena mal graduada

Para el tercer muestreo se clasificó el sedimento de igual forma que en muestreo anterior, los parámetros de dureza, dilatancia y tenacidad se asocian a la clasificación sedimentaria que se muestra en la tabla 4.6.5:

Tabla 4.6.5 Clasificación sedimentaria correspondiente al tercer muestreo.

Muestra	Dureza	Dilatancia	Tenacidad	% Finos	C_u	C_c	CLASIFICACIÓN
1	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
2	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
3	Baja	Lenta	Baja	6	8.4	0.6	Arena bien graduada limosa
4	-	-	-	4	9.8	0.7	Arena mal graduada
5	-	-	-	1	8.7	0.7	Arena mal graduada
6	-	-	-	4	10.0	1.2	Arena limosa
7	-	-	-	0	2.2	0.8	Arena mal graduada
8	-	-	-	2	2.9	0.8	Arena mal graduada
9	-	-	-	2	2.7	0.8	Arena mal graduada
10	-	-	-	4	3.4	0.8	Arena mal graduada
11	-	-	-	1	2.2	0.8	Arena mal graduada
12	-	-	-	1	9.2	0.9	Arena mal graduada
13	-	-	-	5	9.5	0.7	Arena mal graduada
14	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
15	-	-	-	1	7.7	0.6	Arena mal graduada
16	Baja	Lenta	Media	13	N. A.	N. A.	Arena limosa
17	-	-	-	0	2.1	0.8	Arena mal graduada
18	-	-	-	3	3.1	0.8	Arena mal graduada
19	-	-	-	2	2.8	0.8	Arena mal graduada
20	Baja	Lenta	Baja	8	10.0	0.7	Arena bien graduada limosa
21	Baja	Lenta	Baja	8	7.8	0.6	Arena bien graduada limosa
22	Baja	Lenta	Baja	9	7.5	0.6	Arena bien graduada limosa
23	-	-	-	1	2.3	0.8	Arena mal graduada
24	Baja	Lenta	Baja	7	5.9	0.6	Arena bien graduada limosa
25	-	-	-	1	2.4	0.8	Arena mal graduada
26	Baja	Lenta	Baja	8	6.3	0.6	Arena bien graduada limosa
27	-	-	-	4	7.1	0.6	Arena mal graduada
28	-	-	-	2	8.6	0.6	Arena mal graduada
29	Baja	Lenta	Media	18	N. A.	N. A.	Arena limosa
30	-	-	-	5	10.0	0.8	Arena mal graduada

Muestra	Dureza	Dilatancia	Tenacidad	% Finos	C_u	C_c	CLASIFICACIÓN
31	Baja	Lenta	Media	14	N. A.	N. A.	Arena limosa
32	Baja	Lenta	Media	12	N. A.	N. A.	Arena limosa
33	Baja	Lenta	Media	12	N. A.	N. A.	Arena limosa
34	Baja	Lenta	Media	17	N. A.	N. A.	Arena limosa
35	-	-	-	1	2.2	0.9	Arena mal graduada
36	-	-	-	5	3.2	0.8	Arena mal graduada
37	-	-	-	3	4.9	1.0	Arena mal graduada
38	-	-	-	0	8.5	0.8	Arena mal graduada
39	Baja	Lenta	Media	16	N. A.	N. A.	Arena limosa

De acuerdo con los datos obtenidos del análisis granulométrico realizado a las 15 muestras recuperadas del primer muestreo se encontró que el 67% de ellas, es decir, 10 de las 15 muestras presentan una textura gruesa de las cuales 5 muestras cuentan con menos del 5% de finos, 4 de ellas presentan entre un 5-12% de finos y solo 1 muestra presenta un porcentaje de finos mayor al 12%. Con estos valores y los obtenidos de las curvas granulométricas se determinó que el suelo es del tipo arenoso. Por otra parte, el 33% restante de las muestras (5 de las 15) presentó una textura fina mostrando valores de Límite líquido e Índice de plasticidad correspondientes a una arcilla de baja plasticidad.

En el segundo muestreo se encontró que, de las 39 muestras obtenidas, el 100% presenta una textura gruesa y en cuanto a la proporción de material fino en su composición, 35 muestras (89.7%) contienen menos del 5% de finos y solamente 4 muestras (10.3%) presentan un rango de finos entre 8% – 11%. Con estos valores fue posible la determinación de los coeficientes de uniformidad y curvatura clasificando de acuerdo con el SUCS como arenas mal graduadas a las 35 muestras y como arenas bien graduadas limosas a las 4 muestras restantes.

Para el tercer muestreo se determinó que el 100% de las muestras presentan una textura gruesa, en donde 26 muestras contienen menos del 5% de finos y 13 muestras cuentan con porcentajes de finos mayores al 5%, clasificando los sedimentos desde arenas mal graduadas hasta arenas bien graduadas limosas según los criterios establecidos por el SUCS.

En [65] se indica que los metales pesados tienden a asociarse con la fracción fina de los sedimentos lagunares y en [66] mencionan que los metales pesados que se presentan con frecuencia asociados a los sedimentos son el Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn.

4.7 Microscopía electrónica de barrido y Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva.

Un grupo de sedimentos correspondientes al tercer muestreo fueron los elegidos para realizarle la prueba SEM, el criterio utilizado para la elección de las muestras fue el valor obtenido de conductividad (mayores y menores valores), el objetivo de la prueba fue visualizar el tamaño de partícula que conforma el sedimento, y para la identificación de los elementos que componen dicho material sedimentario se realizó la técnica EDS, con la intención de identificar alguna especie metálica.

En [65], [67] se menciona que los sedimentos que presentan una textura fina, tienden a tener la presencia de elementos metálicos debido en mayor medida a la superficie específica que presentan las partículas finas como arcillas, debido al fenómeno de adsorción superficial.

De la microscopía se obtuvieron imágenes correspondientes a las señales emitidas por los electrones secundarios (SE) y los retrodispersados (BSE) comprendidos en un campo de visión de 2.14 mm lineales estableciendo un área de cobertura de 4.58 mm². A continuación, se presentan las imágenes obtenidas de dos muestras (#4 y #8) en sus diferentes secciones de tamaño de grano, en las figuras 4.7.1 a la 4.7.7 se presentan las microscopias de cada sección de la muestra #4:

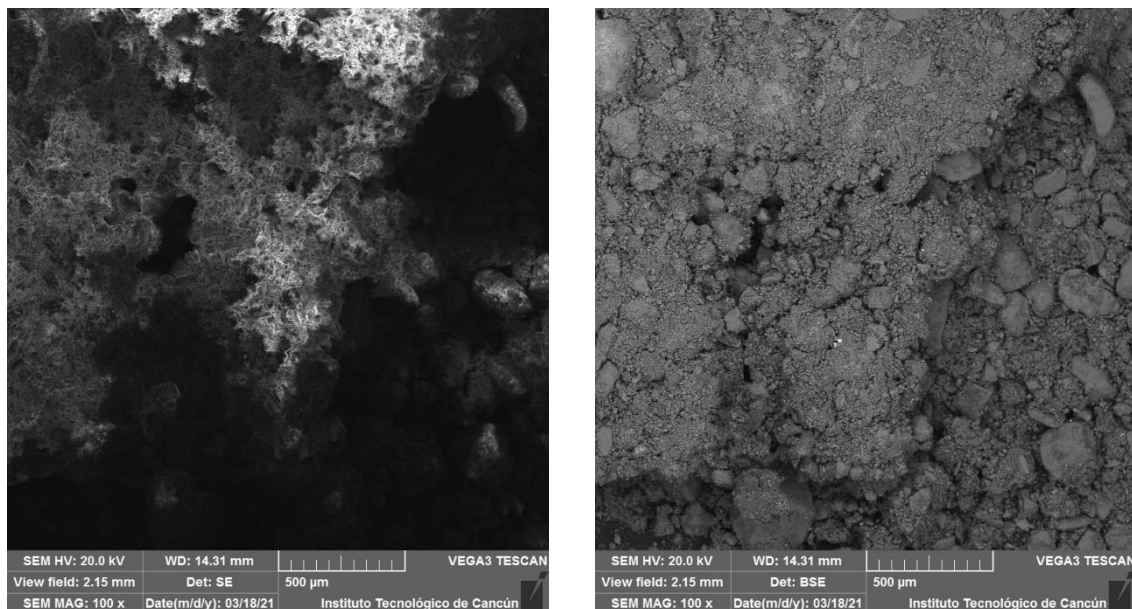


Figura 4.7.1 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #10 de abertura de 2 mm.

