



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

**Análisis geoquímico de 3 núcleos de sedimentos marinos
adyacentes a la desembocadura del río Usumacinta**

TESIS

**Que para optar por el grado académico de
Maestro en Ciencias
(Química Acuática)**

Presenta

I.Q. Rogelio Miguel Quiroga Marín

Directora de Tesis

**Dra. María Leticia Tomasa Rosales Hoz
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología**

Comité Tutorial

**Dra. María Luisa Machain Castillo
Dr. Antonio Zoilo Márquez García
Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta
Dr. John Altrin Armstrong
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología**

Ciudad Universitaria, CD.MX., Agosto, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, de la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al Laboratorio de Química Acuática.

Agradezco profundamente a la Dra. Leticia Rosales Hoz, por la confianza, atenciones y apoyo para la realización de este proyecto.

Al CONACYT, por otorgarme la beca para poder realizar este proyecto de Maestría.

A la Q.F.B. Susana Santiago Pérez, por su enseñanza, paciencia, confianza y amistad a lo largo de todo este tiempo.

A la Dra. Ma. Luisa Machain Castillo por sus atenciones, por sus conocimientos y por el apoyo en el fechado de los núcleos.

Al Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta, por su apoyo y por el tiempo dedicado a revisar, corregir y enriquecer este trabajo.

Al Dr. Antonio Márquez García, por su tiempo, por sus conocimientos y por el material brindado para la realización de esta tesis.

Al Dr. John Armstrong Altrin por sus conocimientos en Estadística y Ambientes Sedimentarios y por sus comentarios para enriquecer este proyecto.

Al Dr. Juan José Kasper Zubillaga, por compartir sus conocimientos en Estadística, por sus comentarios y por su amistad

A toda la tripulación del Buque Justo Sierra de la UNAM, por las facilidades otorgadas para la recolección de muestras, sin las cuales no se hubiera podido llevar a cabo este proyecto.

A mis compañeros de Laboratorio Paty, Tania y Homero, por su apoyo en todo momento.

A mis compañeros y amigos Marisol, Greta y Jhoan, por su amistad y apoyo.

Al M. en C. Alejandro Rodríguez Ramírez, por todo el apoyo brindado desde el comienzo de este proyecto, sobretodo en el corte y seccionamiento de los núcleos.

Al M. en C. Eduardo Morales de la Garza por su apoyo técnico para la realización de los análisis texturales.

Al Sr. Ricardo Martínez Domínguez por su amistad y apoyo en el seccionamiento de los núcleos.

Al Ing. Geofísico Francisco Ponce Núñez por el apoyo e imágenes proporcionadas de Batimetría y Topografía de los núcleos analizados.

A la Dra. María Rodríguez Ceja y a la Dra. Corina Solís Rosales del laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas del Instituto de Física de la UNAM, por su invaluable ayuda para poder determinar el fechado del Núcleo 13,

A Lucile Beck, Emmanuelle Delque-Kolic, Jean Pascal Dumoulin y Christophe Moreau del Laboratoire de Mesure du Carbon 14, por colaborar en el análisis de carbono 14, para el Núcleo-13, en Saclay, Francia.

A todos mis compañeros de la Universidad Latina, por el apoyo incondicional brindado durante estos 2 años.

Dedicatorias

A mis padres

A Ale

A Ali

A Mozzy

A todos los que han sido mis alumnos

Tabla de contenido

Lista de Figuras	10
Lista de Tablas	11
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1 Justificación.....	14
1.2 Objetivo General	15
1.3 Objetivos Particulares.....	15
Capítulo 2: MARCO TEÒRICO	16
2.1 Características Generales de los sedimentos.....	16
2.1.1 Sedimento.....	16
2.1.2 Medio Sedimentario	16
2.2 Carbonatos.....	18
2.3 Carbono Orgánico	18
2.4 Composición Química de los elementos de los sedimentos de estudio	19
2.4.1 Elementos Mayores	19
2.5 Características Principales de Elementos Mayores en la Corteza	19
2.5.1 Silicio	19
2.5.2 Aluminio.....	20
2.5.3 Calcio y Magnesio.....	20
2.5.4 Hierro.....	21
2.5.5 Sodio y Potasio.....	21
2.5.6 Azufre	22
2.5.7 Fósforo	23
2.5.8 Manganeso.....	23
2.6 Elementos Traza	24
2.6.1 Plomo	24
2.6.2 Cadmio	25
2.6.3 Cromo.....	25
2.6.4 Vanadio	26
2.6.5 Cobre.....	26
2.6.6 Zinc.....	26
2.6.7 Níquel	26

Capítulo 3: ÁREA DE ESTUDIO	28
3.1 Importancia del área de estudio	29
3.2 Sistema Grijalva-Usumacinta	29
3.2.1 Planicie fluviodeltaica del Cuaternario	30
3.3 Localización Geográfica	31
3.4 Sedimentos costeros	31
3.5 Mareas.....	31
3.6 Oleaje	32
3.7 Corrientes	32
3.8 Fisiografía.....	32
3.9 Climatología.....	32
3.10 Hidrología	34
3.11 Geología	35
3.12 Edafología.....	35
Capítulo 4: METODOLOGÍA.....	37
4.1 Trabajo de campo	37
4.2 Trabajo de Laboratorio	37
4.2.1 Preparación de la Muestra	37
4.3 Determinación de carbono orgánico en sedimento.....	39
4.3.1 Fundamento.....	39
4.3.2 Procedimiento.....	40
4.3.3 Cálculo.....	41
4.3.4 Estandarización de Carbono Orgánico.....	41
4.3.5 Diagrama del método para determinación de Carbono Orgánico.....	42
4.4 Determinación de carbonatos en sedimento.....	43
4.4.1 Fundamento.....	43
4.4.2 Procedimiento.....	43
4.4.3 Diagrama del método para determinación de carbonatos	44
4.4.5 Cálculo.....	44
4.4.6 Valoración de NaOH	45
4.4.7 Cálculo.....	45
4.4.8 Estandarización del método para Carbonatos.....	45
4.5 Determinación de elementos mayores	46

4.5.1 Pérdida por Ignición	46
4.5.2 Elaboración de pastillas	46
4.6 Determinación de elementos traza	48
4.6.1 Procedimiento Físico de la Espectroscopia de Absorción Atómica	48
4.6.2 Extracción de Metales en Sedimento para Absorción Atómica.....	49
4.6.2 Estandarización del Método	50
4.6.3 Límite de Detección	51
Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1 Batimetría.....	52
5.2 Mallado de los datos	52
5.3 Perfil Batimétrico	53
5.4 Descripción de los núcleos.....	54
5.5 Parámetros Texturales	57
5.6 Análisis Textural de cada núcleo	60
5.6.1 Núcleo 13.....	60
5.6.2 Núcleo 22.....	60
5.6.3 Núcleo 30.....	63
5.7 Parámetros Granulométricos.....	63
5.8 Análisis Químico.....	66
5.8.1 Carbono Orgánico.....	66
5.8.2 Análisis de Carbono Orgánico en los Núcleos estudiados	67
5.8.2 Carbonatos	68
5.8.3 Análisis de Carbonatos por cada núcleo	69
5.8.4 Elementos Mayores	70
5.8.5 Elementos Traza.....	76
5.9 Análisis de correlación.....	81
5.10 Elementos Traza y Evaluación Ambiental.....	82
5.10.1 Índice de Terrígenos	82
5.10.2 Factor de Enriquecimiento (FE)	83
5.10.3 Índice de Geo-acumulación	85
5.11 Análisis Discriminante	87
5.12 Análisis Cluster.....	89
5.12.1 Núcleo 13.....	90

5.12.1.1 Rotación Varimax N-13.....	91
5.12.2 Núcleo 22.....	95
5.12.1.1 Rotación Varimax N-22.....	96
5.12.3 Núcleo 30.....	101
5.12.1.1 Rotación Varimax N-30.....	102
Capítulo 6: CONCLUSIONES.....	107
Bibliografía.....	109
Anexo 1: Índice de Terrígenos.....	113
Anexo 2: Tabla de correlaciones N-13.....	114
Anexo 3: Tabla de correlaciones N-22.....	115
Anexo 4: Tabla de correlaciones N-30.....	116

Lista de Figuras

Figura 1: Ubicación de los 3 núcleos, analizados en la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta. Google Maps.2017.....	28
Figura 2: Mapa de la provincia de Tabasco, hecho en 1579 por Melchor de Alfaro y Santacruz, fotografiado por A. Aguilar, 2007.....	29
Figura 3: Mapa Geológico del área de estudio (Fuente: Ferrari-Pedraglio, Luca, 2007).....	36
Figura 4: Fotografía Transversal de los núcleos analizados N-13, N-22 y N-30.....	38
Figura 5: Método para la determinación de carbono orgánico.....	42
Figura 6: Método para la determinación de carbonatos.....	44
Figura 7: Perfil Batimétrico del área de estudio.....	53
Figura 8: Batimetría del área de estudio.....	54
Figura 9: Profundidad (cm) vs Edad (AP), que indican el fechado del N-13.....	56
Figura 10: Mapa que muestra la morfología actual de los ríos Grijalva-Usumacinta. Modificado de Psuty, 1969.....	57
Figura 11: Diagramas de Shepard que muestran la textura de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	59
Figura 12: Perfiles de las fracciones de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	62
Figura 13: Perfiles del tamaño de grano de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	65
Figura 14: Perfiles de carbono orgánico de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	67
Figura 15: Perfiles de carbonatos de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	69
Figura 16: Perfiles de los elementos mayores (Al, Ti, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, P, S, Si) de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	74
Figura 17: Figura de los elementos traza (Cu, Zn, Ni, V, Cr, Pb y Cd) de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	80
Figura 18: Gráfica del Factor discriminante de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	89
Figura 19: Dendograma para 23 casos del N-13, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r.....	90
Figura 20: Dendograma para 27 casos del N-13, considerando los parámetros de mayor peso en los factores 1 y 2.....	93
Figura 21: Dendograma para 23 casos del N-22, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r.....	95
Figura 22: Dendograma para 26 casos del N-22, considerando los parámetros de mayor peso en los factores 1 y 2.....	99
Figura 23: Dendograma para 22 casos del N-30, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r.....	101
Figura 24: Dendograma para 17 casos del N-30, considerando los parámetros de mayor peso en los factores 1 y 2.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1: Coordenadas y Longitud de los Núcleos N-13, N-22 y N-30.....	28
Tabla 2: Valores obtenidos para la Estandarización de Carbono Orgánico, n=10.....	41
Tabla 3: Valores obtenidos para la Estandarización de Carbonatos, n=10.....	46
Tabla 4: Etapas del Programa de la Perladora Fluxana modelo Vulcan.....	47
Tabla 5: Valores obtenidos para la Estandarización de Elementos Mayores, n=10.....	48
Tabla 6: Condiciones del programa para la digestión en Horno de Microondas, Marca CEM, modelo MARS XPRESS.....	49
Tabla 7: Porcentaje de recuperación para los standard certificados. Concentración reportada en mg/ kg.....	50
Tabla 8: Límite de detección obtenido para los elementos traza estudiados.....	51
Tabla 9: Profundidad y Edad en *AP de 3 secciones del N-13.....	55
Tabla 10: Resumen de las fracciones de los 3 núcleos estudiados.....	57
Tabla 11: Resumen de Resultados de Granulometría de los 3 núcleos, Mz= Tamaño de Grano; σ = Clasificación; Ski = Simetría; KG= Curtosis.....	64
Tabla 12: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard del carbono orgánico en los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en porcentaje.....	66
Tabla 13: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard de carbonatos de los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en porcentaje.....	68
Tabla 14: Resumen de los promedios mínimo, máximo y desviación standard de los Elementos Mayores de los núcleos N-13, N-22 y N-30.....	71
Tabla 15: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard de los elementos traza de los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en ppm.....	77
Tabla 16: Resumen del Índice de Terrígenos.....	83
Tabla 17: Valores del Factor de Enriquecimiento y sus parámetros.....	84
Tabla 18: Resumen del Factor de Enriquecimiento (FE), utilizando los valores de la corteza continental superior (Taylor, McLennan, 1985).....	85
Tabla 19: Parámetros del índice de geo-acumulación.....	86
Tabla 20: Índices de Geo-acumulación para los núcleos N-13, N-22 y N-30, usando los valores de la corteza continental superior como referencia.....	86
Tabla 21: Coeficientes para la Función Discriminante.....	88
Tabla 22: Coeficientes para la Función Discriminante, N-13.....	91
Tabla 23: Promedio de los parámetros en intervalos del N-13, de acuerdo al Cluster, construido en base a factores.....	94
Tabla 24: Coeficientes para la Función Discriminante, N-22.....	97
Tabla 25: Promedio de los parámetros en intervalos del N-22, de acuerdo al Cluster, construido en base a factores.....	100
Tabla 26: Coeficientes para la Función Discriminante, N-30.....	103

Tabla 27: Promedio de los parámetros en intervalos del N-30, de acuerdo al Cluster,
construido en base a factores.....106

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras constituyen áreas importantes para los océanos ya que ahí se encuentran grandes recursos tanto renovables (pesquerías, corales) como no renovables (hidrocarburos, fosforitas, costras metálicas etc.) por lo que un conocimiento de los procesos y características prevaleciente en estas áreas es de fundamental importancia.

El litoral mexicano ha sido dividido en nueve unidades (Carranza Edwards et al. 1975); esta clasificación de la línea de costa toma en consideración, características genéticas, tectónicas y morfológicas; una de estas unidades denominada planos costeros del sureste corresponde a la zona costera del Estado de Tabasco.

Las características geológicas y químicas de la plataforma continental adyacente al estado de Tabasco están asociadas no solo con la morfología y corrientes presentes en el área, sino también con el tipo y la cantidad de sedimentos que llegan a la zona costera a través de los ríos y escurrimientos continentales. Las corrientes litorales generan un transporte de arena sobre todo en las profundidades someras. Las descargas de sedimentos de los ríos de la región son determinantes en la morfología de la zona costera, por lo que es de suma importancia estudiar esta zona, la desviación de cauces de los ríos de Tabasco, como la sufrida en el antiguo delta del Usumacinta, el cual ya aparecía erosionado en una cartografía del año 1808 en West et al. (1976).

Los ríos que integran la compleja cuenca del Grijalva-Usumacinta presentan relevantes rasgos geomorfológicos y climáticos, en su cauce atraviesan cadenas montañosas y depresiones sujetas a precipitaciones torrenciales, las que dieron lugar al nacimiento de estos sistemas fluviales cuyas corrientes se precipitan hacia el litoral, desde alturas superiores a los 4000 metros sobre el nivel del mar, después de largos y sinuosos recorridos, acarreando ricas tierras aluviales y formando las mayores planicies costeras de la vertiente del Golfo de México (INECC, 2007).

El Río Grijalva, al igual que el Usumacinta, forma desembocaduras de carácter deltaico, que consisten en la bifurcación de sus escurrimientos en varios canales antes de llegar al mar, debido a los represamientos, los deltas de este sistema, se consideran un área vulnerable (Ortíz-Pérez, 1996). Todos estos mecanismos regulados por el ciclo hidrológico concentran en la cuenca del Grijalva-Usumacinta el 30% de los escurrimientos de los ríos de México (147 km³/año) y convierten a este enorme hidrosistema ecológico en el almacén de la más alta biodiversidad conocida de México.

Se han reportado (Hernández et al., 2008) evidencias de erosión costera en los últimos 30 años en el litoral de Tabasco, el cual ha sufrido retrocesos costeros en Sánchez Magallanes (3 a 5 m/año) y en la desembocadura río San Pedro y San Pablo (8 a 9m). Gornitz (1990) considera que las costas de alto riesgo ante el incremento en el nivel del mar son aquellas con bajo relieve, sustrato erosionable, retroceso histórico de la línea costera y oleaje de alta energía; esas son condiciones que presenta la costa tabasqueña y por lo tanto constituye uno de los sitios más críticos ante la elevación del nivel del mar (Ortiz y Méndez, 1999; Magaña y Gay, 2002).

Existen evidencias de que en la antigüedad el Río Usumacinta vertía sus aguas directamente al Golfo de México, lo que produjo la formación de un delta en su zona de descarga. Sin embargo, sin saber a ciencia cierta porque el cauce del río Usumacinta cambio integrándose al cauce del Río Grijalva.

Dado el enorme desarrollo de la industria petrolera en la zona costera adyacente al estado de Tabasco, con la presencia de oleoductos que atraviesan la zona así como la gran riqueza biológica presente en el área, se considera de interés estudiar los diversos procesos que han afectado el área.

En este trabajo se hizo un estudio geoquímico de tres núcleos de sedimentos localizados en la plataforma continental adyacente al estado de Tabasco con el objeto de evaluar a través de sus características los diferentes procesos que han afectado al área.