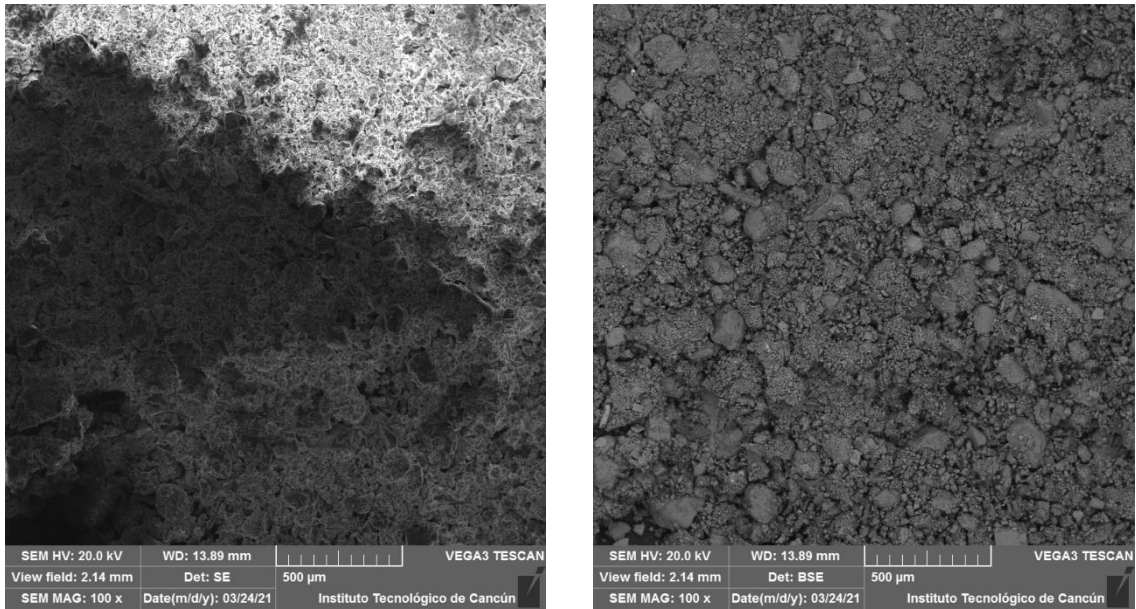


Figura 4.7.2 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #18 de abertura de 1 mm.

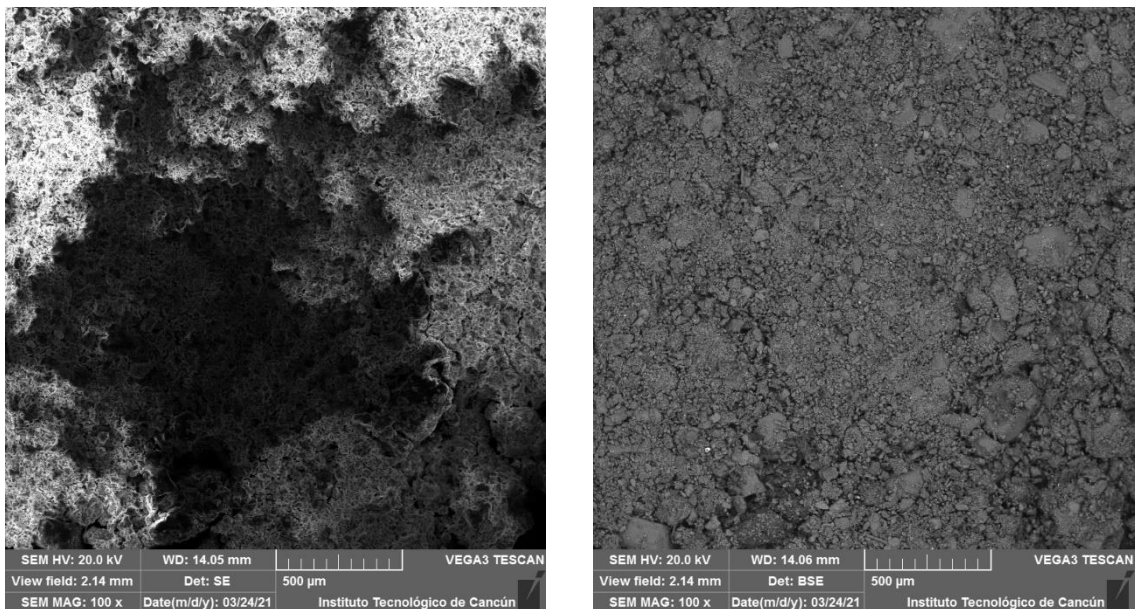


Figura 4.7.3 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #40 de abertura de 0.425 mm.

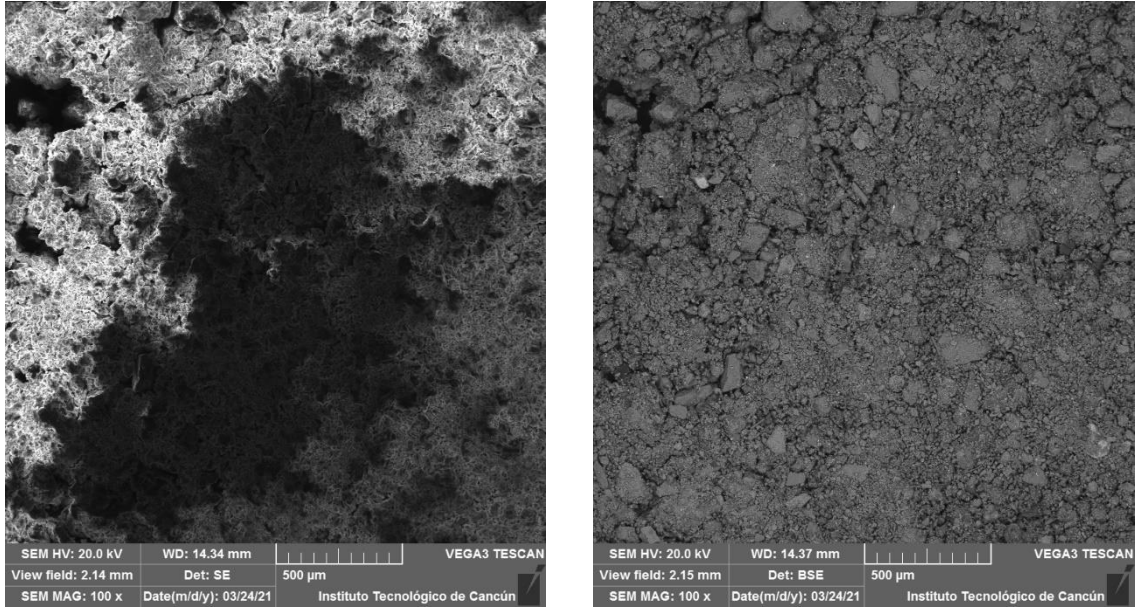


Figura 4.7.4 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #80 de abertura de 0.180 mm.

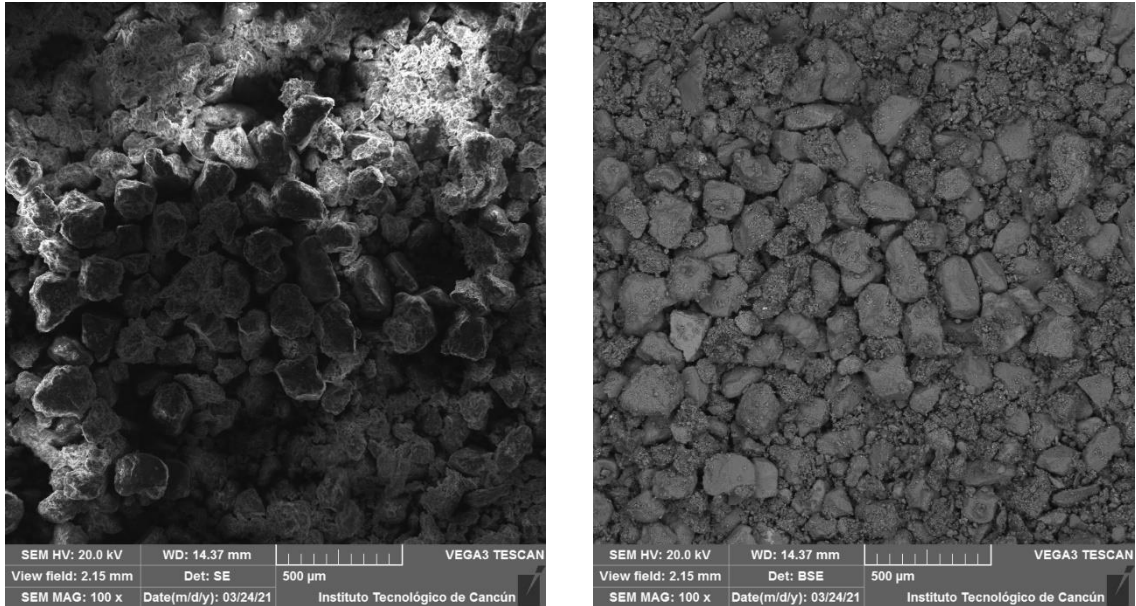


Figura 4.7.5 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #140 de abertura de 0.106 mm.

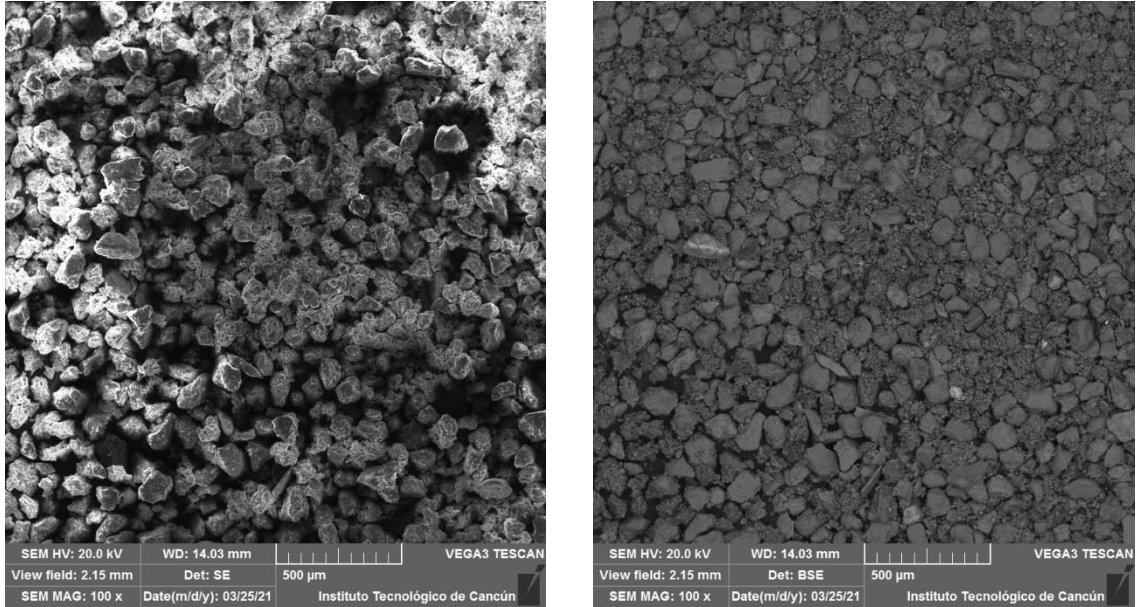


Figura 4.7.6 SEM de la muestra #4, correspondiente al tamiz #200 de abertura de 0.075 mm.

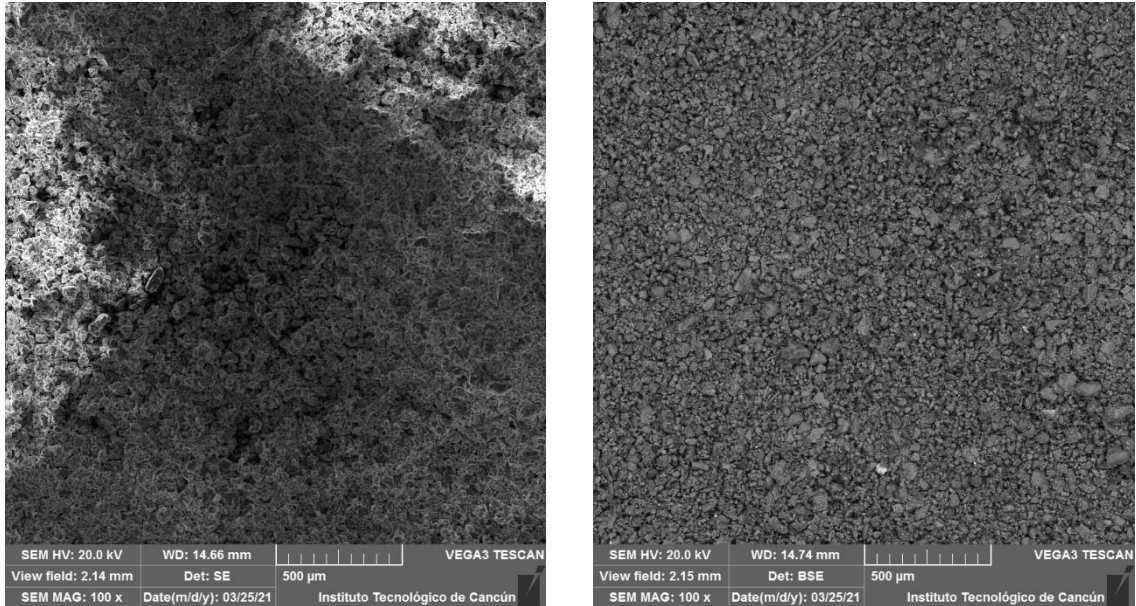


Figura 4.7.7 SEM de la muestra #4, correspondiente al recipiente de fondo de los tamices, tamaños < 0.075 mm.

En las figuras 4.7.8 a la 4.7.13 se presentan las microscopías de cada sección de la muestra #8 de acuerdo con el tamaño de abertura de tamiz:

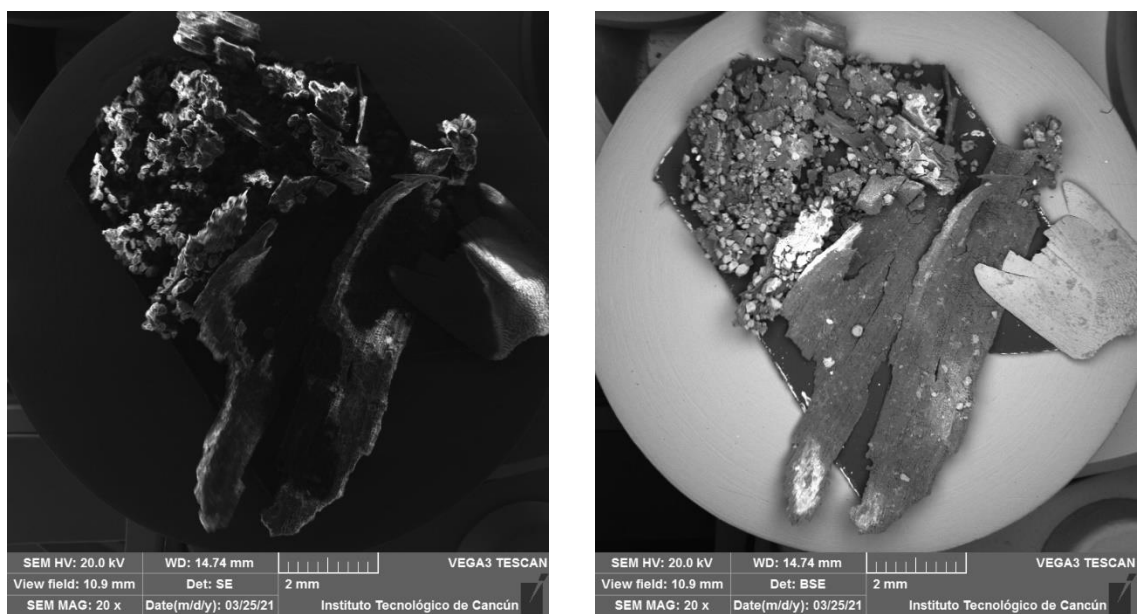


Figura 4.7.8 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #10 de abertura de 2mm.

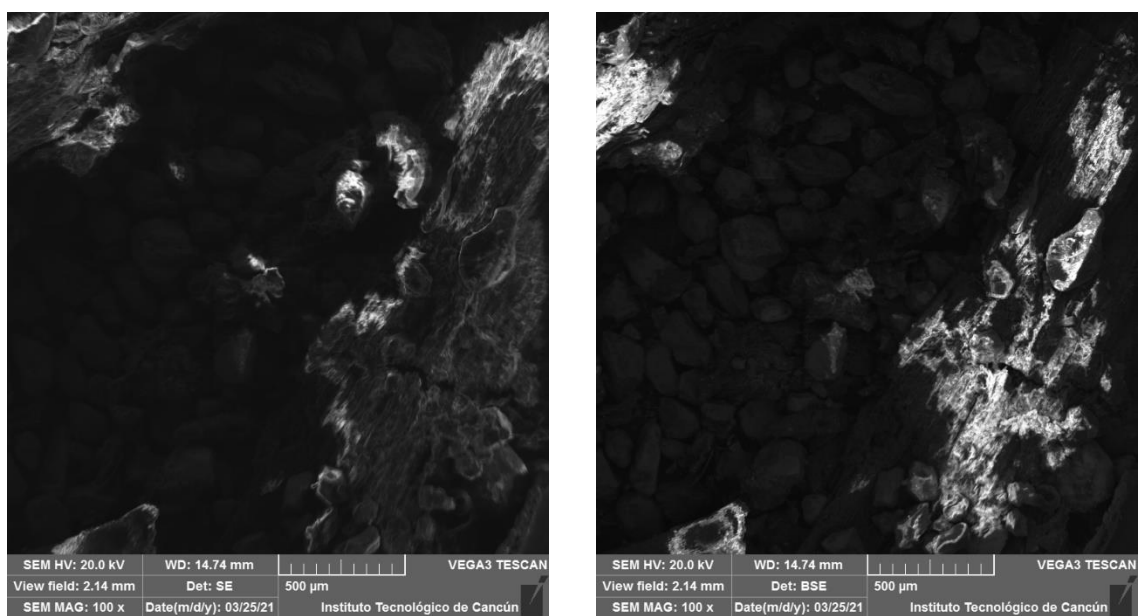


Figura 4.7.9 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #18 de abertura de 1mm.