1.1 JUSTIFICACIÓN

El propósito de este trabajo de investigación es realizar un análisis geoquímico, en tres núcleos colectados en la plataforma continental del Golfo de México adyacente al estado de Tabasco, de los cuales se estudiarán sus características sedimentológicas y químicas. Dichas características están asociadas al tipo y la cantidad de sedimentos que llegan a la zona costera a través de los ríos y escurrimientos continentales. Las descargas de sedimentos de los ríos de la región son determinantes en la morfología de la zona costera, por lo que es de suma importancia estudiar la desviación de cauces de los ríos de Tabasco.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los procesos naturales y antrópicos que han afectado la plataforma continental del Estado de Tabasco por medio del estudio de las características sedimentológicas y químicas de núcleos de sedimento localizados en la zona.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

- 1.- Analizar visualmente y por Rayos-X, las características de los núcleos de sedimentos (color, laminaciones, presencia de organismos, etc.)
- 2.- Evaluar las características texturales (arenas, limo, arcilla) de las muestras de sedimento para entender su dinámica en el área de estudio.
- 3.- Evaluar el contenido de materia orgánica (%) que presentan las muestras de sedimento, por la interacción que presenta con cationes, especialmente con los metales de transición.
- 4.- Evaluar el contenido de carbonatos (%) que presentan las muestras de sedimento, para saber si son constituyentes importantes en el área de estudio.
- 5.- Determinar el contenido de elementos mayores (%) (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , P_2O_5) en los núcleos, para conocer la composición de los sedimentos.
- 6.- Evaluar la concentración de elementos traza Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, V en los sedimentos de los núcleos (ppm), debido a su posible toxicidad y para determinar si hay una posible influencia antrópica en el área.
- 7.- Realizar análisis estadísticos, utilizando los parámetros medidos, tanto sedimentológicos como químicos, que nos permitan determinar los procesos que han afectado los sedimentos a los largo del tiempo.
- 8.- Evaluar los elementos traza por medio del Índice de Terrígenos, Factor de Enriquecimiento, e Índice de Geo-acumulación para determinar si el origen de dichos elementos se asocia a procesos naturales o antrópicos.

Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SEDIMENTOS

2.1.1 Sedimento: Depósito o Acumulación de Materiales arrastrados mecánicamente por acción del agua o el viento.

2.1.2 Medio Sedimentario: Es una parte de la superficie terrestre que se diferencia física, química y biológicamente de los territorios adyacentes.

Los ambientes sedimentarios se clasifican en:

❖ Ambientes Continentales:

- 1) Fluvial
- 2) Lacustre
- 3) Glacial
- 4) Eólico
- 5) Pantanoso
- 6) Abanico Aluvial

❖ Transicional:

- 1) Estacionario
- 2) Lagunar
- 3) Deltaico
- 4) Playa

❖ Marino

La principal fuente de los sedimentos la proporciona los ríos y las rocas que se encuentran en su cuenca, los principales agentes de erosión y transporte son el agua y el viento.

Los sedimentos pueden contener diversos componentes individuales, los cuales se pueden clasificar de diferentes maneras, una de las cuales es la hecha entre componentes introducidos en aguas situadas encima de los sedimentos como fases sólidas y aquellos introducidos como material disuelto.

A su vez los componentes sedimentarios se pueden clasificar de acuerdo al material que transportan en: detríticos, aquellas partículas de roca provenientes de la ruptura mecánica de las rocas preexistentes como resultado de la meteorización y la erosión

y autígenos, aquellos minerales o materiales que se desarrollan in situ en la roca, en vez de haber sido transportados y depositados (Schlumberger, 2018).

Los sedimentos se pueden clasificar de manera simple en: litogénicos, cosmogénicos, hidrogénicos, biogénicos (Riley, 1990)

2.1.3 Fracción Detrítica: Son rocas provenientes de la ruptura mecánica de las rocas preexistentes como resultado de la meteorización y la erosión. Los fragmentos detríticos pueden ser transportados para recombinarse y, a través del proceso de litificación, convertirse en rocas sedimentarias (Schlumberger, 2018).

2.1.3.1 Componentes litogénicos: Son aquellos que resultan del intemperismo de la superficie terrestre.

2.1.3.2 Componentes cosmogénicos: Son materiales sólidos de origen extraterrestre.

2.1.4 Fracción autigénica: Son los materiales que se desarrollan in situ en las rocas, en vez de haber sido transportados y depositados. Estos minerales son el cuarzo, la clorita y otros minerales o cementos que rellenan los poros, que se desarrollan durante la diagénesis (Schlumberger, 2018).

2.1.4.1 Componentes hidrogénicos: Formados en el agua de mar, por las reacciones inorgánicas.

2.1.4.2: Componentes biogénicos: Producidos por los organismos marinos, y formados en el ambiente oceánico.

2.1.4.3: Agua Intersticial: Agua presente de manera natural en los poros de las rocas. (Schlumberger, 2018)

Los sedimentos de mar profundo provienen del depósito de partículas suspendidas en aguas oceánicas con profundidad mayor a los 500 m. Factores como la reactividad entre componentes y partículas disueltas en la columna de agua da como resultado la presencia de una producción distintiva de biomasa, que hacen de éste un ambiente único en el planeta. Este ambiente sedimentario que cubre más del 50% de la superficie de la Tierra, tiene características diferentes de las que se encuentran en los ambientes continentales o transicionales. Dos de las características distintivas de los sedimentos del mar profundo son: El tamaño de partícula y la tasa de sedimentación de sus componentes (Chester 2000).

Las fracciones terrígenas de los sedimentos del mar profundo son principalmente del tamaño de las arcillas (diámetro < 2 μm) que usualmente componen entre 60% y 70% del material.

2.2 CARBONATOS

En los sedimentos marinos, la mayoría de los carbonatos son de origen biogénico o litogénico, aunque los carbonatos inorgánicos pueden producirse directamente en el mar por medio de reacciones químicas. Los carbonatos presentes en el medio marino se pueden presentar en forma de: calcita (CaCO_3), aragonita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], magnesita (MgCO_3), siderita (FeCO_3) e hidromagnesita $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

La distribución de material carbonatado de restos de organismos en los sedimentos pelágicos depende del tipo de organismos que se encuentren en las aguas adyacentes, los modelos de circulación del agua y la tasa a la cual la disolución se presenta. Los factores que influyen en la tasa de disolución incluyen la profundidad del agua, la tasa de deposición de los sólidos totales, condiciones fisicoquímicas en la interfase agua-organismos y la tasa de renovación de calcio disuelto, la cual afecta el equilibrio de solubilidad de los carbonatos.

2.3 Carbono Orgánico

La materia orgánica en los sedimentos marinos juega un papel importante, proporciona un reservorio en el ciclo global del carbono y se vincula con la diagénesis temprana contribuyendo en la química del océano.

También es importante debido a que ejerce un fuerte control sobre la clase de cambio diagenético, el cual ocurre en los sedimentos marinos después de su deposición. Debido a esto, es necesario entender la relación entre la materia orgánica en los sedimentos marinos y sus respectivos ambientes de deposición. La concentración de carbono orgánico es más abundante en los sedimentos de la zona costera que en sedimentos de mar profundo.

El flujo de carbono orgánico disminuye rápidamente conforme aumenta la profundidad en la columna de agua ya que éste es remineralizado (Suess 1980).

Sólo una pequeña cantidad del carbono orgánico (1.5% de la producción primaria en mar abierto y menos del 17% en el talud continental) se deposita en el sedimento superficial y está disponible para el bentos, donde la mayor parte es oxidado (Setter et al. 2004).

Existe información que sugiere que se secuestra entre el 0.5% al 3% de la producción primaria (PP) sobre la plataforma y el talud continental y 0.014% en el

mar abierto (Wollast 1998). Los márgenes continentales representan sólo una pequeña porción del 20% de la superficie mundial del océano; sin embargo, el 80% de la materia orgánica acumulada globalmente es depositada en estos sitios, constituyendo el depósito principal de carbono en el océano (Naijar et al. 1992, Seiter et al. 2004).

2.4 Composición Química de los elementos de los sedimentos de estudio

2.4.1 Elementos Mayores

La corteza continental representa el 40% de la superficie de la Tierra. Se compone de una variedad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias reunidas en placas tectónicas.

El 98.5% de la corteza se compone de sólo 8 elementos. Los principales elementos y su respectiva composición son: oxígeno (46.71%), sílice (27.69%), aluminio (8.07%), hierro (5.05%), calcio (3.65%), sodio (2.75%), potasio (2.58%), magnesio (2.08%), titanio (0.62%), hidrógeno (0.14%), fósforo (0.13%), carbono (0.094%), manganeso (0.09%).

Los elementos mayores están presentes en altas concentraciones y controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos. Son aquellos elementos cuyas concentraciones tienen más del 1% en peso, es decir, 100 ppm.

En este estudio se evaluaron las concentraciones de los siguientes elementos mayores: SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, TiO₂, P₂O₅ y MnO.

2.5 Características Principales de Elementos Mayores en la Corteza

2.5.1 Silicio

Después del oxígeno es el elemento más abundante en la corteza terrestre. Es muy importante en procesos sedimentarios y bioquímicos.

Debido a su elevada energía de enlace con el oxígeno, el silicio emigra exclusivamente en la forma de coordinación tetraédrica SiO₂, por lo general como ácido H₄SiO₄ en soluciones diluidas y en parte, polimerizado en diversos

grados en soluciones más concentradas. El silicio se libera por hidrólisis de los silicatos de las rocas ígneas. A pesar de la mayor alterabilidad de las rocas básicas, no hay gran diferencia en la concentración de SiO_2 en las aguas que se filtran a través de rocas basálticas con respecto a las que atraviesan rocas ácidas, a razón de 20 a 100 ppm. Durante el intemperismo la mayoría del silicio queda inmovilizado en minerales inatacables como el cuarzo, en restos inalterados de minerales medianamente atacables como feldespatos y micas y en silicatos hidrolíticos resultantes de la alteración (arcillas).

Puede ser transportado por los ríos en bajas concentraciones, las cuales llegan al mar, aunque ciertas cantidades quedan retenidas en el continente. En el proceso de diagénesis, el silicio es muy importante.

2.5.2 Aluminio

Es un elemento que presenta gran insolubilidad. Tiene un radio iónico de 0.5Å que le permite adoptar la coordinación 4 en Feldespatos o 6 en Micas, siendo esta última la más estable y la que adopta cuando no intervienen en la estructura otros cationes. En la naturaleza el aluminio casi siempre está ligado al oxígeno. Es un elemento anfótero, por lo que puede actuar como base o como ácido. Con intemperismo, la alúmina producida por la hidrólisis de los silicatos permanece en la superficie junto con el silicio (arcillas, Al_2O_3 hasta 40%), si la lixiviación es moderada o aislada se presenta en forma de hidróxido (gibbsita, boehmita); si la lixiviación es intensa (lateritas, bauxitas, Al_2O_3 , más del 60%)

La única alúmina generada por la hidrólisis que se moviliza y llega hasta el mar es aquella que forma parte de las arcillas, las lateritas y las bauxitas transportadas en suspensión. En el agua de mar, la concentración de aluminio es de una parte por billón. La cantidad de alúmina transportada como parte de las arcillas es, sin embargo, muy elevada. Esta alumina se mantiene estrechamente ligada a la sílice en las estructuras laminares arcillosas y micáceas, mientras están expuestas a la halmirólisis y posteriormente a la diagénesis. Las arcillas marinas pueden ser expuestas a la meteorización y erosión, sin que se produzca la separación del aluminio y el silicio, excepto en climas tropicales. En estos climas se produce la hidrólisis de las arcillas y la formación de residuos concentrados de Al_2O_3 que los obtenidos a partir de rocas ígneas comunes.

2.5.3 Calcio y Magnesio

El calcio está presente en las rocas ígneas de la corteza superior dentro de los minerales plagioclasa (3%) y anfíbol (10%). Mientras que el magnesio se encuentra

en la biotita (18%) y anfíbol (8%). El calcio se puede encontrar en forma de apatita. Durante la intemperización, el calcio y el magnesio pueden separarse inmediatamente debido a la mayor solubilidad del $MgCO_3$ respecto al $CaCO_3$. El magnesio no precipita junto al calcio, sino que emigra en las aguas subterráneas y fluviales (Chester, 2000).

La relación Ca/Mg en los ríos mantiene un valor de 2:3 no muy diferente al que tienen cuando se presentan en las rocas graníticas, lo que indica que la intemperización es transitoria y que alcanzada una acumulación crítica, el transporte de calcio mantiene su valor equivalente al del magnesio.

Aunque el magnesio no precipita mayormente con el calcio, en ciertas condiciones puede fijarse en las calizas ya formadas reemplazando parte del $CaCO_3$ por $CaMg(CO_3)_2$ (Dolomita).

El carbonato de calcio se deposita de preferencia en cuencas sedimentarias continentales. La relativa facilidad de erosión y disolución del carbonato origina un fuerte aporte de calcio en aguas superficiales y subterráneas, por lo que el $CaCO_3$ se puede manifestar en sedimentos (Chester, 2000).

2.5.4 Hierro

El hierro es relativamente abundante en las rocas ígneas donde se presenta tanto en silicatos (olivinos y piroxeno en rocas básicas, anfíbol en las intermedias y biotita en las ácidas) así como en forma de óxido (magnetita, ilmenita). En los silicatos, está presente como Fe^{2+} , por ejemplo en la magnetita.

En el intemperismo, el ion ferroso se oxida al liberarse por la hidrólisis del silicato y se fija como hidróxido férrico en diversos estados de hidratación.

Su origen puede ser: *detrítico*, es decir, de partículas minerales arrastradas por los ríos después de ser desgastadas de las rocas; *químico*, por precipitación de las sales de hierro de los sedimentos, y *biológico*, por la resultante de la actividad orgánica de los animales y vegetales (Chester, 2000).

2.5.5 Sodio y Potasio

Se encuentran en la zona externa de la corteza, concentrados en rocas graníticas, en particular en la plagioclasa sódica, feldespato potásico y biotita. Ambos elementos, se encuentran en el mismo grupo de la Tabla Periódica, sus sales simples tienen solubilidades similares pero su comportamiento geoquímico, difiere en muchas formas. La mayoría de los compuestos que no son silicatos tienen altas

solubilidades. Esto significa que una vez que los silicatos primarios, como los feldespatos se han roto por intemperismo, el sodio rápidamente es lixiviado de la tierra y transportado al océano. La única barrera para su remoción rápida es la tendencia de los iones Na^+ ser fuertemente adsorbidos por las arcillas y materiales orgánicos que tienen cargas negativas.

Su potencial iónico les permite una fácil movilidad, aunque se produce un fraccionamiento, el sodio en forma de Na_2CO_3 y NaHCO_3 es transportado íntegramente a la capa freática, mientras que el potasio es retenido en gran medida en los productos de la desintegración de los silicatos (SiO_2 , Al_2O_3 y H_2O) con los cuales forma illita, $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$ mineral que no tiene equivalente sódico.

El sodio extraído de los continentes por medio de la intemperización y erosión, se concentra en su mayor parte en los océanos. Los sedimentos salinos sepultados en las cuencas sedimentarias pueden salinizar la capa freática, que a su vez saliniza y solidifica los suelos de muchas regiones (Chester, 2000).

Por otro lado los silicatos de potasio liberan iones K^+ , los cuales pueden ser retenidos en la superficie de las arcillas, ya que estos tienen carga negativa. A diferencia de los iones de sodio, los del Potasio se incorporan fácilmente a las estructuras de silicatos con la formación de minerales arcillosos y su concentración de material biológico es 15 veces más grande que la del sodio. El potasio es un factor importante de la fertilidad de los suelos. Este se encuentra principalmente en los feldespatos y en las micas de la fracción detrítica.

En las zonas litorales la cantidad de potasio puede modificarse al ser asimilado por los vegetales marinos que cubren el fondo costero. En la cantidad de potasio también intervienen otros factores como: aportes de agua dulce, presencia en el agua del mar de sustancia orgánica en descomposición llamada detritus y formación de compuestos arcillosos (Chester, 2000).

2.5.6 Azufre

Es un elemento que le permite combinarse con una gran cantidad de cationes, gracias a sus estados de oxidación. Se encuentra en la corteza en forma de sulfatos S^{+6} , sulfuros S^{-2} y en estado base S^0 .

En las rocas ígneas, el azufre se encuentra exclusivamente en el estado reducido de sulfuros, típicamente pirita, mostrando un 0.01 a 0.1% de azufre (Chester, 2000).

El ión SO_4^{2-} se mantiene en solución en presencia de los cationes alcalinos y alcalinotérreos. El CaSO_4 es relativamente insoluble, provocando la formación de yeso en climas áridos cuando la concentración del anión es elevada, pero la mayor parte de los sulfatos emigran hacia el manto freático y los cursos de agua. La concentración media de SO_4^{2-} en los ríos es de casi 10 ppm.

En el fondo de cuencas marinas o lacustres donde la circulación es limitada, se puede producir la reducción del ion sulfato a sulfuro, que se fija en forma de pirita (FeS_2). El poder reductor del medio está determinado por la ausencia de oxígeno y la presencia de materia orgánica en descomposición bacteriana anaeróbica, cuya oxidación exige la reducción de los iones S^{+6} a S^{-2} y Fe^{3+} a Fe^{2+} . Esta descomposición de la materia orgánica es incompleta y por ello las acumulaciones de sulfuros sedimentarios acompañan a los sedimentos bituminosos como las lutitas (Chester, 2000).

2.5.7 Fósforo

El fósforo es un elemento primordial en la vida animal y vegetal. El estado de oxidación común en la corteza terrestre es 5+, el compuesto más común es la fluorapatita $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$, un mineral que se encuentra casi siempre en las rocas ígneas en un 0.2 a 0.5%. Hay una gran variedad de otros fosfatos naturales, pero son más escasos que la apatita. Este mineral se disuelve lentamente en aguas intemperizadas, en forma de fosfatos alcalinos.