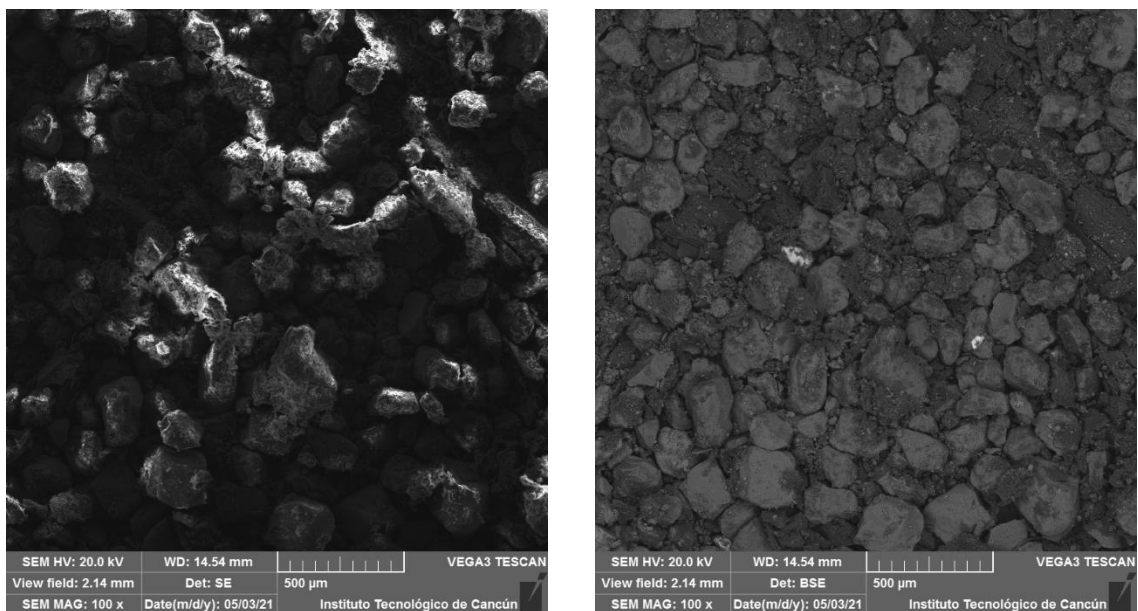


Figura 4.7.10 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #40 de abertura de 0.425 mm.

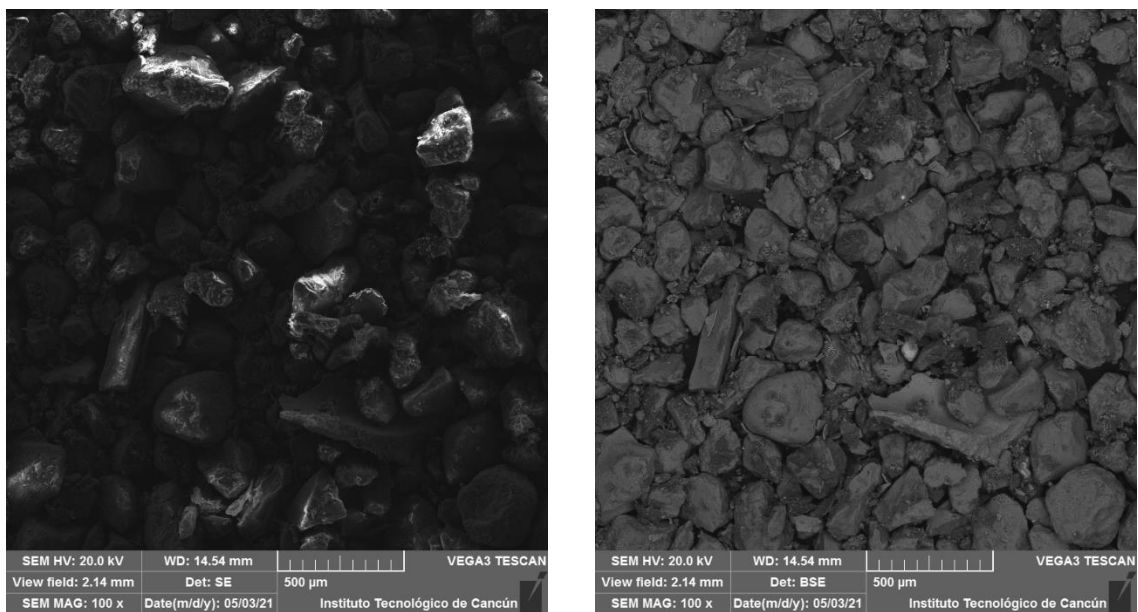


Figura 4.7.11 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #80 de abertura de 0.180 mm.

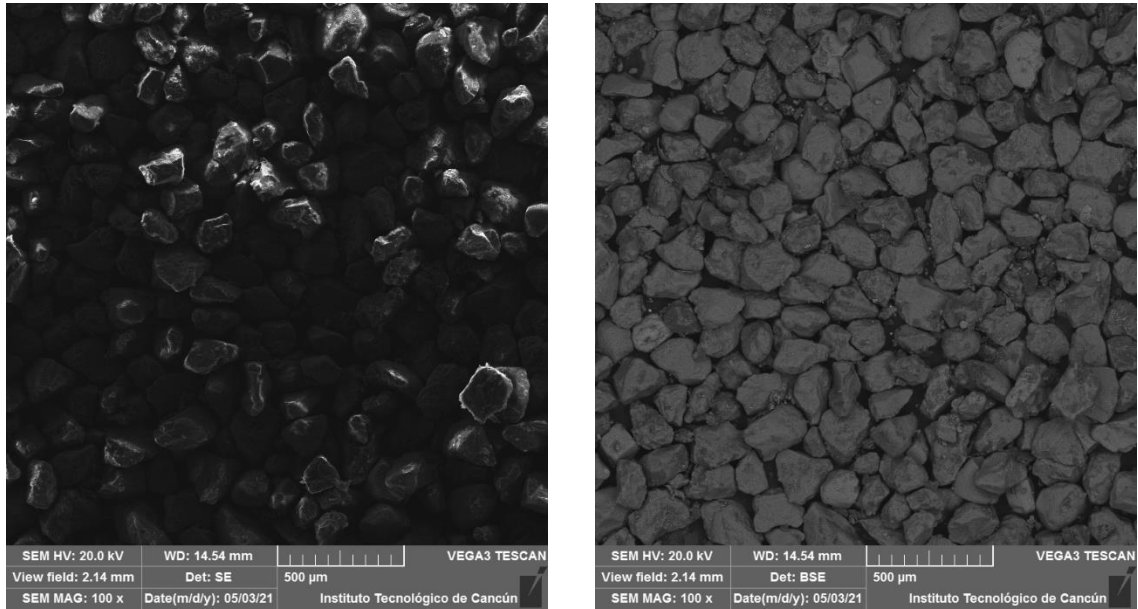


Figura 4.7.12 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #140 de abertura de 0.106 mm.

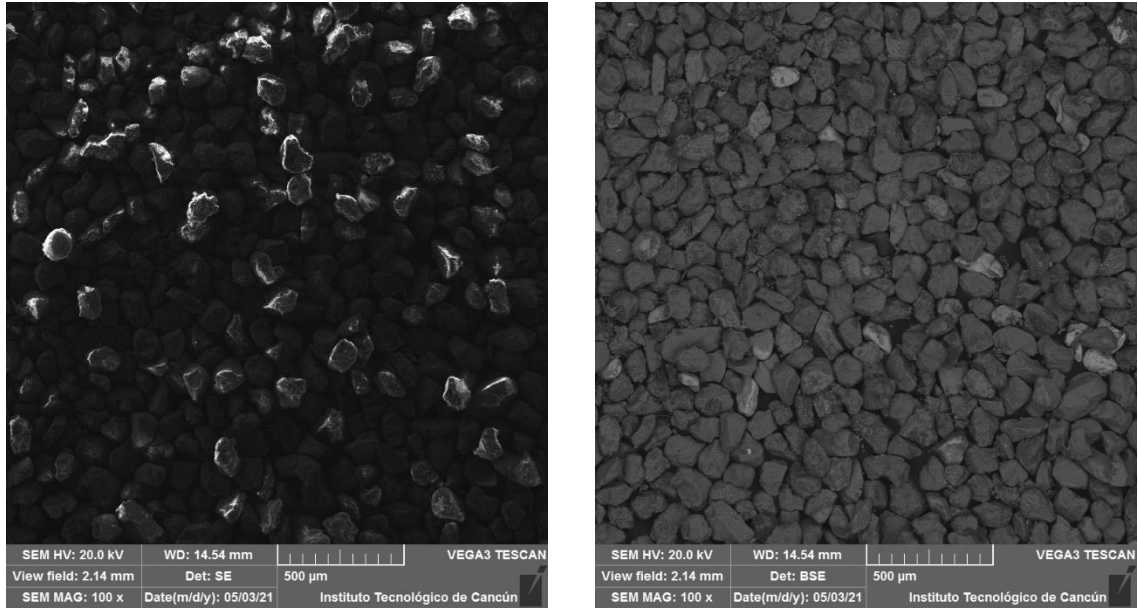


Figura 4.7.13 SEM de la muestra #8, correspondiente al tamiz #200 de abertura de 0.075 mm.

Las micrografías obtenidas de las muestras #4 y #8 son congruentes con establecido por la determinación granulométrica en cuanto al tamaño de las partículas, si bien es posible observar algunas partículas que presentan un menor tamaño que el considerado por el tamiz es importante hacer notar que el método del tamizado es una técnica que tiene algunos puntos de mejora en cuanto a la precisión y que la misma norma que lo respalda [51] indica que es una metodología cualitativa de clasificación con propósitos ingenieriles, esto se debe a que en los materiales finos existen otros criterios de sedimentación diferentes a los criterios que rigen a las partículas gruesas, es muy difícil que se pueda separar al 100% los finos de las demás partículas.

En [68] se menciona que las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) son una herramienta confiable para el análisis del tamaño y forma de los granos que conforman los suelos ya sea del tipo arenoso o hasta suelos que no presentan una textura granular como es el caso de las arcillas y en esta ocasión han sido de gran ayuda para complementar los resultados que se presentan.

En la tabla 4.7.1 y 4.7.2 se presentan los resultados obtenidos de las EDS realizadas a la muestra #4 y #8:

Tabla 4.7.1 Componentes elementales de la muestra #4 del EDS.

Elementos	Tamiz 10 (2 mm)	Tamiz 18 (1 mm)	Tamiz 40 (0.425 mm)	Tamiz 80 (0.180 mm)	Tamiz 140 (0.106 mm)	Tamiz 200 (0.075 mm)	Fondo
	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso
Oxígeno	53.34	54.8	51.8	54.9	56.39	52.34	54.31
Calcio	12.43	15.58	13.9	14.34	11.46	8.43	18.11
Sílice	15.91	15.19	13.16	14.68	21.45	17.72	13.47
Aluminio	4.93	4.76	4.28	4.99	4.59	4.22	4.49
Carbono	4.93	3.49	11.15	5.03	0.09	10.78	2.88
Hierro	1.83	2.14	1.99	1.98	1.86	2.02	1.99
Potasio	0.83	1.23	1.01	0.94	1	1.17	1.19
Azufre	0.89	0.99	0.91	1.17	0.99	0.7	0.83
Magnesio	0.96	0.79	0.71	0.9	0.83	0.69	0.77
Sodio	0.9	0.69	0.58	0.76	0.74	0.71	0.74
Cloro	0.4	0.32	0.24	0.3	0.29	0.25	0.27
Titanio	N. P.	N. P.	0.27	N. P.	N. P.	0.21	N. P.
Cobre	N. P.	N. P.	N. P.	N. P.	0.3	0.75	0.95
Flúor	2.65	N. P.	N. P.	N. P.	N. P.	N. P.	N. P.

N. P. = No presenta.

Tabla 4.7.2 Componentes elementales de la muestra #8 del EDS.

Elementos	Tamiz 10 (2 mm)	Tamiz 18 (1 mm)	Tamiz 40 (0.425 mm)	Tamiz 80 (0.180 mm)	Tamiz 140 (0.106 mm)	Tamiz 200 (0.075 mm)
	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso	%peso
Oxígeno	40.2	47.19	41.8	45.22	55.56	51.56
Calcio	1.04	12.69	3.48	2.6	1.27	1.56
Sílice	0.72	1.92	10.22	14.07	31.78	26.37
Aluminio	0.36	0.71	1.15	1.26	2.69	2.44
Carbono	54.96	35.34	39.74	34.18	4.91	13.47
Hierro	0.12	0.1	0.55	0.34	0.55	0.82
Potasio	N. P.	N. P.	N. P.	N. P.	0.99	0.9
Azufre	0.79	0.35	0.67	0.44	0.44	0.3
Magnesio	0.3	0.39	0.3	0.32	0.52	0.47
Sodio	0.68	0.65	0.42	0.46	0.97	0.82
Cloro	0.26	0.19	0.16	N. P.	N. P.	N. P.
Titanio	N. P.	N. P.	0.24	N. P.	N. P.	0.95
Cobre	0.41	0.35	0.36	0.19	0.31	0.34
Indio	N. P.	N. P.	0.68	0.93	N. P.	N. P.

N. P. = No presenta.

Los resultados del SEM-EDS corresponden a las muestras #4 y #8, el criterio para su elección fue que son las muestras que presentaron los valores más altos y más bajos de conductividad respectivamente, los resultados obtenidos de la espectroscopia de rayos X por energía dispersiva (EDS) indican que, en cuanto a los metales pesados, la muestra #4 contiene Hierro y Cobre, el Hierro está presente en un 2.14% en peso y se encuentra en todos los tamaños de partícula, mientras que el Cobre se encuentra en un rango no mayor al 1% en peso y está asociado a las partículas de suelo ≤ 0.106 mm. En la tabla 4.7.3 se presentan los límites máximos permisibles para metales en sedimentos de acuerdo con [55], con la norma canadiense [56], [57] y con los niveles de background para Estados Unidos de América [58].

Tabla 4.7.3 Límites máximos permisibles de metales en sedimentos.

Norma	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Fe	
	(mg/kg)									%
NOM	22	37	-	-	23	1600	400	-	-	
CEQG	ISQG	5.9	0.6	37.3	35.7	0.17	-	35	123	-
	PEL	17	3.5	90	197	0.486	-	91.3	315	-
NOAA	1.1	0.1-0.3	7-13	10-25	0.004-0.051	9.9	4-17	7-38	0.9-1.8	

NOM=Norma Oficial Mexicana [55].

CEQG=Guías de Calidad Ambiental Canadiense (Canadian Environmental Quality Guidelines)[56], [57].

ISQG=Guía provisional de calidad del sedimento (Interim Sediment Quality Guidelines)

PEL=Nivel de efecto probable (Probable Effect Level)

NOAA=Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (National Oceanic and Atmospheric Administration)[58].

Si realizamos la conversión del porcentaje en peso de los elementos metálicos con la unidad de medida establecida en las normas (mg/kg), encontraremos que en los sedimentos de la muestra #4 el Cobre excede los límites máximos permisibles establecidos por las normas canadiense [56], [57] y estadounidense [58] y el Hierro, de igual forma, excede los límites establecidos por la tabla de referencia de la norma estadounidense [58].

La muestra #8 que corresponde a los valores de conductividad más bajos, presenta tres metales pesados; el Hierro, se localiza en todos los tamaños de partícula y su concentración no excede el 1% en peso, el Cobre, que de igual manera se encuentra en todos los tamaños de partícula, tiene una concentración inferior al 0.5% en peso y el Indio, que solamente se localiza en los sedimentos que presentan un tamaño de partícula entre 0.425 mm y 0.180 mm, se encontró en una concentración entre 0.68% y 0.93% en peso. Si realizamos la conversión de estas proporciones a mg/kg como lo establecen las normas [56]–[58], encontraremos que solo el Cobre excede los límites establecidos por las normas canadiense y estadounidense. En el caso del Indio, dado que no es considerado en ninguna normativa, no es posible determinar si se encuentra dentro o fuera de los límites máximos permisibles en sedimentos.

4.8 Uso de técnicas de aprendizaje automático para el análisis de datos.

Posteriormente al muestreo y a la realización de las pruebas de laboratorio a los sedimentos de la laguna El Conejo, se obtuvo un conjunto de datos que fue necesario analizar e interpretar con el fin de conocer las condiciones propias del sedimento lagunar. Para ello fue necesaria la aplicación de los conocimientos aprendidos durante la realización del posgrado sobre la minería de datos, la cual se encarga de analizar la información obtenida para extraer patrones relevantes, así como establecer relaciones entre los conjuntos de datos. Los patrones se extraen haciendo uso de clasificadores, los cuales son modelos que describen como es que se comporta un conjunto de datos, dependiendo del comportamiento se le crea una etiqueta para el tipo de dato que se encuentra en el conjunto total.

La finalidad de extraer patrones es que cada dato indica una característica propia la cual se puede asociar a algún tipo de suceso, de esta manera es posible clasificar los datos mediante algoritmos los cuales pueden medir el porcentaje de errores o aciertos y con base en ese porcentaje se puede optimizar y aproximar a un error mínimo el cual proporcione una mejor clasificación o predicción.

Para analizar los datos de este trabajo se utilizó el programa *Weka*® que es una plataforma de software creada por la universidad de Waikato en Nueva Zelanda que posee una extensa colección de algoritmos de machine learning, diseñados para su uso en el manejo y transformación de datos mediante la aplicación de herramientas como la clasificación, regresión, clustering y visualización de los datos analizados [69].

El programa *Weka*® cuenta con una variedad de clasificadores de datos como el Naive bayes o los árboles de decisión. Dentro de los árboles de decisión se encuentra el ID3 que es el mas sencillo de todos, pero en el presente trabajo se analizaron los datos con el clasificador J48, que pertenece a la familia de los árboles de decisión, pero su utilización implica una mayor complejidad. Este clasificador es una modificación en el lenguaje Java del algoritmo C4.5 cuyo objetivo es generar una descripción adecuada de un conjunto de datos por medio del uso de un árbol de decisión, si los datos son correctos, es decir no existen contradicciones, el árbol será eficiente para la descripción. Otra utilidad que tiene este árbol de decisión es la predicción de nuevos datos bajo la consideración de que la información con la que se trabaja es representativa de toda la población de datos.