El fósforo transportado por los ríos tiene una concentración muy baja (20 $\mu\text{g/L}$). En la industria de los fertilizantes se extrae de antiguos depósitos marinos formados en cuencas favorecidas por corrientes ascendentes. La acumulación de detrito orgánico en áreas marinas ricas en nutrientes da origen a yacimientos de fosfóritas.

2.5.8 Manganeso

Tiene un comportamiento similar al del hierro, aunque con diferencias significativas. El manganeso de los magmas precipita en las rocas formando parte de los silicatos. El ion Mn^{2+} sustituye en pequeñas proporciones a los iones Mg^{2+} y Fe^{2+} en minerales como piroxenos y anfíboles.

En las rocas sedimentarias, el manganeso se presenta casi exclusivamente en estado cuadrivalente, en especial en forma de MnO_2 (pirolusita). El ion Mn^{+3} es mucho menos común, pero se puede presentar condiciones intermedias entre las rocas magmáticas y las sedimentarias, por ejemplo en los depósitos hidrotermales y en rocas metamórficas, donde suele estar asociado generalmente al ion Mn^{+2} .

Durante el intemperismo, el Mn^{2+} liberado por la hidrólisis de los silicatos tiende a oxidarse y precipitarse en forma análoga al hierro. Sin embargo la estabilidad del Mn^{2+} es mucho mayor que la del Fe^{3+} , por lo tanto se mantiene por más tiempo en solubilidad, lo cual permite separarse del hierro. En la actualidad, la deposición del manganeso en el mar es proporcionalmente más intensa que la del hierro. En el fondo marino se encuentra gran cantidad de nódulos de manganeso.

2.6 Elementos Traza

Son los elementos presentes de forma natural en la corteza terrestre en concentraciones de 0.1% o 100 ppm y con frecuencia menores de 0.001%. Estos tienen mayor variación en la concentración que los elementos mayores. Generalmente se consideran 10 a 12 elementos mayores mientras que los elementos traza son más de 70.

La importancia de los elementos traza es que tienen propiedades químicas únicas que registran procesos que no se observan en los elementos mayores.

En este estudio se evaluaron las concentraciones de los siguientes elementos traza: Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Cobre (Cu) y Vanadio (V).

2.6.1 Plomo

El plomo forma parte de un grupo de elementos cuya abundancia tiene un origen natural y antropogénico. Se encuentra en una concentración promedio de 17 mg/kg en la corteza superior continental (Wedepohl, 1995). Es útil en el estudio de sedimentos marinos ya que ayuda al registro de fechados de los procesos que se analizan. No tiene un papel muy importante en organismos vivos. Es un elemento tóxico aún en bajas concentraciones (Bryan, 1976). Se presenta en dos estados de oxidación Pb^{+2} y Pb^{+4} siendo el primero el que predomina en el ambiente acuático. En el agua de mar se encuentra como $PbCl_2$ (43%), $PbCO_3$ (42%) y $Pb(OH)_2$ (9%) (Whitfield et al. 1981), asimismo algunos compuestos sulfurosos se forman con este metal en condiciones anaeróbicas en los sedimentos marinos.

Su valor en los sedimentos de los ríos está en un intervalo de 10 pg/g a 500 pg/g para aquellos ríos que atraviesan áreas industrializadas y densamente pobladas (Nriagu y Coker 1980). De igual manera, su cantidad aumenta en sitios donde hay descargas de lodos de plantas de tratamiento, dragado de puertos y canales de

navegación o por el derrame de desechos industriales a ríos, estuarios y lagunas costeras (Nelmes et al. 1974, Stanford et al. 1981).

2.6.2 Cadmio

El cadmio se encuentra en una concentración promedio de 98 mg/kg en la corteza superior continental (Wedepohl, 1995). En ambientes dulceacuícolas, está íntimamente asociado con la materia coloidal como CdCl_2 y CdSO_4 . En el mar el 66% está presente como ion Cd^{+2} junto con CdCO_3 , (26%), $\text{Cd}(\text{OH})_2$, (5%), CdCl_2 , (1%) y CdSO_4 , (1%) (Whitfield et al. 1981). En aguas costeras y estuarinas una alta proporción de este metal se encuentra asociado a partículas formando complejos (MacKay 1983). Las principales fuentes de cadmio en ambientes acuáticos son debidas al lavado de los suelos agrícolas y a las descargas de la minería y la industria. Otro origen importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento (UNEP 1985). La presencia de cadmio en los sedimentos de las zonas litorales es considerada como un componente normal de los sedimentos marinos y como un aporte de las rocas fosfóricas (Largerwerff 1972).

2.6.3 Cromo

El cromo se considera un metal esencial en organismos cuando se encuentra a bajas concentraciones, al aumentar éstas, el Cr^{6+} es muy tóxico por su solubilidad y fácil penetración al interior de las células, mientras que el Cr^{3+} es insoluble y de difícil ingreso (National Academy of Sciences 1974, Villalobos- Pietrini 1979, Rosas et al. 1989). Se encuentra en una concentración promedio de 107 mg/kg en la corteza superior continental (Wedepohl, 1995). En los ríos y océanos, está constituyendo complejos, principalmente hidróxidos en concentraciones que van de 1 a 1.5 pg/l. En aguas marinas existe el ion CrO^{-2} formando parte de los nódulos de manganeso (Riley y Chester 1971). En los sedimentos costeros las concentraciones decrecen en zonas oceánicas profundas, siendo de 80 pg/g para el Atlántico y de 77 pg/g para el Pacífico (Riley y Chester 1971). En ambientes costeros están íntimamente asociadas a desechos industriales, de minería, galvanoplastia, así como en el uso de fertilizantes.

2.6.4 Vanadio

El vanadio (V) es un metal ampliamente distribuido tanto en la naturaleza como en los sistemas biológicos y es uno de los elementos traza presente en los combustibles de tipo fósil. Se encuentra en una concentración promedio de 107 ppm en la corteza terrestre (Wedepohl, 1995). Por esta razón, la combustión de estos materiales es la fuente más importante de vanadio en el ambiente.

2.6.5 Cobre

El cobre se produce de forma natural y antropogénica. El cobre tiene una concentración de 25 ppm en la corteza terrestre y 0.25 ppb en el agua del océano y puede presentar una concentración de más de 100 ppm en los sedimentos. El cobre se introduce en el medio ambiente acuático a través de una serie de métodos naturales. La presencia de cobre en el medio acuático puede deberse por diversos factores como son: minerales que se encuentran en el suelo y rocas erosionadas que forman posteriormente los sedimentos y partículas suspendidas en el agua, por extracción de cobre de la roca a un estado disuelto y partículas biológicas, que incluyen material orgánico, por sistemas hidrotermales en los que se encuentra el agua a altas temperaturas o químicamente alterada, por o bien por la entrada de sedimentos, ya sea directamente en el agua o lixiviados después de la deposición en tierra (Riley, J.P. 1990).

2.6.6 Zinc

Es un indicador de la actividad humana y puede llegar al mar por vía de efluentes domésticos, industriales, por las descargas de los ríos o emanaciones de la atmósfera, pero posteriormente son depositados y acumulados en el sedimento mediante proceso biogeoquímicos (Acosta *et al.*, 2002). Se encuentra en una concentración promedio de 190 ppm en la corteza terrestre (Wedepohl, 1995).

2.6.7 Níquel

El níquel, al igual que otros elementos metálicos como el vanadio, cromo y el plomo, se le relaciona con la industria del petróleo, particularmente con los efluentes provenientes de los procesos de refinación de crudos, así como de la industria

productora de fertilizantes, de la industria del transporte y fundidoras (Wittman, 1979); por lo tanto, sus fuentes de aporte a los sistemas costeros son variadas.

El níquel a diferencia del plomo, es considerado como un elemento esencial para los seres vivos, por lo que los procesos biogeoquímicos asociados con su permanencia en el ambiente, permiten la biodisponibilidad del metal, tanto en ambientes terrestres y acuáticos, y los cuales se ven potenciados por las capacidades mismas de los organismos para su incorporación.

Se encuentra en una concentración promedio de 44 ppm en la corteza terrestre (Wedepohl, 1995).

Capítulo 3: ÁREA DE ESTUDIO

En este proyecto se estudiaron 3 núcleos, localizados en la Plataforma Continental del Golfo de México adyacente al Estado de Tabasco.

Del núcleo 13 (N-13) se obtuvieron 27 muestras, del núcleo 22 (N-22) se obtuvieron 26 muestras y del núcleo 30 (N-30) se obtuvieron 17 muestras.

Dichos núcleos tienen la siguiente ubicación:

Núcleo	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Longitud Núcleos (cm)	Profundidad de la columna de agua (m)	Distancia a la costa (km)
N-13	19°21'45.24'	92°29'12.96'	264.7	110	87.41
N-22	19°13'33.22'	92°38'16.33'	255	110.5	70.49
N-30	19°5'11.63"	92°47'44.90'	173	108	55.94

Tabla 1: Coordenadas y Longitud de los Núcleos N-13, N-22 y N-30

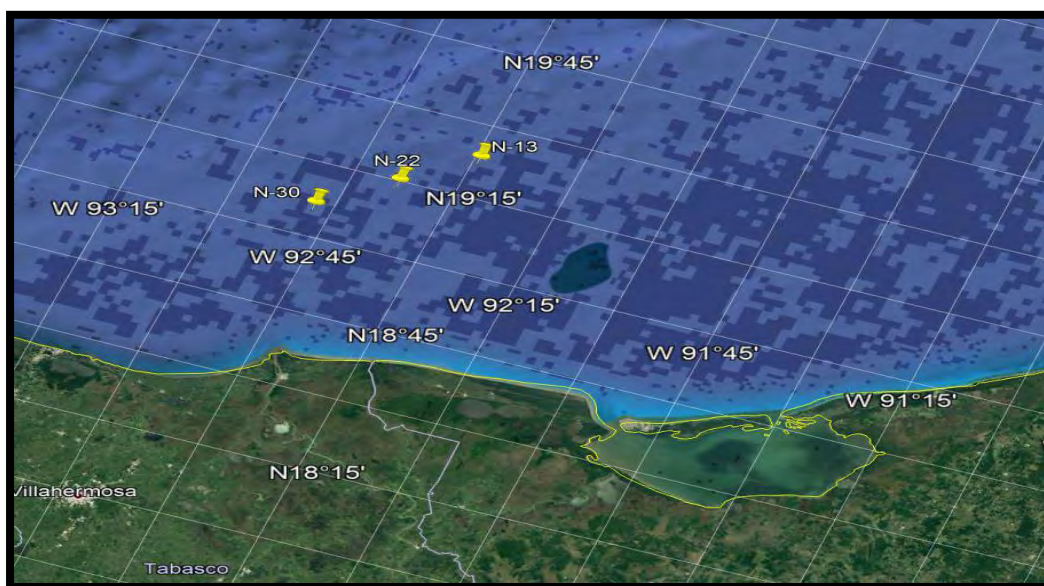


Figura 1: Ubicación de los 3 núcleos analizados en la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta. Google Maps. 2017

3.1 IMPORTANCIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Tabasco es una zona de suma importancia económica por su riqueza pesquera y por los recursos de gas e hidrocarburos que posee. Esta zona costera está sufriendo serios procesos de erosión provocados por el represamiento de ríos, la sobre explotación de acuíferos, la construcción de escolleras y las tuberías localizadas en el lecho marino que impiden la circulación de los sedimentos.

3.2 SISTEMA GRIJALVA-USUMACINTA

Hace aproximadamente 500 años, los ríos Grijalva-Usumacinta tenían un cauce distinto al que conocemos en la actualidad, los ríos San Pedro y San Pablo, así como el río Usumacinta, aparecieron posteriormente debido a cambios en las condiciones hidrodinámicas, sedimentológicas y morfológicas, en el siguiente mapa (Figura 2) se observa que las principales descargas al Golfo de México provenían del río Dos Bocas y del río Grijalva (Melchor de Alfaro y Santacruz, 1579).



Figura 2: Mapa de la Provincia de Tabasco, hecho en 1579 por Melchor de Alfaro y Santacruz, fotografiado por A. Aguilar, 2007

Entre los años 1700 y 1800 el sistema deltaico Mezcalapa-Grijalva-Usumacinta se forma a partir de tres ríos, el Mezcalapa, el San Pedro-San Pablo y el Grijalva. Este

sistema pertenece a la provincia fisiográfica de la llanura del Golfo del Sur y se ubica sobre rocas sedimentarias originadas durante el Cenozoico. Desde el Cuaternario la llanura costera ha estado en formación mediante el aporte y depósito de materiales terrestre acarreados por corrientes fluviales desde Guatemala y Chiapas (Ortíz et al., 2005). Dichos materiales dieron su forma arqueada al actual delta activo.

3.2.1 Planicie fluviodeltaica del Cuaternario

Está formada por depósitos aluviales deltaicos y presenta cursos activos en diversas orientaciones y lechos abandonados producto de las modificaciones continuas de las trayectorias. Conforme crece y avanza el delta hacia el mar, la capacidad de carga de las corrientes decrece, el drenaje es insuficiente en las crecidas y desestabiliza los cursos fluviales, lo que ocasiona desbordes y cambios de trayectoria de la red hidrográfica. Estos desbordes y cambios de trayectoria forman abanicos de displayamiento, conocidos en Tabasco como “rompidos” (Arreguín, *et al.*, 2014), que modificaron la red hidrográfica y dejaron inactivos los deltas Usumacinta y Mezcalapa. El Río Usumacinta se juntó con un nuevo tributario hacia el noroeste y ocupó una nueva trayectoria durante el Holoceno, mientras que la corriente del Mezcalapa cambió de trayectoria aproximadamente en el año de 1675 (Arreguín *et al.*, 2014; Chávez, 2005; Ortiz, 1992) y formó junto con otros tributarios el Río Grijalva (Figura 3).

El sistema Grijalva-Usumacinta ocupa el segundo lugar en cuanto a descarga hacia el Golfo de México, siendo el primero el río Mississippi. La magnitud de descarga de agua de este sistema depende de las condiciones meteorológicas que se presentan en la zona, teniendo una descarga promedio anual de 56,113.74 millones de m³/ año (Plan Hídrico Integral de Tabasco, 2008). Se observan fuertes precipitaciones en la temporada de huracanes y menores precipitaciones durante el paso de frentes fríos atmosféricos, como lo fueron los huracanes Gilberto, Dean, etc.(West at al, 1976)

En la zona costera, la entrada de agua de río produce una región de baja salinidad que fluye mar adentro y que al encontrarse con el agua de mar de diferentes características genera fuertes gradientes horizontales de salinidad. Generalmente se observa un sistema de dos capas, la capa superior es ocupada por agua del sistema fluvial, mientras que en la inferior se encuentra el agua de mar. Sin embargo el viento y las corrientes de marea en la región próxima a la costa causan una mezcla vertical entre ambas capas reduciendo la diferencia de salinidad (CONAGUA, 2014).

El frente halino superficial del sistema Grijalva-Usumacinta ha sido monitoreado en diferentes épocas: Abril de 1984 (Czitrom et al. 1986:302), a finales de otoño de 1987 (Monreal-Gómez et al, 1992) y de manera periódica desde 1999 hasta la fecha (PROMEBIO 1999). Inicialmente se postuló que este frente se formaba cuando existían las descargas fluviales máximas y que al presentarse vientos intensos del norte se produciría la mezcla y el frente desaparecería, sugiriendo así el carácter estacional del frente. Sin embargo se ha observado que aún después del paso de Nortes intensos (Alatorre et al.1989:193) y bajas descargas fluviales, este frente es permanente y su extensión e intensidad dependen de la magnitud de la descarga, de las corrientes costeras y del viento (Monreal-Gómez et al.1992:132).

3.3 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Grijalva-Usumacinta se localiza en el sureste de la República mexicana y administrativamente comprende los estados de Tabasco y Chiapas y pequeñas porciones de Campeche.

Su extensión territorial es de 91345 km² y representa el 4.7% del territorio nacional. Sus latitudes extremas son al norte los 18°39' latitud norte y al sur los 16° 30' latitud norte, al extremo oriente se ubica en los 90°22' y al oeste en los 94°38'.

3.4 SEDIMENTOS COSTEROS

Todas las corrientes de agua de los llanos de Tabasco desaguan en el Golfo de México. En las costas inmediatas, las mareas, el oleaje y las corrientes distribuyen los sedimentos arrojados por las bocas de los ríos para configurar las formas de la costa a todo lo largo del litoral tabasqueño.

3.5 MAREAS

Las variaciones de las mareas astronómicas a lo largo de la costa del Golfo, son relativamente pequeñas, aproximadamente miden cerca de 50 cm cerca de la desembocadura del río Grijalva y una variación de mareas ligeramente menor en el resto de la costa.

Las frecuentes mareas de viento producen normalmente mayores modificaciones en los niveles del mar, que las mareas a lo largo de las costas del Golfo de México. El régimen de mareas es esencialmente diurno, incluyendo una pleamar y una bajamar por día a lo largo de todo el litoral tabasqueño. Los vientos sobre la costa pueden elevar el nivel del mar de 50 a 75 cm por encima de los niveles de la primavera (West, 1985), teniendo un promedio en los últimos 3 años de 0.4 m en la pleamar y de 0.1 m en la bajamar (Tabla de Mareas, 2018)

3.6 OLEAJE

La acción de las olas sobre la costa de Tabasco presenta contraste en cada estación. Durante la mayor parte del año, tienen elevaciones de clima calmado, con amplitudes de 30 a 70 cm que bañan el litoral, es decir son olas de poca energía que producen acumulaciones en la playa y perfiles de playa anchos de suaves declives. Sin embargo, cuando hay presencia de nortes o huracanes como la Tormenta Tropical Earl, pueden alcanzar alturas de 2.5 m (SINAPROC, 2016). Olas de mucha energía, pueden provocar que se agiten grandes cantidades de sedimento en la playa, ocasionando que los frentes de playa se hagan más pronunciados. La acometida de las olas ocasionalmente lanza sedimentos hasta las más antiguas formas costeras. La combinación de clima tranquilo y condiciones de tempestad en el mar causa la migración de sedimentos de playa y es responsable de casi todas las formaciones costeras. (West, 1985).

3.7 CORRIENTES

A lo largo de la costa de Tabasco, las olas normalmente llegan del noreste, creando una corriente que marcha hacia el oeste pegada a la costa. Los sedimentos arrojados por las bocas de los tributarios son comúnmente llevados por la corriente y contribuyen a la formación de las playas occidentales. Sin embargo, en condiciones de norte, las cuales llegan del noroeste, se observa un cambio de dirección de la corriente en sentido opuesto. Las observaciones del movimiento de las playas, sobre el terreno, apoyan la teoría de la migración de sedimentos de playa hacia el oriente cuando dominan las olas generadas por los nortes. (West, 1985)

3.8 FISIOGRAFIA

De acuerdo con la clasificación del INEGI (2000), la cuenca del Grijalva-Usumacinta comprende parte de tres provincias fisiográficas: a) La Cordillera Centroamericana, que incluye a lo que más comúnmente se llama Sierra Madre de Chiapas, b) La provincia Sierras de Chiapas y Guatemala, que incluye a la Altiplanicie Central, las Montañas del Norte y, como una discontinuidad, a la Depresión Central de Chiapas y finalmente, la provincia c) Llanura Costera del Golfo Sur, que ocupa casi todo Tabasco.

Los principales macizos montañosos los constituyen: en Guatemala, en el borde sur y sureste, la Sierra de los Cuchumatanes, con altitudes mayores de 3800 msnm; en territorio mexicano, como continuación de ella hacia el norte por el lado oeste, la Sierra Madre y, por el lado este, la Altiplanicie de Chiapas. Las Montañas del Norte cuentan con una altitud general un tanto menor, pero con algunas serranías altas (Helbig 1976, Müllerried 1957, INEGI 2004-2006).

La Sierra Madre es una estructura asimétrica que muestra la forma de un bloque similar a un techo de dos aguas, inclinado de manera desigual, descendiendo abruptamente hacia la costa de Chiapas y con menor pendiente hacia la Depresión.

Sirve de línea divisoria de las aguas entre la vertiente del Pacífico y la del Atlántico-Golfo de México. La distancia del parteaguas a la base de la sierra en el pacífico es de 20 km y de 40 km por la vertiente atlántica al pie septentrional, a una altitud de 500-700 msnm, en los bordes de la Depresión Central. La Sierra es más alta, hasta unos 3000 msnm, en su porción sureste debido a un mayor levantamiento relativo. Está coronada por el Volcán Tacaná, aunque ya fuera de la Cuenca del Grijalva, y se continúa en el Departamento de San Marcos, Guatemala. Su altitud disminuye paulatinamente hacia el noroeste (1000-1500 msnm), en los límites con Oaxaca (Waibel, 1946).

El cuerpo principal de la Altiplanicie de Chiapas (o región de “Los Altos”) se levanta a más de 1000 metros.

La Depresión central es una gran concavidad en forma de artesa o batea, lo que representa un amplio levantamiento relativo de la Altiplanicie respecto a la Depresión. Esta última se encuentra flanqueada en el sur por los Cuchumatanes (en el departamento de Huehuetenango, Guatemala) y en el oeste por la Sierra Madre. Dentro de México, la depresión tiene altitud general de 600 msnm en el sureste, hasta cerca de 400 m en la entrada del Cañón del Sumidero. En los alrededores de Tuxtla y Ocozocoautla se localizan algunas mesetas con altitudes entre 700 y 900 metros y picos aislados de más de 1000 metros.

Aunque la altitud general de las montañas del norte de Chiapas, fluctúa entre los 500 y 1500 msnm, en su parte central existe un macizo importante, mayor de 2000 metros. Asimismo, al oriente de Jitotol y de Rincón Chamula, hay una serranía, con dirección casi norte-sur, que alcanza más de 2300 metros. Este macizo resulta importante porque sirve de divisoria entre los escurrimientos que, fluyendo hacia el sur o hacia el oeste, van a dar o bien a la corriente principal del Grijalva antes de que éste entre a la planicie (cuyo último punto sería la Presa Peñitas), o bien se unen al Grijalva ya en la parte baja, aquéllos que fluyen hacia el norte. De esta manera, la porción occidental de las montañas del norte resulta ser la de menor altitud, con valores generales menores de 1500m. La vertiente septentrional de las montañas del norte es amplia y no desciende bruscamente hacia la planicie del Golfo.

3.9 CLIMATOLOGÍA

De acuerdo a la clasificación de Köppen, predominan los climas cálidos sub-húmedos *Aw* y cálidos húmedos *Am*. Ambos tipos de clima indican que la temperatura media anual mayor es de 22°C y la temperatura del mes más frío mayor es de 18°C. Las lluvias se presentan casi todo el año (temporada de secas de marzo a abril) lo que genera una gran cobertura nubosa con humedad relativa de 80% y 86%. La Precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; lluvias de verano y el porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

La precipitación de la región es la mayor del país y una de las más altas del mundo. Su media anual es de 2143 mm, 2.6 veces el promedio nacional, llegando en algunos lugares como la región de Teapa, Tabasco hasta los 4,000 mm al año.

Estas lluvias tienen lugar en el verano y principios de otoño con variaciones promedio de 40 mm en la costa y de 100 mm en las laderas de las sierras. De octubre a marzo tienen lugar frentes fríos originados por nortes los cuales aportan lluvia por lo general de baja intensidad (INEGI, 2000). Carrera (GET, 2008) señala que el Delta de Tabasco, ubicado en Frontera y rodeado de terrenos bajos y pantanosos, origina que el agua de las mareas entre a la zona durante la temporada de lluvias generando problemas por inundación.

Por su posición latitudinal, la Cuenca del río Grijalva se ubica dentro de la zona intertropical, lo que significa que se reciben los rayos del sol con escasa inclinación a lo largo del año.

Dado que el ángulo de incidencia de los rayos solares determina la intensidad de insolación de la superficie, esto implica una alta cantidad de energía disponible para activar diferentes fenómenos meteorológicos (Strahler y Strahler 2002).

3.10 HIDROLOGÍA

El río Grijalva nace en Guatemala en la Sierra de Cuchumatanes, entra a México, recorriendo la depresión central de Chiapas, donde sus aportaciones son primero reguladas a través de la presa La Angostura en el Alto Grijalva, aguas abajo el río Grijalva bordea la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Capital del estado de Chiapas, aguas abajo se ubica la presa Chicoasén, la más eficiente en generación eléctrica del país, posteriormente el Grijalva cuenta con las aportaciones por margen izquierda del río La Venta y por la margen derecha de los ríos Chicoasén y Yamonho, donde se ubica la presa Malpaso, después recibe las aportaciones de varias corrientes que dan origen al río Mezcalapa, como se le llama localmente al río Grijalva, después se bifurca en los ríos Samaria por su margen izquierda, el cual desemboca el golfo de México en la Barra de Chiltepec después de varias bifurcaciones, y el río Carrizal por su margen derecha, este último cruza la Ciudad de Villahermosa, capital del Estado de Tabasco, donde recibe las aportaciones de los ríos que nacen en las montañas del Bajo Grijalva. Después de Villahermosa continúa el río Grijalva hasta confluir con el río Usumacinta para después desembocar al golfo de México (INECC, 2017).

El volumen medio anual que escurre hacia la desembocadura del Río Grijalva se encuentra alrededor de los 27013 millones de m³ anuales, si a este volumen añadimos el volumen medio anual del Río Usumacinta la corriente principal de la cuenca Grijalva Usumacinta la cantidad de agua dulce que desemboca al Golfo de México es de alrededor de 125000 millones de metros cúbicos (Gobierno del Estado de Tabasco, 2018).

3.11 GEOLOGÍA

Las rocas sedimentarias son las que dominan la región de la cuenca del Grijalva-Usumacinta, con excepción de una pequeña porción que se encuentra en Teapa, que presenta rocas ígneas (INECC, 2017)

Dentro de las rocas sedimentarias, prevalecen sedimentos denominados suelos, formados durante el Cuaternario Reciente, ubicados en planicies aluviales de los ríos, le siguen las areniscas y lutitas que coinciden con las terrazas del Mioceno. En menor escala se encuentran las rocas calizas de las laderas y colinas, así como lutitas, areniscas y limonitas, situadas y colinas y laderas inclinadas (INECC, 2017)

3.12 EDAFOLOGÍA

La cuenca de los ríos Grijalva-Usumacinta, presenta 8 clases de suelo diferentes, estos son: 1) Acrisol, 2) Arenosol, 3) Cambisol, 4) Fluvizol, 5) Feozem, 6) Gleysol, 7) Litosol, 8) LLuvisol. El principal uso que se da al territorio del estado de Chiapas es el agrícola y pecuario con una gran cantidad de bosques, selva, llanuras y partes de montaña y terrenos de costa, la mayor parte de los terrenos del estado son ejidales y en una menor proporción son pequeñas propiedades, terrenos federales y municipales (INECC, 2017).

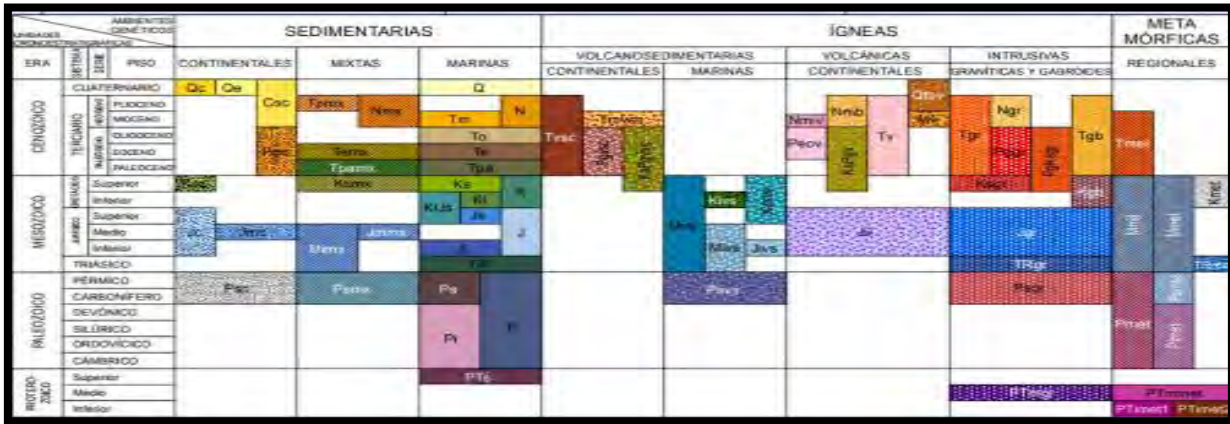
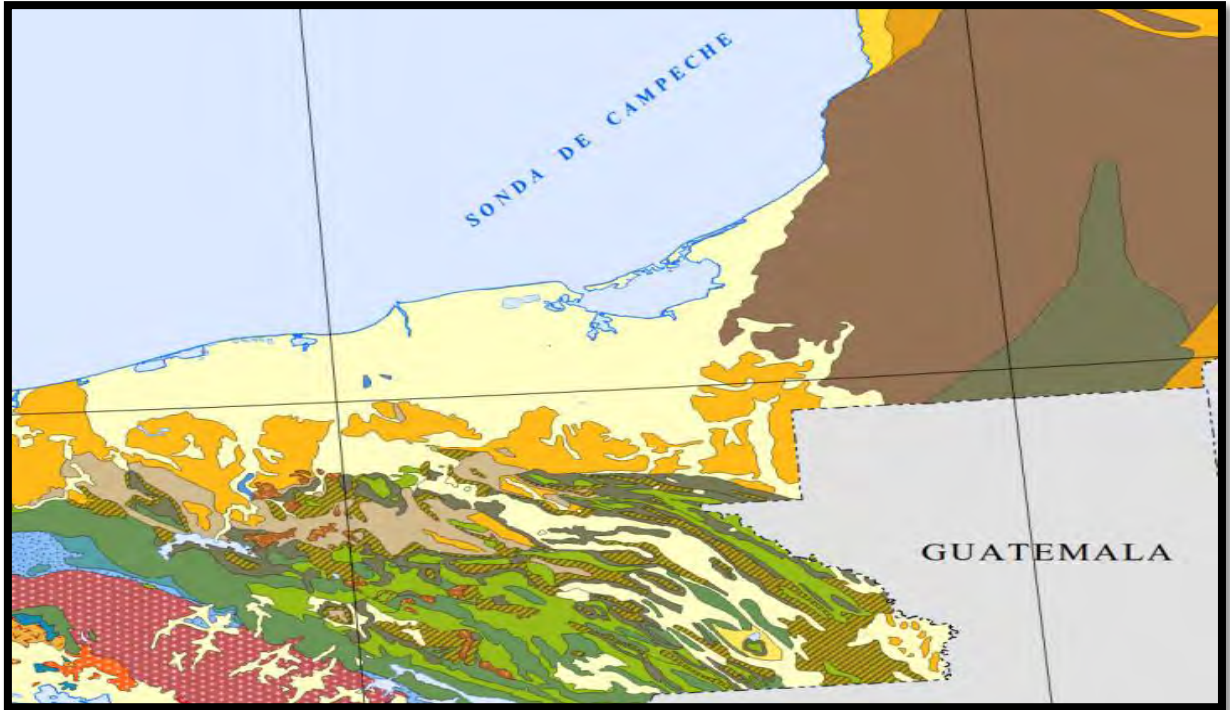


Figura 2: Mapa geológico del área de estudio (Fuente: Ferrari-Pedraglio, Luca, 2007)

Capítulo 4: METODOLOGÍA

4.1 TRABAJO DE CAMPO

Las muestras se colectaron entre el 20 y 21 de Agosto del 2015 por medio del buque oceanográfico Justo Sierra de la UNAM, en la campaña oceanográfica ZOM-1, usando un nucleador de gravedad, para recolectar los 3 núcleos. Las muestras se mantuvieron en refrigeración a 4°C hasta su procesamiento, en los cuartos fríos del Departamento de Química Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

4.2 TRABAJO DE LABORATORIO

4.2.1 Preparación de la Muestra

Los 3 núcleos estudiados fueron seccionados en el Laboratorio de Micropaleontología y Paleoceanografía del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1.- Se abren los núcleos de manera transversal con una sierra eléctrica, las muestras de sedimento se dividieron en 2 partes, una mitad se utilizó para los análisis químicos, la otra mitad se utilizó para estudios en el área de Micropaleontología. En la Fig. 5 se presenta una imagen de las secciones de cada uno de los núcleos estudiados.
- 2.- Del núcleo 13 (N-13) se obtuvieron 27 muestras, del núcleo 22 (N-22) se obtuvieron 26 muestras y del núcleo 30 (N-30) se obtuvieron 17 muestras.
- 3.- Se seccionan los 3 núcleos, dividiéndolos cada 0.5 cm.
- 4.- Posteriormente se toman muestras cada 10 cm por cada uno de los núcleos

Para los Análisis Químicos

- 1.- Se secan las muestras de sedimento a 50°C.
- 2.- Se muelen las muestras en un molino SPEX 8000 MIXER/MILL usando un mortero de ágata.

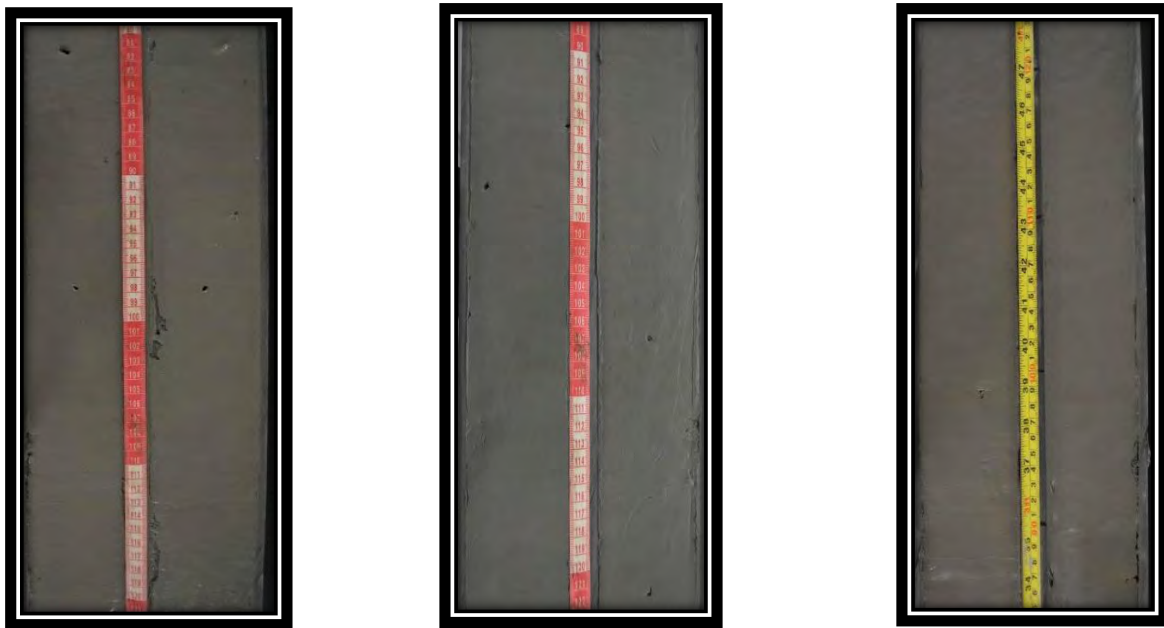
Para los Análisis Texturales

Se utiliza una porción de la muestra original.