Los datos con los que trabajó el programa fueron los obtenidos de las pruebas realizadas a los sedimentos como la determinación del pH y conductividad (dS/m), granulometría (% gravas, %arenas, %finos) y clasificación del sedimento. Otro parámetro que se consideró también fue la localización de cada una de las muestras, identificándolas en 3 zonas o secciones: la sección norte, sección centro y sección sur. Además, se consideró el criterio de asignarle una temporada estacional a los muestreos, considerando como temporada de primavera a las muestras obtenidas en el mes de marzo, como temporada de verano a las muestras del mes de junio y como temporada de otoño a las muestras recuperadas en el mes de octubre. Con estos datos se crearon una serie de archivos de texto para posteriormente introducirlos en *Weka*®, a continuación, se mencionan los nombres asignados a los archivos de texto:

1. Muestras tomadas en la temporada estacional de primavera.
2. Muestras tomadas en la temporada estacional de verano.
3. Muestras tomadas en la temporada estacional de otoño.
4. Muestras tomadas en las temporadas estacionales de primavera y verano.
5. Muestras tomadas en las temporadas estacionales de verano y otoño.
6. Muestras tomadas en las temporadas estacionales de primavera, verano y otoño.

4.8.1 Muestras tomadas en la temporada estacional de primavera.

Para este programa se designaron los siguientes atributos: % Gravas, % Arenas, % Finos, pH, conductividad, sección, puntos de muestreo y temporada estacional; siendo la clase *clasificación del sedimento*. En la figura 4.8.1 se muestra el archivo de texto de los datos analizados.

```

muestreo_primavera_lagunaElConejo2: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
@relation muestreoPrimaveraLagunaElConejo
@attribute GranulometríaGravas real
@attribute GranulometríaArenas real
@attribute GranulometríaFinos real
@attribute pH real
@attribute conductividad real
@attribute Sección {1,2}
@attribute PuntosMuestreo {11,12,13,14,15,16,17,18,19,110,111,112,113,21,22}
@attribute Estación {1,2,3}
@attribute GranulometríaClsedimento {1,3,5,6}

@data
0.0,92.0,8.0,7.8,1390,1,11,1,3
0.0,20.0,80.0,6.88,1750,1,12,1,6
0.0,90.7,9.3,6.9,1490,1,13,1,3
0.0,93.8,6.2,6.4,1470,1,14,1,3
2.4,92.7,4.8,6.62,995,1,15,1,1
1.7,95.0,3.3,6.34,1100,1,16,1,1
0.0,95.3,4.7,6.9,765,1,17,1,1
0.0,95.9,4.1,6.9,879,1,18,1,1
0.0,45.2,54.8,7.15,1280,1,19,1,6
0.0,62.7,37.3,7.3,3210,1,110,1,5
0.0,22.2,77.8,7.03,3990,1,111,1,6
0.0,21.7,78.3,7.14,2980,1,112,1,6
0.0,20.8,79.2,6.56,2590,1,113,1,6
1.5,93.3,5.2,6.58,884,2,21,1,3
0.0,98.0,2.0,6.99,800,2,22,1,1
    
```

Figura 4.8.1 Datos de muestreo de primavera de la laguna El Conejo

Al introducir estos datos al *Weka*® se observó que se obtuvo un *80% de instancias clasificadas correctamente* y al seleccionar el evaluador de atributos “*Attribute ranking*” se observó que los atributos que más aportan al clasificador J48 para el muestreo de primavera fueron: *% finos y puntos de muestreo*.

4.8.2 Muestras tomadas en la temporada estacional de verano.

Para este programa se designaron los siguientes atributos: % Gravas, % Arenas, % Finos, pH, conductividad, sección, puntos de muestreo y temporada estacional; siendo la clase *clasificación del sedimento*. En la figura 4.8.2 se muestra el archivo de texto de los datos analizados.

```

muestreo_verano_lagunaElConejo2: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
@relation muestreoVeranoLagunaElConejo
@attribute GranulometríaGravas real
@attribute GranulometríaArenas real
@attribute GranulometríaFinos real
@attribute pH real
@attribute conductividad real
@attribute Sección {1,2,3}
@attribute PuntosMuestreo {11,12,13,14,15,16,17,18,19,110,111,112,113,21}
@attribute Estación {1,2,3}
@attribute GranulometríaClSedimento {1,2,3,4}

@data
0,99.72136223,0.278637771,5.4,405,1,11,2,1
0,97.82122905,2.17877095,6,665,1,12,2,1
0,99.3,0.7,7.3,250,1,13,2,1
0,99.01768173,0.982318271,7.3,126,1,14,2,1
0,99.13961039,0.86038961,6.4,239,1,15,2,1
0,97.98206278,2.01793722,6.5,303,1,16,2,1
0,95.16129032,4.838709677,6.6,798,1,17,2,2
0,99.38271605,0.617283951,6.4,145,1,18,2,1
0,95.25423729,4.745762712,6.5,737,1,19,2,2
0,92.37837838,7.621621622,6.4,106,1,110,2,4
0,91.09589041,8.904109589,6.5,726,1,111,2,3
0,90.65217391,9.347826087,6.2,254,1,112,2,3
0,88.70192308,11.29807692,6.3,405,1,113,2,3
0,96.49202733,3.507972665,6.6,624,2,21,2,1
0,95.28301887,4.716981132,6.9,660,2,22,2,1
0,98.51351351,1.486486486,6.4,564,2,23,2,1
0,98.57142857,1.428571429,6.5,165,2,24,2,1
    
```

Figura 4.8.2 Datos de muestreo de verano de la laguna El Conejo.

Al introducir estos datos al *Weka*® se observó que se obtuvo un *89% de instancias clasificadas correctamente* y al seleccionar el evaluador de atributos “*Attribute ranking*” se observó que los atributos que más aportan al clasificador J48 para el muestreo de verano fueron: *puntos de muestreo, % finos y % de arenas*.

4.8.3 Muestras tomadas en la temporada estacional de otoño.

Para este programa se designaron los siguientes atributos: % Gravas, % Arenas, % Finos, pH, conductividad, sección, puntos de muestreo y temporada estacional; siendo la clase *clasificación del sedimento*. En la figura 4.8.3 se muestra el archivo de texto de los datos analizados.

```

muestreo_otoño_lagunaElConejo2: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
@relation muestreoOtoñoLagunaElConejo
@attribute GranulometríaGravas real
@attribute GranulometríaArenas real
@attribute GranulometríaFinos real
@attribute pH real
@attribute conductividad real
@attribute Sección {1,2,3}
@attribute PuntosMuestreo {11,12,13,14,15,16,17,18,19,110,111,112}
@attribute Estación {1,2,3}
@attribute GranulometríaCSedimento {1,2,3,5}

@data
0,98.56915739,1.430842607,8.2,18,1,11,3,1
0,98.68228404,1.317715959,9.2,42,1,12,3,1
0,94.35028249,5.649717514,7.9,243,1,13,3,3
0,95.68552253,4.314477469,6.7,670,1,14,3,1
0,98.68421053,1.315789474,7.9,750,1,15,3,1
0,96.2406015,3.759398496,7.9,521,1,16,3,2
0,99.62221383,0.377786173,7.3,43,1,17,3,1
0,97.9020979,2.097902098,7.7,73,1,18,3,1
0,98.4939759,1.506024096,7.9,33,1,19,3,1
0,96.3898917,3.610108303,7.9,179,1,110,3,1
0,98.74213836,1.257861635,7.109,1,111,3,1
0,98.63874346,1.361256545,7.9,643,1,112,3,1
0,94.16342412,5.836575875,7.9,403,1,113,3,1
0,99.33069668,0.669303316,8.1,120,2,21,3,1
0,99.06367041,0.936329588,7.9,532,2,22,3,1
0,87.35568994,12.64431006,7.9,165,2,23,3,5
0,99.52324195,0.476758045,6.6,29,2,24,3,1
    
```

Figura 4.8.3 Datos de muestreo de otoño de la laguna El Conejo.

Al introducir estos datos al *Weka*® se observó que se obtuvo un 66% de instancias clasificadas correctamente y al seleccionar el evaluador de atributos “Attribute ranking” se observó que el atributo que más aporta al clasificador J48 para el muestreo de otoño fue: *puntos de muestreo*.