La granulometría se realizó en el Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, usando la técnica de difracción láser, en un analizador de tamaño de partículas marca Beckman Coulter modelo LS 230, cuyo fundamento se basa en que las partículas difractan la luz a través de un ángulo determinado, el cual se incrementa conforme el tamaño de grano disminuye (Boggs, 2012). Se pesan 5.0 g de sedimento húmedo homogeneizado y se mezclan con 50 ml de una solución dispersante de hexametáfosfato de sodio (100g/L).

La mezcla se dejó reposar 24 horas, transcurrido este tiempo, se tomó una porción de muestra para realizar el análisis, los parámetros texturales resultantes se reportaron siguiendo el procedimiento tradicional de Folk (2002).

Con ello se obtuvieron los parámetros propuestos por Folk, (1974); los cuáles son tamaño gráfico promedio ($Mz\phi$), desviación estándar gráfica ($\sigma\phi$) la cual nos dará información acerca de la clasificación del sedimento, Sk_1 se refiere a la asimetría (tendencia a tamaños finos o gruesos) y K_G es la curtosis donde se observará la varianza de las muestras.



N-13

N-22

N-30

Figura 4: Fotografía transversal de los núcleos analizados N-13, N-22 y N-30

Los parámetros a evaluar son los siguientes:

- 1.-Granulometría (textura).
- 2.-Contenido de carbono orgánico. (Método Volumétrico)
- 3.- Contenido de carbonatos
- 4.-Elementos mayores por la técnica de EDXRF (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO y P_2O_5).
- 5.-Elementos traza por la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (Cu, Pb, Cr, Ni, V y Zn).

4.3 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO EN SEDIMENTO

4.3.1 Fundamento

El método fue propuesto por Walkey-Black en 1947, adaptado y modificado por Jackson en 1958. Se basa en una oxidación exotérmica de la materia orgánica en presencia de ácido sulfúrico H_2SO_4 concentrado y dicromato de potasio K_2CrO_7 1N, posteriormente, el exceso de dicromato de potasio se titula con sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 0.5 N, hasta que vire a un color verde brillante, utilizando difenilamina $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{NH}$ como indicador. Este procedimiento permite diferenciar materia húmica de otras fuentes de carbono inorgánico.

La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



El método presenta algunas interferencias por la presencia de compuestos inorgánicos, tales como el carbonato de calcio CaCO_3 y cloruros Cl^- solubles, ión hierro (III) Fe^{3+} , carbonato elemental y óxidos de manganeso.

Los efectos de estas interferencias fueron evaluados por Walkley, 1947 y Okuda, 1964 (citados por Rosales, 1980) quienes demostraron que el ion cloruro interfiere en la oxidación de la materia orgánica con el dicromato de potasio, reduciendo al ion cromato, originando un error positivo, por lo que propusieron el uso de ácido fosfórico H_3PO_4 , el cual volatiliza la mayoría de los iones cloruro como ácido clorhídrico HCl y reduce los halógenos restantes a un nivel aceptable (<0.1 mg de Cl⁻). (Loring y Rantala, 1992) usaron H_2SO_4 concentrado con sulfato de plata para eliminar las interferencias de los iones cloruro.

La interferencia por iones férricos se elimina con la adición de fluoruro de sodio NaF se elimina con la adición de fluoruro de sodio NaF o con sulfato de plata Ag_2SO_4 . Las interferencias ocasionadas por los óxidos de manganeso se eliminan con ácido fosfórico, con el cual se forman fosfatos de manganeso, los cuales son insolubles.

4.3.2 Procedimiento

- 1.- Pesar por duplicado 0.5 g de sedimento seco y molido.
- 2.- Colocar la muestra de sedimento en un matraz Erlenmeyer de 500 ml y adicionar 10 ml de una solución de dicromato de potasio K_2CrO_7 1N (medidos con pipeta volumétrica) y mezclar.
- 3.- Agregar 20 ml de ácido sulfúrico concentrado H_2SO_4 al matraz que contiene la muestra.
- 4.- Dejar reposar la muestra por 30 minutos.
- 5.- Adicionar 250 ml de agua destilada, agregar 10 ml de ácido fosfórico H_3PO_4 concentrado, 0.2 g de fluoruro de sodio NaF y 15 gotas del indicador difenilamina $C_{12}H_{10}NH$.
- 6.- Titular con una solución de sulfato ferroso amoniacal $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ 0.5 N, el vire es de café verdoso a verde azul oscuro y en el punto de equivalencia pasa a un verde brillante.
- 7.- Correr un blanco de referencia bajo las mismas condiciones, pero sin sedimento.

4.3.3 Cálculo

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \left[\frac{(10)(1.0 \text{ N})(0.003)(100)}{W} \right] \left[1 - \frac{T}{S} \right]$$

Donde:

T = ml de sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, gastado en la titulación de la muestra.

S = ml de sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, gastado en la titulación del blanco.

W = Peso de la muestra, en g.

0.003 = 12/4000 = peso mili equivalente del carbono

1.0 N = Concentración Normal de la solución de dicromato de potasio K_2CrO_7 , en ml.

10 = Alícuota de la solución de dicromato de potasio K_2CrO_7 , en ml.

4.3.4 Estandarización de Carbono Orgánico

Se evaluó la exactitud y precisión del método pesando 10 veces 10 mg de dextrosa anhidra $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ se consideró el valor teórico reportado para 10 mg es 39.99% de carbono orgánico. Obteniendo los siguientes resultados:

Valor Teórico Esperado (%p/p)	39.99
Desviación Standard	1.55
Intervalo de Confianza-t (95% y n= 10)	39.39 ± 1.10
Promedio	39.39
Coficiente de Variación (%) (Precisión)	3.93
Recobro (%) (Exactitud)	98.50

Tabla 2: Valores obtenidos para la Estandarización de Carbono Orgánico, n=10

4.3.5 Diagrama del método para determinación de Carbono Orgánico

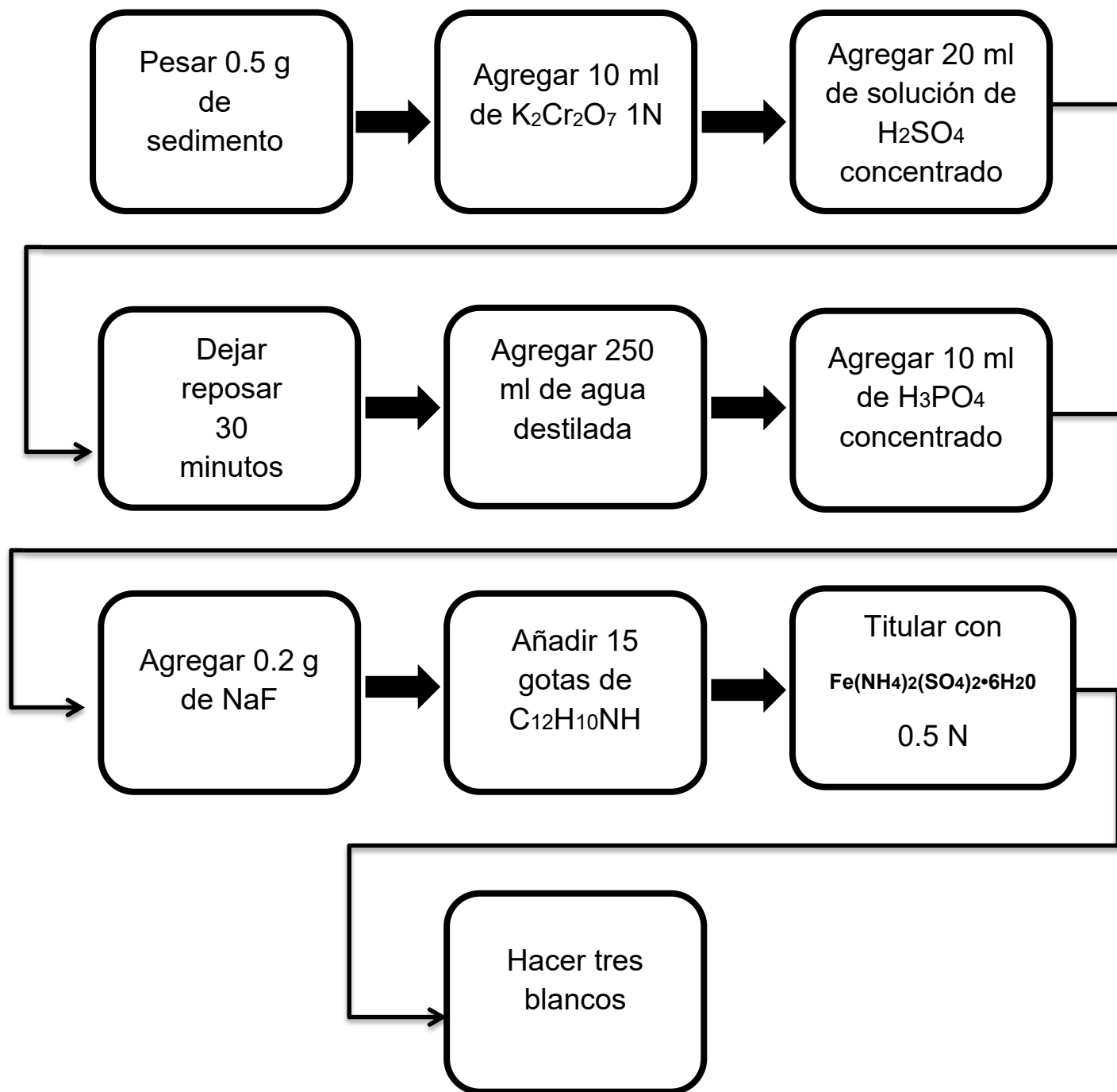


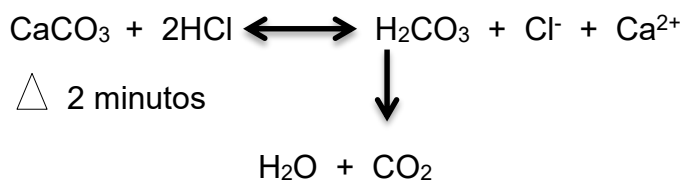
Figura 5: Método para la determinación de carbono orgánico

4.4 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS EN SEDIMENTO

4.4.1 Fundamento

La técnica para la determinación del carbonato de calcio CaCO_3 en sedimento marino se basa en una titulación por retroceso, donde a la muestra de sedimento se le agrega un cierto volumen en exceso de ácido clorhídrico (HCl) y el ácido que no reacciona con los carbonatos se titula posteriormente con una solución de hidróxido de sodio (NaOH). (Hesse, 1971).

Reacciones que se llevan a cabo:



Al restar la cantidad de ácido que no reaccionó de la cantidad que adicionamos, obtendremos la cantidad de ácido que fue consumido por el total de carbonatos existentes en la muestra de sedimento (Hesse, 1971).

4.4.2 Procedimiento

- 1.- Pesar por duplicado 0.5 g de sedimento seco y molido y colocarlo en un vaso de precipitados de 250 ml.
- 2.- Agregar 25 ml de ácido clorhídrico HCl 0.1 N en el vaso de precipitados que contiene la muestra.
- 3.- Dejar enfriar a temperatura ambiente, de esta forma se elimina el dióxido de carbono.
- 4.- Agregar 5 gotas de azul de bromotinol, $\text{C}_{27}\text{H}_{28}\text{Br}_2\text{O}_5$, cuyo rango de viraje se encuentra entre pH 6.0 y 7.6) hasta llegar a obtener un pH= 7.4 y/o color azul.
- 5.- Titular con una solución de hidróxido NaOH 0.3 N (previamente valorado contra biftalato de potasio $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ como patrón primario).

6.-Correr tres blancos bajo las mismas condiciones de las muestras.

4.4.3 Diagrama del método para determinación de carbonatos

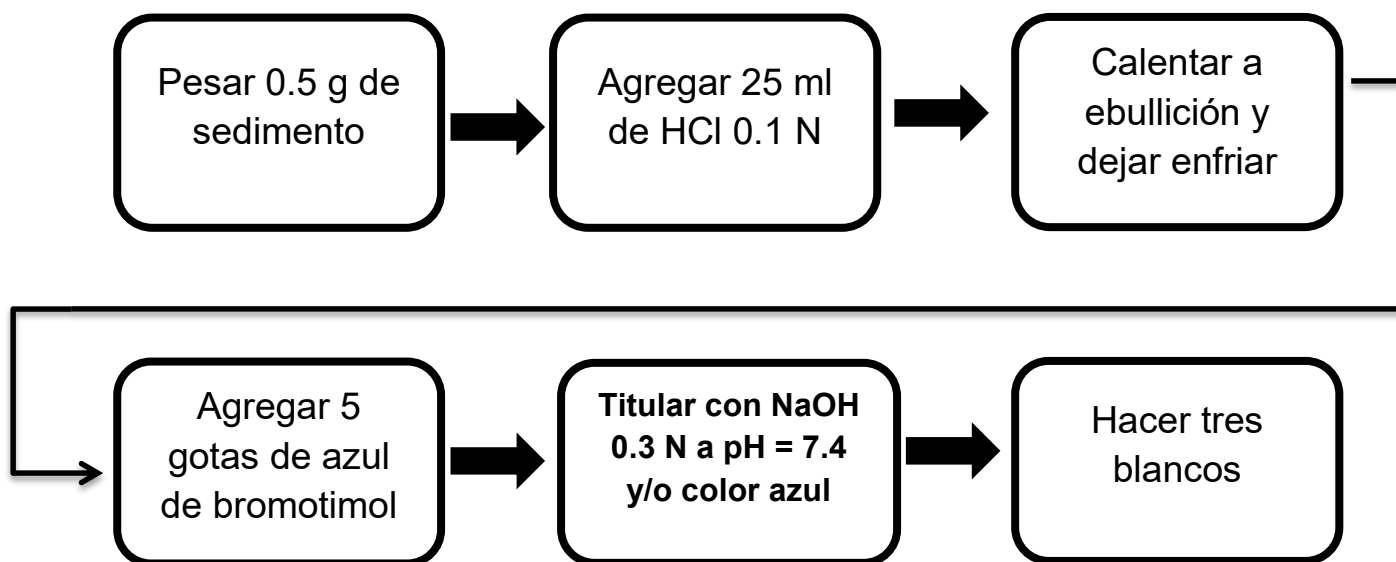


Figura 6: Método para la determinación de carbonatos

4.4.4 Cálculo

En la determinación se están cuantificando todos los carbonatos, pero como los de calcio son los que se encuentran en mayor concentración, se reportan y calculan como si fuese carbonato de calcio.

$$\% \text{CO}_3 \left[\frac{(V_{\text{Blanco}} - V_{\text{Muestra}}) \times N_{\text{NaOH}} \times \text{meqCO}_3^{2+}}{W_{\text{Muestra}}} \right] \times 100$$

Donde:

V_{Blanco} = Volumen de hidróxido de sodio (NaOH) gastado al punto de equivalencia de la determinación en el blanco (ml).

$V_{Muestra}$ = Volumen de hidróxido de sodio (NaOH) gastado al punto de equivalencia de la determinación de la muestra (ml).

N = Normalidad de la solución de hidróxido de sodio (NaOH)

meq = miliequivalentes de carbonato de sodio ($CaCO_3$) = 0.05

W = Peso de la muestra de sedimento, en g.

4.4.5 Valoración de NaOH

- 1.- Se pesa 0.6 g de biftalato de potasio $C_8H_5KO_4$ (previamente secado a $110^\circ C$ durante 1 hora).
- 2.- Colocar en un matraz Erlenmeyer de 125 ml. Adicionar 25 ml de agua destilada,
- 3.- Calentar un poco para disolver y enfriar.
- 4.- Adicionar 3 gotas de fenolftaleína al 0.1% en alcohol etílico.
- 5.- Empezar la valoración con la sosa y observar que pase de un vire incoloro a uno rosa (en el punto final el color debe permanecer 30 s).

4.4.6 Cálculo

$$N_2 (\text{NaOH}) = (N_1 / \text{ml NaOH}) * (1000 \text{ ml} / 1\text{L}) = N_2 \text{ mol/L}$$

Donde:

N_1 = moles de biftalato de potasio, en mol/L

La reacción entre las moles de biftalato de potasio y NaOH están en proporción 1:1

4.4.7 Estandarización del método para Carbonatos

El material de referencia utilizado para la estandarización del método fue Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) Se evaluó la exactitud del método pesando 10 veces 0.1 g de

carbonato de calcio previamente secado a 100°C durante una hora, siguiendo la misma metodología para las muestras. Se consideró el calculo del valor teórico igual a 100%. Los resultados fueron los siguientes:

Valor Teórico Esperado (%p/p)	100
Desviación Standard	0.92
Intervalo de Confianza-t (95% y n= 10)	99.68 ± 0.65
Promedio	99.68
Coefficiente de Variación (%) (Precisión)	0.92
Recobro (%) (Exactitud)	99.68

Tabla 3: Valores obtenidos para la Estandarización de Carbonatos, n=10

4.5 DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayores se determinaron por la técnica de Fluorescencia de Rayos X de energías dispersivas (EDXRF), utilizando un Espectrómetro de rayos X, marca BRUKER, modelo S2 RANGER, que incluye un detector XFLASH.

Para la elaboración de pastillas se utilizó una perladora marca FLUXANA, modelo VULCAN 2M, con el programa P 0.

4.5.1 Pérdida por Ignición

- 1.- Determinar la pérdida por calcinación en %, utilizando la técnica de gravimetría, pesando 1.0 g de muestra de sedimento seco y molido en un crisol previamente llevado a peso constante.
- 2.- Introducir el crisol con la muestra a una mufla calentada previamente a 950°C. Dejar calcinar por 8 hrs.
- 3.- El peso obtenido, se utilizará en el instrumento FRX, para realizar el análisis de pérdida por ignición, identificándolo como LOI (Loss of Ignition).

4.5.2 Elaboración de pastillas

- 1.- Pesar aproximadamente 0.4 g de sedimento calcinado.

2.- Pesar aproximadamente 5.0 g de fundente. Se utilizó tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) al 100%.

3.- Colocar el sedimento y el fundente en un crisol de oro-platino (Au-Pt).

4.- Colocar en la perladora el crisol con la mezcla sedimento-fundente. Seleccionar el programa P 0, que incluye las siguientes etapas:

Etapas	Tiempo (segundos)
Pre calentamiento	180
Prefusión	240
Fusión Principal 1	120
Agitación	10
Sin Agitación	10
Fusión Principal 2	240
Agitación	10
Sin Agitación	10
Vertido	7
Enfriamiento 1	60
Enfriamiento 2	180
Enfriamiento 3	60
Tiempo Total	18 minutos

Tabla 4: Etapas del Programa de la Perladora Fluxana modelo Vulcan

5.- Extraer la pastilla del molde de la perladora, etiquetarla y colocarla en el inserto correspondiente del portamuestras del equipo de EDXRF, de acuerdo al procedimiento de operación del equipo, este debe estar previamente calibrado para obtener resultados confiables.

6.- Registrar los resultados, es importante verificar los espectros para observar los picos de los metales traza, si estos son significativos se sugiere hacer de ese metal una prueba con la técnica de absorción atómica por flama con el fin de optimizar tiempo y materiales.

Para calcular la precisión y exactitud se realizaron 10 réplicas de un estándar preferentemente y/o de una muestra seleccionada. Para verificar la pureza del fundente se hizo un blanco.

Parámetro	SiO₂	Al₂O₃	MnO	CaO	Na₂O	K₂O	TiO₂	Fe₂O₃	MgO	P₂O₅	SO₃
Valor Teórico esperado	64.89	16.56	0.085	2.54	3.15	5.32	0.823	4.85	0.860	0.370	0.062
Valor Promedio	65.35	16.41	0.086	2.54	2.95	5.23	0.804	4.90	0.800	0.330	0.067
Desviación Standard	0.33	0.11	0.003	0.01	0.03	0.06	0.010	0.04	0.04	0.02	0.003
IC-t (95% n=10) Incertidumbre de la medición	65.35 ± 0.204	16.41 ± 0.068	0.086 ± 0.002	2.54 ± 0.002	2.95 ± 0.018	5.23 ± 0.037	0.804 ± 0.006	4.90 ± 0.024	0.80 ± 0.024	0.33 ± 0.012	0.067 ± 0.002
Variación (% Precisión)	0.50	0.65	3.48	0.19	4.05	1.20	1.24	0.75	5.0	5.40	4.47
Recobro (% Exactitud)	100.72	99.09	101.18	100.28	92.76	98.33	97.69	101.07	93.17	91.62	108.06

Tabla 5: Estandarización de los elementos mayores contra QC_GEOMAJ-01

El material de referencia QC_GEOMAJ-01, es un material certificado de la serie GEO-QUANT M, los cuales están certificados por el fabricante del instrumento de FRX (Bruker) para cuantificar 11 elementos mayores en forma de óxidos.

4.6 DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA

Los elemento traza estudiados fueron; Cobre (Cu), Vanadio (V), Níquel (Ni), Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Cromo (Cr).

Para la determinación de estos elementos se utilizaron las técnicas de Espectroscopia de Absorción Atómica, cuyos fundamentos son los siguientes:

4.6.1 Procedimiento Físico de la Espectroscopia de Absorción Atómica

Se utilizó la absorción por flama, que consiste en que la muestra en forma líquida es aspirada a través de un tubo capilar y conducida a un nebulizador donde ésta se desintegra y forma un rocío o pequeñas gotas de líquido. Las gotas formadas son

conducidas a una flama, donde se produce una serie de eventos que originan la formación de átomos. Estos átomos absorben cualitativamente la radiación emitida por la lámpara y la cantidad de radiación absorbida está en función de su concentración. La señal de la lámpara una vez que pasa por la flama llega a un monocromador, que tiene como finalidad el discriminar todas las señales que acompañan la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega a un detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura.

4.6.2 Extracción de Metales en Sedimento para Absorción Atómica

Para su determinación es necesario extraer el metal de los sedimentos y tenerlo en fase soluble, a este proceso conocido como Digestión. Se basa en la descomposición total del sedimento por medio de la utilización de ácido fluorhídrico (HF) en combinación con ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO₃). El ácido fluorhídrico disuelve por completo las estructuras minerales de los silicoaluminatos (Loring y Rantala, 1992)

El procedimiento es el siguiente:

- 1.- Pesar 0.5 g de sedimento en una balanza analítica. Colocarlo en bombas de PTFE (teflón).
- 2.- Agregar 10 ml de agua destilada.
- 3.- Agregar 5 ml de HNO₃.
- 4.- Agregar 4 ml de HF concentrado.
- 5.- Agregar 1 ml de HCl concentrado
- 6.- Tapar las bombas con ayuda de un torque marca CEM, modelo MARS EXPRESS Capping Station
- 7.- Introducir las bombas en un carrusel en el horno de microondas marca CEM, modelo MARS EXPRESS, cuyo programa tuvo las siguientes condiciones, para llevar a cabo la digestión:

<i>Etapa</i>	<i>Potencia</i>	<i>Tiempo 1 (min)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo 2 (min)</i>
1	800 W al 100%	15	120	15
2	1600 W al 100%	30	180	30

Tabla 5: Condiciones del programa para la digestión en Horno de Microondas, Marca CEM, modelo MARS XPRESS

- 8.- Después de terminar la digestión, dejar enfriar las bombas.
- 9.- Abrir las bombas con el torque y verter el contenido en un matraz de polipropileno de 25 ml. Agregar 0.5 g de ácido bórico H_3BO_3 y agitar hasta la disolución.
- 10.- Llevar al aforo en el matraz de 25 ml con agua destilada.
- 11.- Verter el contenido en tubos de centrifuga. Introducirlos en una Centrifuga marca IEC modelo CLINICAL CENTRIFUGE por 5 minutos a 2000 rpm, para eliminar restos sólidos que hayan quedado suspendidos.
- 12.- Hacer la digestión para 10 blancos, repitiendo el mismo procedimiento, pero sin muestra de sedimento.
- 13.- Verter el contenido en un frasco de polipropileno de 25 ml, etiquetarlo y enfriar a $4^{\circ}C$ hasta su análisis.

4.6.3 Estandarización del Método

Para la estandarización de los métodos analíticos en el procesamiento de los sedimentos estudiados, se utilizaron los siguientes estándares certificados del National Research Council Canada (CNRC): PACS-2, MESS-3.

Se midió diez veces la misma muestra, en las mismas condiciones, con su respectivo estándar. Los resultados de los porcentajes de recuperación se presentan en la Tabla 3.

<i>Elemento</i>	<i>Estándar certificado</i>	<i>Concentración reportada</i>	<i>Concentración experimental</i>	<i>Desviación Standard</i>	<i>% Recobro</i>
<i>Cu</i>	PACS-2	310 ± 12	319.03	4.14	102.91
<i>Zn</i>	PACS-2	364 ± 23	376.14	8.50	102.82
<i>Ni</i>	PACS-2	39.5 ± 2.3	35.92	4.86	90.95
<i>V</i>	MESS-3	243 ± 10	230.79	46.28	99.05
<i>Cr</i>	MESS-3	105 ± 4	103.67	3.66	98.73
<i>Pb</i>	MESS-3	21.1 ± 0.7	20.14	1.35	95.46
<i>Cd</i>	PACS-2	2.11 ± 0.15	2.33	0.092	103.31

Tabla 6: Porcentaje de recuperación para los standards certificados. Concentración reportada en mg/ kg

4.6.4 Límite de Detección

En términos generales el límite de detección es la cantidad o concentración más pequeña de analito en la muestra que se puede distinguir significativamente de cero (IUPAC, 2002).

Para calcular el límite de detección en los elementos traza estudiados se utilizó el siguiente método (CENAM, 2005).

$$L. D. = \frac{3\sigma \times C}{\chi}$$

C= Concentración del standard

χ = Promedio de la absorbancia

3σ = Desviaciones standard

El límite de detección obtenido para los elementos traza, se muestra en la Tabla 4.

Elemento	Límite de Detección
Cu	0.053
Zn	0.010
Ni	0.038
V	0.209
Cr	0.034
Pb	0.1
*Cd	0.0058

Tabla 7: Límite de detección obtenido para los elementos traza estudiados, medido en mg/kg. *Cd medido en $\mu\text{g}/\text{kg}$

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo se analizaron 3 núcleos colectados en la plataforma continental del Golfo de México, adyacente al estado de Tabasco, donde se estudiaron sus características sedimentológicas y químicas. Dichas características están asociadas al tipo y la cantidad de sedimentos que llegan a la zona costera a través de los ríos y escurrimientos continentales, así como los sedimentos formados *in situ*.

5.1 BATIMETRÍA

Durante la campaña ZOM-1 se llevó el registro batimétrico usando una ecosonda multihaz EM300 (Kongsberg), de la cual se obtuvieron las características topográficas del área, las cuales se presentan en la Fig. 3 (Ponce Francisco. Comunicación Personal). Si bien los tres núcleos fueron colectados a la misma profundidad (110 m), el núcleo 30, el más alejado de la costa fue colectado a los pies de un pequeño promontorio.

Esta ecosonda produce barridos de 135 puntos de sondaje batimétrico por ciclo de emisión acústica, donde se observa el aumento gradual de la profundidad en una línea paralela a la costa, solo en la profundidad más somera se observan entrantes y salientes posiblemente asociadas con aportes continentales por las descargas de los ríos Grijalva-Usumacinta y San Pedro-San Pablo, las cuales se unifican a mayor profundidad.

Usando el Software CARIS HIPS & SIPS (Ver.7.0) se importaron los datos de EM300 del crucero ZOM-1 y se eliminaron manualmente los datos fuera de la tendencia batimétrica general.

5.2 MALLADO DE LOS DATOS

Se hizo una malla de 250 m x 250 m de tamaño de celda, la cual fue llenada con el promedio simple de los sondeos en un área de búsqueda de 500 m alrededor del punto de la malla. Posteriormente se interpolaron las celdas vacías usando un radio de tamaño de 2.5 km alrededor del nodo.

Esta malla interpolada se exportó al programa Golden Software SURFER, donde se hizo una nueva malla con un tamaño de celda de 2.7 km aproximadamente. Los valores de la malla fueron obtenidos con el método de mínima curvatura.

5.3 PERFIL BATIMÉTRICO

Se trazó una línea que une a los núcleos 13, 22 y 30, y se obtuvieron los datos de la malla en las posiciones de 64 puntos sobre esta línea. Con estos datos se construyó un perfil batimétrico de distancia contra profundidad.

Con base en el origen de la línea anterior, se midieron las distancias en kilómetros hasta cada una de las posiciones de los núcleos. Con estas distancias se colocaron los núcleos en la posición que ocupan sobre el perfil.

Se optó por usar kilómetros en la escala horizontal y metros en la escala vertical para proporcionar una exageración vertical, ya que la diferencia en relieve es diez veces menor que la distancia entre los núcleos.

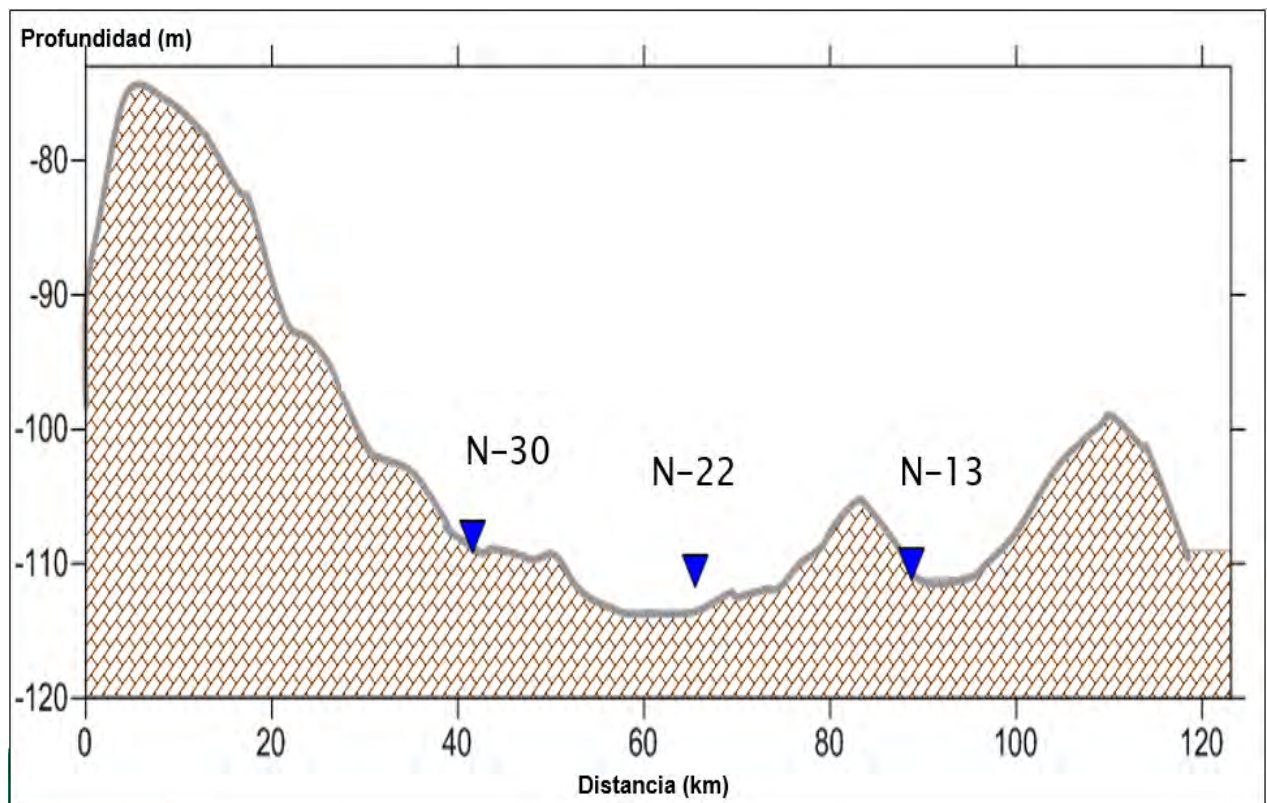


Figura 7: Perfil Batimétrico del área de estudio

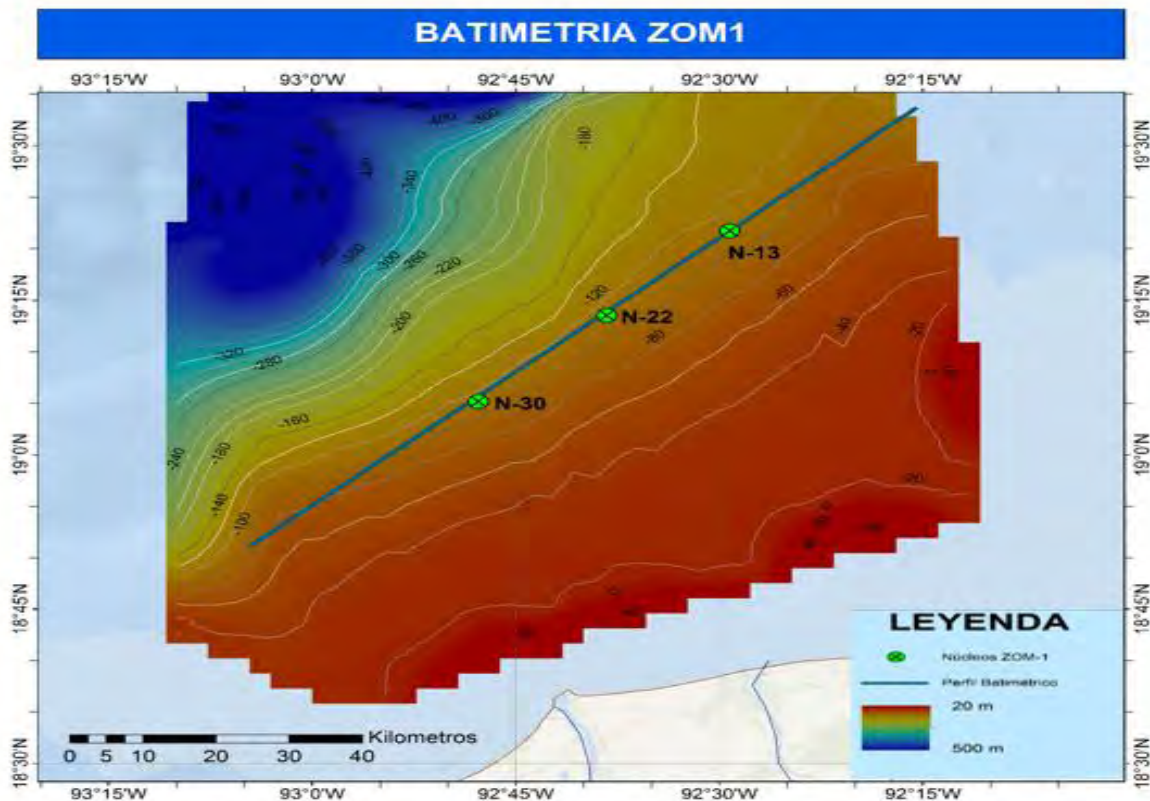


Figura 8: Batimetría del área de estudio, obtenido con la ecosonda multihaz EM300

5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS NÚCLEOS

El núcleo 13 (N-13), tiene una longitud de 270 cm. Se analizaron 27 muestras, cada una se seccionó cada 10 cm a lo largo de todo el núcleo. El núcleo se encuentra a 87.41 km de la costa. Se pueden observar pequeños organismos principalmente en los intervalos que van de los 20 cm a los 120 cm, como lo son conchas y pterópodos. Este núcleo se fechó en el Laboratoire de Mesure Du Carbon, en Saclay, Francia, con la técnica de Espectrometría de Masas utilizando el Acelerador ARTEMIS, de acuerdo al siguiente procedimiento:

La actividad en C-14 de la muestra, se calcula comparando las intensidades medidas secuencialmente de los haces de C-14, C-13 y C-12 de cada muestra, con aquellos de los estándares de CO₂ preparados a partir de ácido oxálico de referencia OXA II.