4.8.4 Muestras tomadas en las temporadas estacionales de primavera, verano y otoño.

Para este programa se tomaron los datos obtenidos de todos los muestreos (primavera, verano y otoño) y se hicieron dos programas utilizando los mismos atributos, pero estableciendo diferente clase; para el primer programa la clase designada fue la *estación* y para el segundo archivo fue *clasificación del sedimento*. Los atributos que se utilizaron para el primer archivo fueron los siguientes: % Gravas, % Arenas, % Finos, clasificación del sedimento, pH, conductividad, sección y puntos de muestreo; siendo la clase la *estación*. En la figura 4.8.4 se muestra el archivo de texto de los datos analizados.

```

muestreo_primaveraveranootoño1_lagunaElConejo: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
@relation muestreoPrimaveraVeranoOtoño1LagunaElConejo
@attribute GranulometríaGravas real
@attribute GranulometríaArenas real
@attribute GranulometríaFinos real
@attribute GranulometríaClSedimento {1,2,3,4,5,6}
@attribute pH real
@attribute conductividad real
@attribute Sección {1,2,3}
@attribute PuntosMuestreo {11,12,13,14,15,16,17,18,19,110,111,112,113,21,22,2}
@attribute Estación {1,2,3}

@data
0,92,8,3,7.8,1390,1,11,1
0,20,80,6,6.88,1750,1,12,1
0,90.69767442,9.302325581,3,6.9,1490,1,13,1
0,93.84615385,6.153846154,3,6.4,1470,1,14,1
2.422145329,92.73356401,4.844290657,1,6.62,995,1,15,1
1.657458564,95.02762431,3.314917127,1,6.34,1100,1,16,1
0,95.27777778,4.722222222,1,6.9,765,1,17,1
0,95.94202899,4.057971014,1,6.9,879,1,18,1
0,45.23809524,54.76190476,6,7.15,1280,1,19,1
0,62.72727273,37.27272727,5,7.3,3210,1,110,1
0,22.22222222,77.77777778,6,7.03,3990,1,111,1
0,21.66666667,78.33333333,6,7.14,2980,1,112,1
0,20.8,79.2,6,6.56,2590,1,113,1
1.498127341,93.25842697,5.243445693,3,6.58,884,2,21,1
0,98.01980198,1.98019802,1,6.99,800,2,22,1
0,99.72136223,0.278637771,1,5.4,405,1,11,2
0,97.82122905,2.17877095,1,6.665,1,12,2
0,99.3,0.7,1,7.3,250,1,13,2
0,99.01768173,0.982318271,1,7.3,126,1,14,2
0,99.13961039,0.86038961,1,6.4,239,1,15,2

```

Figura 4.8.4 Datos de muestreo de primavera, verano y otoño_1 de la laguna El Conejo.

Al introducir estos datos al *Weka*® se observó que para el primer archivo se obtuvo un 82% de instancias clasificadas correctamente y al seleccionar el evaluador de atributos “Attribute ranking” se observó que los atributos que más aportan al clasificador J48 para el muestreo de primavera, verano y otoño_1 fueron: *conductividad* y *pH*.

5 Conclusiones y recomendaciones

- La caracterización física de los sedimentos mostró que los suelos correspondientes a los 3 muestreos presentan una textura gruesa, la relación de contenido de gravas, arenas y finos es predominantemente arenosa, presentando fracciones finas menores al 5% en la mayoría de las muestras, ausentes de gravas, clasificando los suelos como arenas mal graduadas y en unas cuantas muestras bien graduadas, siendo limos la fracción fina de los materiales.
- Los valores de pH encontrados oscilaron entre rangos que van de neutros a medianamente alcalinos para el primer muestreo, de moderadamente ácidos a medianamente alcalinos en el segundo muestreo y de medianamente alcalinos a fuertemente alcalinos para el tercer muestreo.
- La conductividad se relacionó con la salinidad de los sedimentos encontrando que los suelos tienen una salinidad que va de ligeramente salina a despreciable, relacionando este dato podemos considerar que los sedimentos no presentan gran cantidad de sales.
- El análisis estadístico de los valores de pH y conductividad del primer muestreo indica que los datos tienen una mayor dispersión en comparación con los datos del segundo y tercer muestreo, esto puede deberse a los niveles de precipitación que fueron inferiores durante la fecha del primer muestreo favoreciendo a la precipitación de sales en los sedimentos que pudieron incrementar los valores de la conductividad.
- Las imágenes de la SEM de las muestras sedimentarias concuerdan con los tamaños de granos establecidos por el sistema unificado de clasificación de suelos para las granulometrías por tamizado, mostrando los sedimentos de una textura gruesa mayoritariamente arenosa.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

- Se concluye que la metodología de caracterización de tamaño de partícula establecida en este trabajo es confiable y podría ser reproducida con fines de análisis de los sedimentos lagunares ya que no existen normas en México, ni metodologías que cubran con estas necesidades.
- La Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva mostró que los sedimentos correspondientes a las muestras #4 y #8 contienen 2 metales pesados: Cobre y Hierro; de estos metales, el Cobre se encuentra en una concentración que excede los límites máximos permisibles para la contaminación de sedimentos según lo establecido por la norma canadiense [57] y norteamericana [58], mientras que el Hierro solamente se encuentra excedido en la muestra #4. En la muestra #8 se encontró el metal pesado Indio pero debido a que ninguna legislación vigente lo contempla no fue posible considerarlo como un contaminante.
- De acuerdo con García Navarro en 2006 [5] las marismas de Altamira reportan la presencia de Cu y Ni en altas concentraciones que exceden los límites máximos permisibles establecidos por la norma canadiense, y analizando la localización geográfica de las muestras que contienen Cobre en este estudio, la cercanía con las marismas y su conexión es posible relacionar los resultados obtenidos de ambos estudios.
- Debido a que durante el desarrollo de este trabajo comenzó la contingencia sanitaria generada por el SARS-CoV-2, no fue posible obtener información referente a las descargas procedentes de los procesos industriales, pero de acuerdo con los resultados obtenidos, se considera que si se cumple con la hipótesis establecida ya que la laguna El Conejo presenta un nivel de contaminación por Cobre en sedimentos elevado y es de suma importancia conocer la distribución de dicho contaminante en otras localizaciones de la laguna y su posible distribución vertical mediante los procesos de lixiviación.
- Se recomienda analizar los resultados del SEM-EDS de las muestras restantes del tercer muestreo con fines de localizar la presencia de Cobre en dichas muestras y complementar los resultados.

Bibliografía

- [1] S. Villanueva-F. y A. V.-Botello, “Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y caribe Mexicano”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 8, núm. 1, pp. 47–61, 1992.
- [2] V. Pérez-Moreno, M. Á. Ramos-López, C. E. Zavala-Gómez, y M. Á. Rico-Rodríguez, “Metales pesados en el agua de mar a lo largo de la costa Pacífica de México”, *Interciencia*, vol. 41, núm. 6, pp. 419–423, 2016.
- [3] J. Prieto-Méndez, C. A. González-Ramírez, A. D. Román-Gutiérrez, y F. Prieto-García, “Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua.”, *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, vol. 10, núm. 1, pp. 29–44, 2009.
- [4] Ó. R. Mancilla-Villa, H. M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, E. Uscanga-Mortera, R. Ramos-Bello, y A. L. Reyes-Ortigoza, “Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México.”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, núm. 1, pp. 39–48, 2012.
- [5] J. García-Navarro, “Metales pesados en sedimentos en tres lagunas costeras del sur de Tamaulipas y norte de Veracruz”, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [6] P. Ávila-Pérez y G. Zarazúa-Ortega, “Concentración de metales pesados en ostiones (*Crassostrea virginica* Gmelin), del canal El Chijol, Veracruz, México”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 9, núm. 2, pp. 53–64, 1993.
- [7] S. Puga, M. Sosa, T. Lebgue, C. Quintana, y A. Campos, “Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera”, *Ecol. Apl.*, vol. 5, núm. 1,2, pp. 149–155, 2006.
- [8] I. Pérez-Martínez y F. Martín-Romero, “Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México.”, *Boletín la Soc. Geológica Mex.*, vol. 67, núm. 1, pp. 1–12, 2015.
- [9] “Instituto Nacional de Ecología”. [En línea]. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap4.html>. [Consultado: 14-jun-2021].

- [10] J. A. Martínez Sepúlveda *et al.*, *Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio*. 2019.
- [11] S. A. Covarrubias y J. J. Peña-Cabriales, “Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, pp. 7–21, 2017.
- [12] D. A. Pérez, M. M. Teutli, y M. E. Ramírez, “Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 23, núm. 3, pp. 129–138, 2007.
- [13] M. Bahemmat, M. Farahbakhsh, y M. Kianirad, *Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil*, vol. 312. Elsevier B.V., 2016.
- [14] D. I. Caviedes-Rubio, R. A. Muñoz-Calderón, A. Perdomo-Gualtero, D. Rodríguez-Acosta, y I. J. Sandoval-Rojas, “Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales.”, *Rev. Ing. y Región*, vol. 13, núm. 1, pp. 73–90, 2015.
- [15] “Noticias Nacionales - Abril 2013 II RAUNAM”. [En línea]. Disponible en: http://www.agua.unam.mx/noticias/2013/nacionales/not_nac_abril23.html. [Consultado: 05-jun-2021].
- [16] “Atribuye Altamira el ecocidio a empresas – Agua.org.mx”. [En línea]. Disponible en: <https://agua.org.mx/atribuye-altamira-el-ecocidio-a-empresas/>. [Consultado: 05-jun-2021].
- [17] “Lagunas, entre peste y contaminación”. [En línea]. Disponible en: http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=6191:lagunas-entre-pestes-y-contaminacion&catid=114:contaminacion-del-agua&Itemid=576. [Consultado: 05-jun-2021].
- [18] Y. C. Reyes, I. Vergara, O. E. Torres, M. Díaz, y E. E. González, “Contaminación por metales pesados: implicaciones en la salud, ambiente y seguridad alimentaria.”, *Rev. Ing. Investig. y Desarro.*, vol. 16, núm. 2, pp. 66–77, 2016.
- [19] I. García y C. Donorroso, “Tecnología de suelos. Tema 15. Contaminación por metales pesados.”, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>. [Consultado: 02-may-2019].