Se expresa en pMC (porcentaje de carbono moderno) normalizado a un delta C-13 de -25 por mil.

Las edades radiocarbono son calculadas corrigiendo el fraccionamiento con el delta C-13 calculado a partir del reporte C-13/C-12 medido en el acelerador ARTEMIS (Mook y Van der Plicht. Radiocarbon 41, 1999).

El delta C-13 utilizado incluye el fraccionamiento producido ya sea durante la preparación de las muestras, como durante la medición AMS. Depende de la transmisión de la instalación, para saber el valor C-13/C-12, medido a la salida del espectrómetro de masas ARTEMIS, con relación al valor de C-13/C-12 a la salida de la fuente.

Estos valores dependen del haz de inyección, corriente y emisión. El delta C-13 medido por ARTEMIS no puede entonces ser comparado con el delta C-13 medido en un espectrómetro de masas. Los valores de delta C-13 siendo corregidos con relación a un estándar no influyen en la medida de la edad C-14. La incertidumbre de la medida tiene en cuenta a la vez el error estadístico y la variabilidad de las medidas, también tanto por la muestra como por el blanco restado. Los resultados son dados sin corrección de edad reservorio.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Profundidad (cm)	Edad AP
0-1	50 ± 30
100-101	970 ± 30
256-257	1985 ± 30

*Tabla 8: Profundidad y Edad en *AP de 3 secciones del N-13*

*

*AP, son las siglas de Antes de Presente, que indica una escala de tiempo usada para datar que un evento ocurrió en el pasado, se toma como referencia el año de 1950, como el año de origen arbitrario de la escala temporal para usarse en la datación por la técnica de radiocarbono.

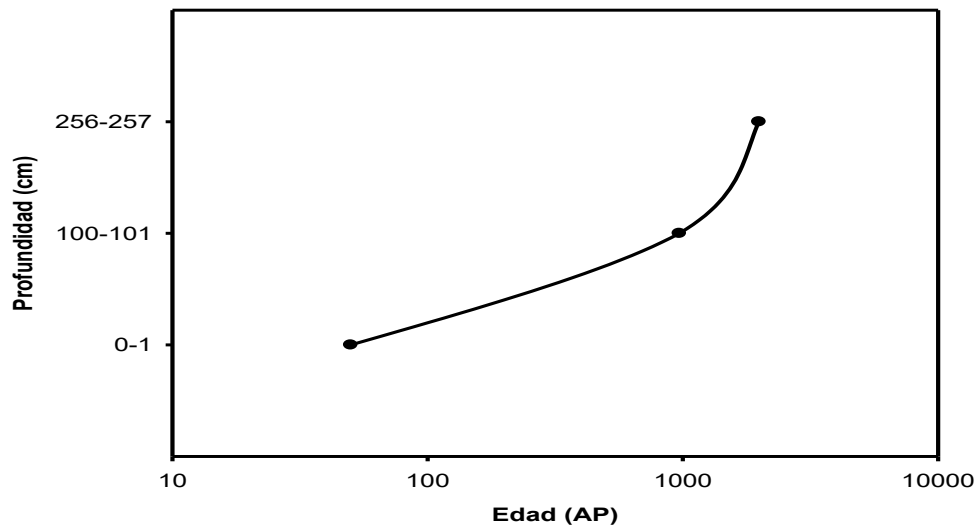


Figura 9: Profundidad (cm) vs Edad en años AP, que indican el fechado del N-13

El núcleo 22 (N-22), tiene una longitud de 260 cm. Se analizaron 26 muestras. El núcleo se encuentra a 70.49 km de la costa. Se pueden observar pequeños restos de organismos como gasterópodos y pterópodos entre los 65 cm y los 230 cm del núcleo.

El núcleo 30 (N-30), tiene una longitud de 170 cm. Se analizaron 17 muestras. El núcleo se encuentra a 55.94 km de la costa. Se pueden observar pequeños organismos en algunos segmentos del núcleo, entre ellos gasterópodos y pterópodos a lo largo de todo el núcleo.

De acuerdo al fechado realizado en el N-13, se determinó que las 3 edades fechadas a diferentes profundidades de dicho núcleo (0 cm, 100 cm y 260 cm), comprenden un intervalo de los 50 AP a los 1985 AP, es decir, todos los sedimentos del núcleo pertenecen al período Cuaternario de la era Cenozoica que comenzó hace 10000 años. Los sedimentos de la profundidad del núcleo eran de origen terrígeno, como se explicará más adelante con los resultados obtenidos y perfiles realizados de Elementos Mayores.

Por las características dinámicas y morfológicas de los ríos, la trayectoria de cada uno fue cambiando con el paso de los años. Los ríos Grijalva y Usumacinta se unieron y formaron el delta activo del Grijalva-Usumacinta. Con esta unión disminuyó el aporte sedimentario del brazo derecho del Río Usumacinta (el Río San Pedro-San Pablo) y así su importancia hidrológica al anularse la morfogénesis de cordones costeros, éstos se erosionaron y retrocedió la línea de costa del frente deltaico (Psuty, 1967). Figura 9.



Figura 10: Mapa que muestra la morfología actual de los ríos Grijalva-Usumacinta. Modificado de Psuty, 1969.

5.5 PARÁMETROS TEXTURALES

Las características texturales presentes en los núcleos se atribuyen principalmente a la distancia a la costa de cada uno de ellos, a la diferencia de profundidad y también influye el microrelieve y la posición con respecto a la desembocadura del río.

Fracción (%)	N-13				N-22				N-30			
	Prom	Min	Máx	D.S.	Prom	Min	Máx	D.S.	Prom	Min	Máx	D.S.
Arenas	0.21	0.01	0.64	0.17	6.57	0.06	51.02	14.66	No hay	No hay	No hay	No hay
Limos	58.06	54.75	66.73	2.37	58.66	40.38	64.41	5.64	61.66	57.65	68.29	2.86
Arcillas	41.73	32.86	45.23	2.49	34.76	8.6	43.34	10.11	38.34	31.71	42.35	2.86

Tabla 9: Resumen de las fracciones de los 3 núcleos estudiados

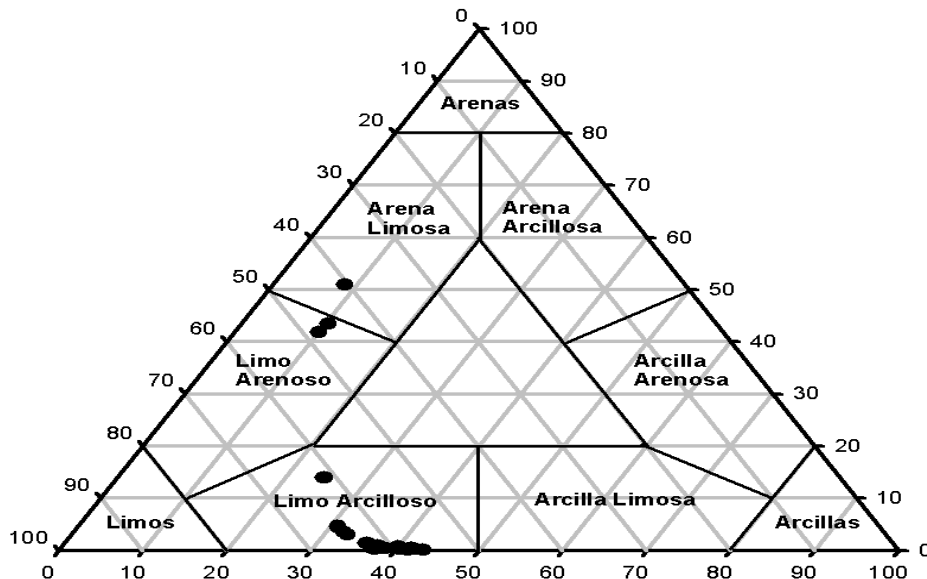
La cantidad de limos y arcillas presente en los sedimentos es un indicador de las condiciones de baja energía presentes, que permiten la deposición de sedimentos finos. Por el contrario cuando hay un predominio en la concentración de gravas y arenas el sistema es de alta energía.

De acuerdo a los parámetros estudiados, encontramos que en los 3 núcleos están presentes en mayor cantidad, Limos, seguido por Arcillas y por último Arenas, lo que sugiere que hay bajas condiciones de energía.

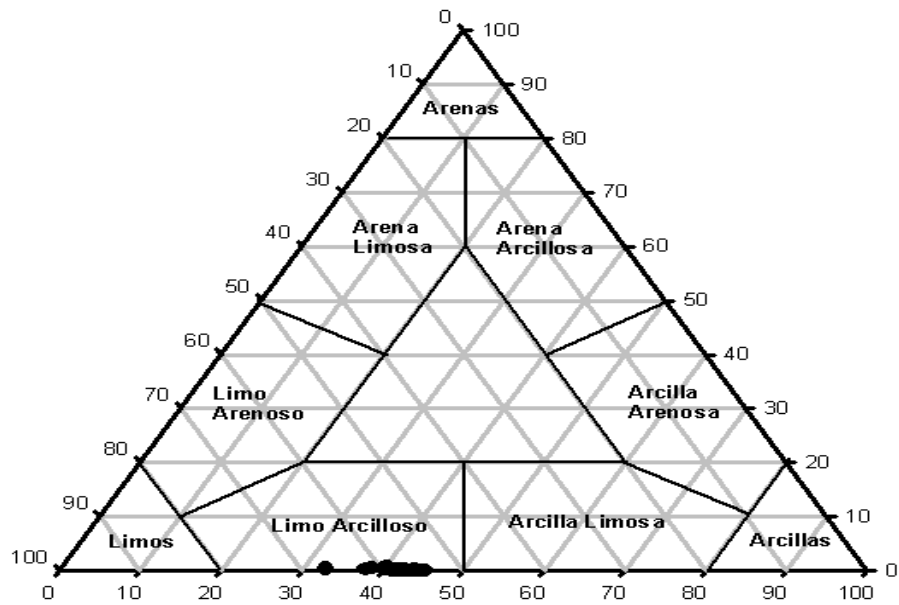
En el caso del núcleo 30, no se encontraron Arenas, cabe señalar que este núcleo es el que se encuentra más cerca de la costa (Figura 8)

A continuación se muestra por medio del Diagrama de Shepard (1954) la distribución textural para cada uno de los núcleos estudiados (N-13, N-22 y N-30).

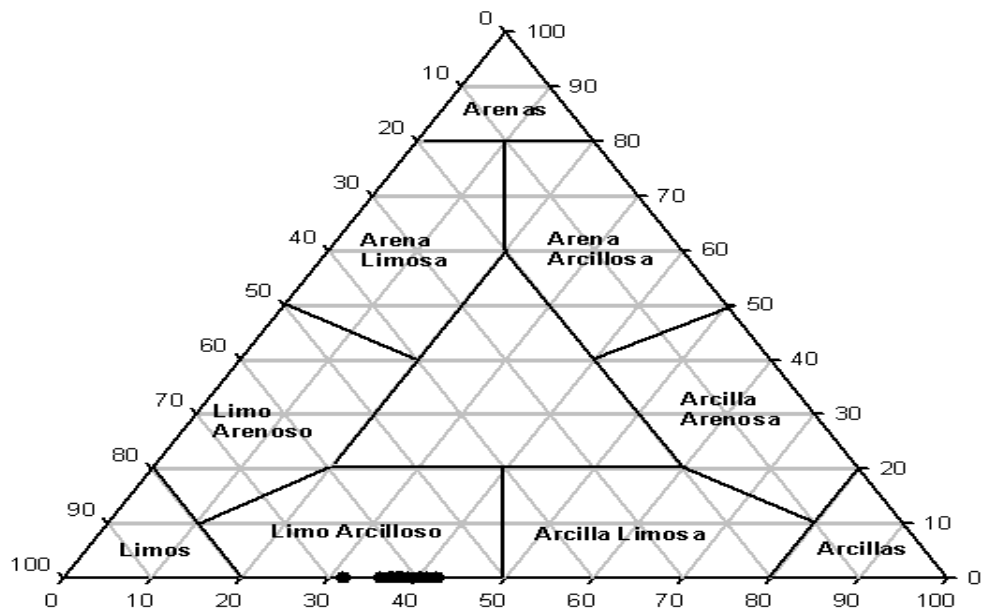
En el núcleo 13 la textura predominante es del tipo Limo-Arcilloso (Figura 8); aunque algunas muestras presentan una textura de Limo-Arenoso e incluso una muestra está constituida por Arena-Limosa; en el núcleo 22 todas las muestras están constituidas por el tipo Limo-Arcilloso, (Figura 8) en el núcleo 30, todas las muestras presentan una textura del tipo Limo-Arcilloso (Figura 8).



Textura N-13



Textura Núcleo 22



Textura Núcleo 30

Figura 11: Diagramas de Shepard que muestran la textura de los núcleos N-13, N-22 y N-30

5.6 ANÁLISIS TEXTURAL DE CADA NÚCLEO

5.6.1 Núcleo 13

Es el núcleo más alejado de la costa. Presenta una textura de tipo Limo-Arcilloso. (Fig. 8). El porcentaje promedio de Limos es de 58.1%, lo que sugiere que las condiciones de depósito son de baja energía. El valor máximo se presenta en la superficie con un valor de 66.73%. A lo largo del núcleo se observa una alternancia entre los valores arriba del promedio en la superficie hasta llegar a los 80.5 cm. En la parte inferior del núcleo que va de los 190 cm a los 270 cm, se presentan los valores más bajos de limos, los cuales varían en un rango de 54.75% a 57.35%.

Las Arcillas del N-13, presentan un promedio de 41.8%, el más alto de los 3 núcleos. El valor máximo se presenta en la parte inferior del núcleo con un valor de 44.66%, y el valor mínimo es de 32.86% en la superficie del núcleo. Se observa una alternancia entre los valores altos y bajos a lo largo de todo el núcleo.

Por último se encuentran las Arenas, cuyo contenido es muy bajo, su valor promedio es de 0.2%. A lo largo del núcleo existen muchas fluctuaciones. El valor máximo es de 0.64% en los 120 cm y el mínimo de 0.01% en la parte final del núcleo en los 250 cm. Al predominar en este núcleo limos y arcillas, y tener un bajo porcentaje de arenas, existe un predominio de condiciones de baja energía, que permiten la deposición de sedimentos finos y de acuerdo al fechado del núcleo

5.6.2 Núcleo 22

Predomina la textura del tipo Limo-Arcilloso, aunque a partir de los 190 cm a los 230 cm hay un aumento en la cantidad de Arenas y una disminución de Limos, por lo que la textura es del tipo Limo-Arenoso; en la parte final del núcleo (240-250 cm) hay una ligera disminución de Arenas y Arcillas, por lo que su textura es del tipo Arena-Limosa (Fig. 8).

Predominan los Limos con un promedio de 58.66%. El valor máximo se presenta en los 200 cm del núcleo con un valor de 64.41%. En la parte inferior se encuentran los valores más bajos, entre los 230 y 250 cm, siendo el mínimo de 40.38% a los 230 cm. Se observa una alternancia entre valores altos y bajos a lo largo de todo el núcleo.

En segundo lugar están presentes las Arcillas, con un promedio de 34.76%. El valor máximo se presenta a los 160 cm con 43.34 % y el valor mínimo es de 8.60% en los 230 cm. Los limos y arcillas presentes en los sedimentos corroboran las condiciones de baja energía presentes, que permiten la deposición de sedimentos finos.