- [20] J. H. Duffus, “Metales pesados: ¿Un plazo significativo?”, *Pure Appl. Chem.*, vol. 74, núm. 5, pp. 793–807, ene. 2002.
- [21] T. W. Lane y F. M. M. Morel, “Una función biológica para el cadmio en diatomeas marinas.”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 97, núm. 9, pp. 4627–4631, abr. 2000.
- [22] L. F. Espinosa, J. P. Parra, y C. Villamil, “Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de Santa Marta, Colombia”, *Bol. Investig. Mar. y Costeras*, vol. 40, núm. 1, pp. 7–23, 2011.
- [23] E. F. Tello-Rodríguez *et al.*, “Caracterización de sedimentos de la laguna el paraíso, huacho, región lima.”, 2013.
- [24] J. Herrera-Núñez, J. Rodríguez-Corrales, J. M. Coto-Campos, V. Salgado-Silva, y H. Borbón-Alpizar, “Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro.”, *Tecnol. en Marcha*, vol. 26, núm. 1, pp. 28–36, 2013.
- [25] Z. Banu, M. S. A. Chowdhury, M. D. Hossain, y K. Nakagami, “Contaminación y evaluación del riesgo ecológico de metales pesados en los sedimentos del río Turag, Bangladesh: un enfoque de análisis de índice.”, *J. Water Resour. Prot.*, vol. 5, núm. 2, pp. 239–248, 2013.
- [26] R. M. Laino-Guanes, R. Bello-Mendoza, M. González-Espinoza, N. Ramírez-Marcial, F. Jiménez-Otárola, y K. Musálem-Castillejos, “Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva , frontera México-Guatemala.”, *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. VI, pp. 61–74, 2015.
- [27] G. José-Bracho, J. Q. Cuador-Gil, y R. M. Rodríguez-Fernández, “Calidad del agua y sedimento en el lago de Maracaibo , estado Zulia.”, *Minería y Geol.*, vol. 32, núm. 1, pp. 1–14, 2016.
- [28] M. V. Fuentes-Hernández, O. A. Sanguinetti-Gamboa, y L. L. Rojas-de-Astudillo, “Evaluación del riesgo ambiental de metales pesados en los sedimentos superficiales del saco del Golfo de Cariaco”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 35, núm. 1, pp. 101–114, feb. 2019.
- [29] A. M. Hansen, A. León-Zavala, y L. Bravo-Inclán, “Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala”, *Ing.*

- Hidráulica en México*, vol. 10, núm. 3, pp. 55–69, 1995.
- [30] J. A. García-Aragón, C. Díaz-Delgado, y P. Morales-Reyes, “Concentración de metales en sedimento y su relación con los patrones de deposición en la presa José Antonio Alzate, Estado de México.”, *Ing. Hidráulica en México*, vol. 18, núm. 4, pp. 59–71, 2003.
- [31] Y. G. Pérez-Cruz, L. J. Rangel-Ruiz, y G.-A. Jaquelina, “Metales en almejas y sedimentos en la Reserva de la Biósfera ‘ Pantanos de Centla ’ Tabasco , México.”, *Hidrobiológica*, vol. 23, núm. 1, pp. 1–8, 2013.
- [32] Y. Canedo-López, A. Ruiz-Marín, y C.-A. J. Carmito, “Diagnóstico de la contaminación por metales pesados en sedimento superficial de la laguna de Términos, Campeche: Una aproximación estadística.”, *Rev. AIDIS Ing. y Ciencias Ambient.*, vol. 7, núm. 2, pp. 95–104, 2014.
- [33] J. A. Alcalá-Jáuregui *et al.*, “Contaminación por metales pesados en sedimentos de un área ribereña en San Luis Potosí, México.”, *Rev. la Fac. Ciencias Agrar.*, vol. 46, núm. 2, pp. 203–221, 2014.
- [34] H. O. Rubio-Arias, P. F. Mejía-Leyva, L. Cortés-Palacios, J. M. Ochoa-Rivero, y C. De La Mora- Orozco, “Metales pesados en sedimentos de la Laguna de Bustillos, Chihuahua, México y comparación de agua regia y peróxido de hidrógeno como métodos de digestión”, *Investig. y Cienc. la Univ. Autónoma Aguascalientes*, núm. 74, pp. 39–47, 2018.
- [35] C. M. Flores, E. Del Angel, D. M. Frías, y A. L. Gómez, “Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México.”, *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 09, núm. 2, pp. 39–57, abr. 2018.
- [36] O. G. Gómez-Duarte, “Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública”, *Rev. Fac. Med.*, vol. 66, núm. 1, pp. 7–8, 2018.
- [37] B. E. Jiménez Cisneros, *La contaminación ambiental en México : causas, efectos y tecnología apropiada*. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, 2001.
- [38] A. Fonseca-Sánchez, H. Madrigal-Solís, C. Núñez-Solís, H. Calderón-Sánchez, G.

- Moraga-López, y A. Gómez-Cruz, “Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica”, *Uniciencia*, vol. 33, núm. 2, pp. 76–97, 2019.
- [39] F. Bautista Zúñiga, *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, 1999.
- [40] Servicio Geológico Mexicano, “El ciclo de las rocas”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/El-ciclo-de-las-rocas.html>. [Consultado: 11-may-2019].
- [41] R. C. Selley, *Antiguos ambientes sedimentarios*, 4ta. 1996.
- [42] J. Lee Wilson, *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer-Verlag, 1975.
- [43] F. K. Lutgens y E. J. Tarbuck, (*Spanish Edition*) Edward J. Tarbuck, Frederick K. Lutgens, Dennis Tasa-Ciencias de la Tierra_ *Una Introducción a la Geología Física with CDRom-Pearson Educacion* (2006). 2005.
- [44] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, y D. C. Joy, *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. 2017.
- [45] D. E. Newbury y N. W. M. Ritchie, “Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative?”, *Scanning*, vol. 35, núm. 3, pp. 141–168, 2013.
- [46] R. A. Espin-andrade, W. Pedrycz, y E. Solares, “Transdisciplinary Scientific Strategies for Soft Computing Development : Towards an Era of Data and Business Analytics”, pp. 1–18, 2021.
- [47] H. M. Chung y P. Gray, “Special section: Data mining”, *J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 16, núm. 1, p. 11, 1999.
- [48] SECRETARÍA DE ECONOMÍA, *Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016: Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (Cancela a la NMX-AA-132-2006)*. 2016, p. 35.
- [49] A. International, “ASTM D2216 - 19 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm>. [Consultado: 25-may-

- 2020].
- [50] A. International, “ASTM D4972 - 19 Standard Test Methods for pH of Soils”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D4972.htm>. [Consultado: 25-may-2020].
- [51] A. International, “ASTM D2487 - 17e1 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>. [Consultado: 25-may-2020].
- [52] A. International, “ASTM D4318 - 17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>. [Consultado: 25-may-2020].
- [53] ASTM, “ASTMD 2488-09a Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)”, *Annu. B. ASTM Stand.*, núm. July, pp. 1–11, 2009.
- [54] S. de M. A. y R. Naturales, *NOM-001-SEMARNAT-1996 Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales*. 1996, p. 33.
- [55] SEMARNAT, “NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/”, *Secr. Medio Ambient. Y Recur. Nat.*, pp. 18–61, 2004.
- [56] Ccme, “Protocol for the derivation of canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life”, 1995.
- [57] CEQG, “Lineamientos de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática.” pp. 1–4, 1998.
- [58] M. F. Buchman, “Screening Quick Reference Tables - SQUIRTS”, *Noaa*, p. 34, 2008.
- [59] “Google Maps”. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/@22.4289081,-97.8920881,2899m/data=!3m1!1e3>. [Consultado: 04-jun-2021].
- [60] A. V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Bouchot, y C. Agraz-Hernández, *Golfo*

de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, núm. July. 2005.

- [61] R. Y. Kim, J. K. Yoon, T. S. Kim, J. E. Yang, G. Owens, y K. R. Kim, “Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation—a critical review”, *Environ. Geochem. Health*, vol. 37, núm. 6, pp. 1041–1061, 2015.
- [62] S. Y. Chen y J. G. Lin, “Bioleaching of heavy metals from sediment: Significance of pH”, *Chemosphere*, vol. 44, núm. 5. pp. 1093–1102, 2001.
- [63] SEMARNAT, “Nom-021-Semarnat-2000”, *D. Of. la Fed.*, p. 85, 2002.
- [64] CONAGUA, “Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional 2020”, 2020.
- [65] R. URRUTIA, M. YEVENES, y R. BARRA, “Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: Lagos Chungará, Laja y Castor.”, *Boletín la Soc. Chil. Química*, vol. 47, núm. 4, pp. 457–467, dic. 2002.
- [66] P. G. Macías Hernández, “Determinación de metales pesados (Pb, Cd, Cr) en agua y sedimentos de la zona estuarina del río Tuxpan, Veracruz”, 2015.
- [67] G. Bartoli, S. Papa, E. Sagnella, y A. Fioretto, “Heavy metal content in sediments along the Calore river: Relationships with physical-chemical characteristics”, *Journal of Environmental Management*, vol. 95, núm. SUPPL. 2012.
- [68] N. Prakongkep, A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, y R. J. Gilkes, “SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils”, *Geoderma*, vol. 156, núm. 1–2, pp. 20–31, 2010.
- [69] “Weka 3 - Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>. [Consultado: 17-jun-2021].