De los 3 núcleos estudiados es el que presenta valores más altos de Arenas (6.57%). La mayoría de los valores están por debajo del promedio desde la superficie hasta los 210 cm. En la parte final del núcleo, a partir de los 220 cm hay un incremento importante de la concentración de arenas, alcanzando un valor máximo de 51.02% en los 230 cm.

5.6.3 Núcleo 30

Este núcleo es el más cercano a la costa, su textura es del tipo Limo-Arcilloso (Fig.8). No hay presencia de arenas, únicamente de lodos, lo que sugiere que es un sistema de baja energía.

Predominan los Limos, con un promedio de 61.66%, superior al de los otros 2 núcleos. A lo largo del núcleo se presentan valores más homogéneos, como se puede observar de acuerdo a su desviación standard de $\sigma=2.85$. El valor máximo se presenta en la superficie del núcleo con un valor de 68.29% y el valor mínimo a los 60 cm con 57.65%

Las arcillas tienen una concentración promedio de 38.34%. Su valor mínimo se encuentra en la superficie del núcleo con un valor de 31.71%. A lo largo del núcleo predominan los valores por debajo del promedio a partir de los 80 cm.

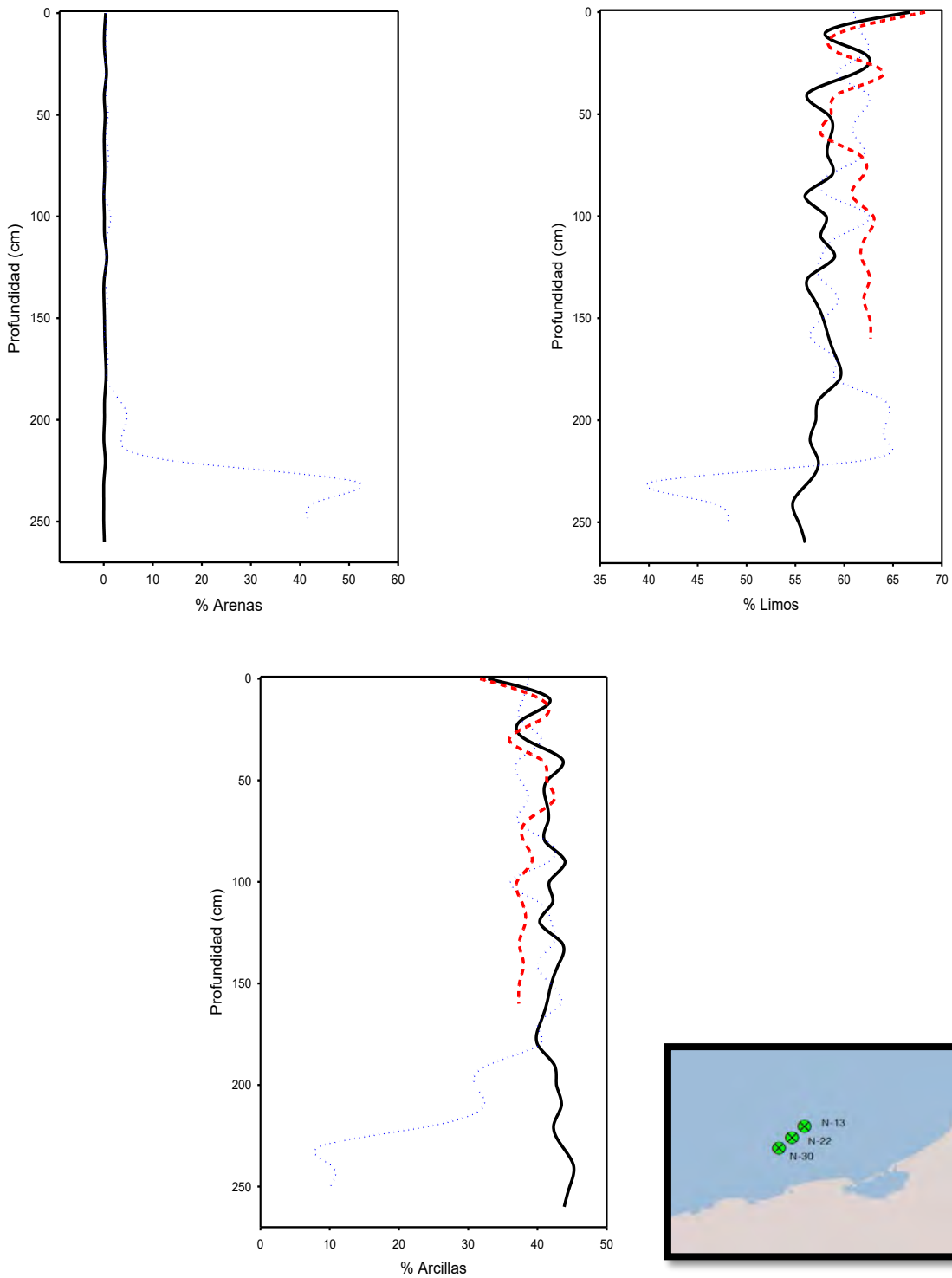


Figura 12: Perfiles de las Fracciones de los núcleos N-13 — N-22 ●●●● y N-30 ———

5.7 PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS

El análisis granulométrico de los sedimentos sirve para entender de forma integral las condiciones del área fuente y del sitio de depósito (Carranza-Edwards, 1997).

El tamaño de grano de los sedimentos está representado por el parámetro Mz , entre más grande es el valor de Mz la partícula es más pequeña. Respecto al tamaño de grano, los 3 núcleos están orientados hacia los limos muy finos. En el presente estudio, el N-13 el núcleo más alejado de la costa presenta el valor más alto, $Mz\phi=7.68$, con la desviación standard más baja, $\sigma_1 = 0.11$, lo que indica que sus sedimentos son más finos.

El valor de la clasificación ($\sigma_1\Phi$) de los sedimentos sugiere una mayor mezcla de los mismos, entre más grande es dicho valor, nos indica que los sedimentos están mal clasificados, lo que sugiere una mayor mezcla de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, que se llevan a cabo en el sitio de depósito. Valores de 1 a 2 corresponde a sedimentos mal clasificados, lo que se aplica a los tres núcleos considerados en el presente trabajo (Tabla 4).

La simetría SK_1 , refleja que tanta influencia de sedimentos finos o sedimentos gruesos tiene la muestra. Valores entre +0.1 y -0.1 representan un sedimento casi simétrico que no refleja influencia de partículas finas o gruesas. En el presente estudio los tres núcleos son simétricos. El N-13, el más alejado de la costa con valores de simetría más bajos, es el que está menos sujeto a cambios bruscos.

En cuanto a la Curtosis, parámetro que se refiere a la distribución que presentan los valores en una curva de distribución, los 3 núcleos muestran una curva del tipo Mesocúrtica, es decir se distribuyen de manera normal.

Parámetro	$Mz\Phi$	$\sigma_I\Phi$	SK_I	K_G
N-13				
Promedio	7.68	1.73	0.02	0.93
Mínimo	7.37	1.62	-0.01	0.9
Máximo	7.84	1.88	0.11	0.99
Des. Std	0.11	0.06	0.02	0.02
N-22				
Promedio	7.07	1.88	0.09	0.91
Mínimo	4.59	1.73	-0.03	0.74
Máximo	7.68	2.17	0.63	1.24
Des. Std	0.91	0.12	0.2	0.12
N-30				
Promedio	7.54	1.7	0.09	0.87
Mínimo	7.29	1.64	0.07	0.84
Máximo	7.72	1.75	0.12	0.95
Des. Std	0.12	0.03	0.02	0.03

Tabla 10: Resumen de Resultados de Granulometría de los 3 núcleos, Mz = Tamaño de Grano; σ_I = Clasificación; SK_I = Simetría; K_G = Curtosis

En la figura 6 se muestra el perfil del tamaño de grano Mz de los núcleos N-13, N-22 y N-30

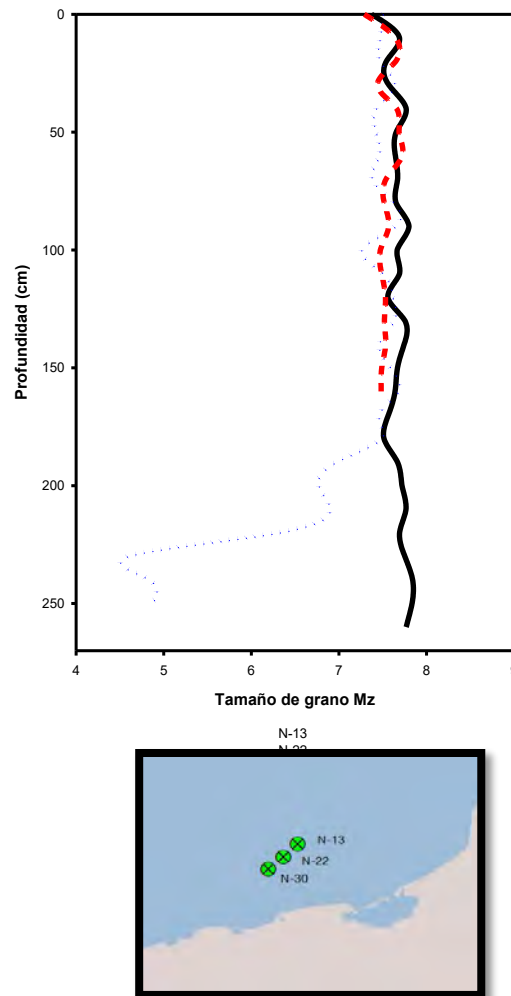


Figura 13: Perfiles del tamaño de grano de los núcleos N-13 — N-22 ●●● y N-30 — —

Se puede observar en la gráfica anterior que el tamaño de grano es similar en los 3 núcleos, N-13 (7.68 Φ); N-22 (7.07 Φ) y N-30 (7.54 Φ). En el N-22 a partir de los 180 cm, el tamaño disminuye incluso hasta los 4 Φ que representan limos de tamaño mediano. Esta disminución en el tamaño de grano, es una particularidad que se observa en varias de las propiedades estudiadas de este núcleo, como se discutirá más adelante.

5.8 ANÁLISIS QUÍMICO

5.8.1 Carbono Orgánico

El carbono orgánico, presente en forma de materia orgánica, lo constituyen partículas producidas o derivadas de seres vivos, ya sean marinos o terrestres, que pueden encontrarse con frecuencia contenidos en sedimentos.

La materia orgánica puede concentrarse o descomponerse en medios ácidos que disuelven la fracción mineral de la roca o sedimento que la contienen. Es importante ya que funciona como receptor de ciertos metales traza, además puede unirse con los metales presentes en los sedimentos y limitar su biodisponibilidad a los organismos bentónicos que habiten en dicho sedimento.

La cantidad de materia orgánica presente en los sedimentos está en función de diversos factores relacionada con la productividad primaria y con el ciclo del carbono.

Carbono Orgánico	N-13	N-22	N-30
Promedio	1.12	1.09	1.01
Mínimo	0.94	0.57	0.71
Máximo	1.30	1.79	1.10
Desviación Standard	0.07	0.34	0.08

Tabla 11: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard del carbono orgánico en los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en porcentaje

En general los valores promedio de carbono orgánico en los 3 núcleos fueron muy similares. N-13(1.12%); N-22(1.09%) y N-30(1.01%). Se observa que hay una disminución ligera en dichos porcentajes mientras más cercanos se encuentran a la costa.

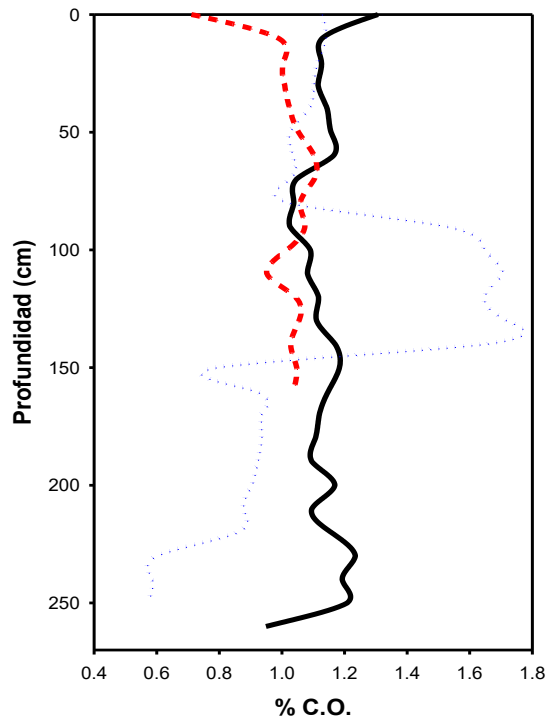


Figura 14: Perfiles de carbono orgánico de los núcleos N-13 — N-22 ●●●● y N-30 — — — —

5.8.2 Análisis de Carbono Orgánico en los Núcleos estudiados

5.8.2.1 Núcleo 13

Si bien los valores de carbono orgánico no varían mucho, se observa una alternancia con valores arriba del promedio de 1.13 %, a lo largo de todo el núcleo, el valor más bajo a lo largo del núcleo (0.94 %) se encuentra en la parte final del núcleo en los 260 cm.

5.8.2.2 Núcleo 22

Los primeros 40 cm del núcleo muestran valores de carbono orgánico por arriba del promedio que es de 1.09 %. De los 90 cm a los 140 cm (Fig. 8) se observan los valores más altos (1.52 a 1.72%), lo que sugiere que hasta este intervalo el proceso de degradación de materia orgánica es lenta y hay una mayor descarga de sedimentos. En la parte más profunda del núcleo de 230 a 260 cm se observan los valores más bajos (0.57 a 0.60 %). Estas alternancias en el contenido de carbono orgánico sugieren la presencia de diferentes condiciones de depósito, como las diversas corrientes que circulan en la zona y la desviación que sufrió el antiguo delta a través del tiempo.

5.8.2.3 Núcleo 30

Es el núcleo con el contenido promedio más bajo de carbono orgánico (1.02 %). En los primeros 40 cm presenta valores por debajo del promedio, siendo el más bajo, el encontrado en la superficie 0-10 cm (0.71%). De los 60 cm a 90 cm de profundidad el contenido de carbono orgánico está por encima del promedio, y se observan los valores más altos, para presentar de nuevo una disminución desde los 100 cm hasta el fondo.

5.8.2 Carbonatos

La gran carga procedente de los ríos Grijalva y Usumacinta, hace que las aguas costeras sean turbias, inhibiendo la precipitación de carbonatos. Por otro lado la cercanía del área de estudio a la provincia carbonatada de Yucatán influye en la presencia de sedimentos carbonatados en el área.

Carbonatos	N-13	N-22	N-30
Promedio	19.75	18.42	16.94
Mínimo	14.70	10.34	13.93
Máximo	22.21	20.90	18.31
Desviación Standard	2.17	2.61	1.18

Tabla 12: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard de carbonatos de los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en porcentaje.

El N-13 localizado más cerca de dicha provincia carbonatada presenta el valor promedio más alto de carbonatos (19.75 %). El núcleo 30, el más somero y más afectado por las descargas de terrígenos es el que presenta los valores promedio más bajos de carbonatos (16.94 %). Se observa que hay una disminución en dichos porcentajes mientras más cercanos se encuentran a la costa (Fig 9).

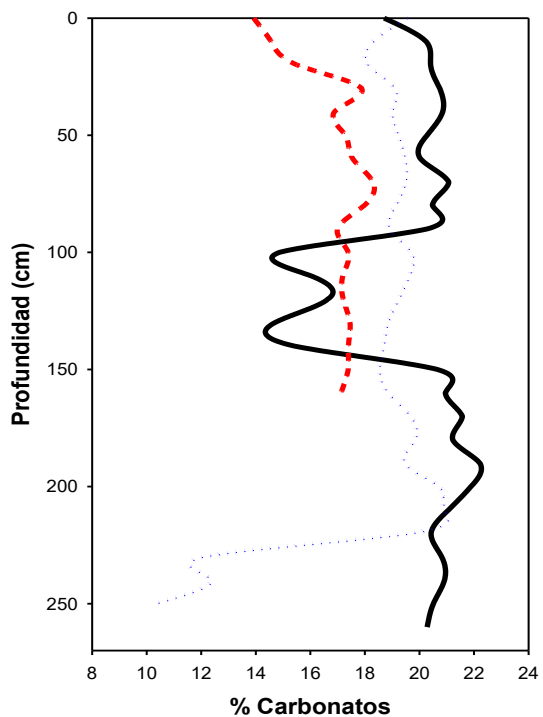


Figura 15: Perfiles de carbonatos de los núcleos N-13 — N-22 ●●● y N-30 —

5.8.3 Análisis de Carbonatos por cada núcleo

5.8.3.1 Núcleo 13

A lo largo del núcleo se observan valores de carbonatos por arriba del promedio (19.8%), a excepción del intervalo comprendido entre 100 y 140 cm donde la concentración más baja es de 14.7 %, a los 130 cm. El valor máximo de 22.22 % se presenta a 190 cm de profundidad. La correlación de 0.53 de CaO con CO₃ (Anexo 2) sugiere un origen biogénico cabe recordar que el núcleo se encuentra cerca de la zona carbonatada de la península de Yucatán, lo que podría explicar dicho valor.

5.8.3.2 Núcleo 22

A lo largo del núcleo se observan valores arriba del promedio de 18.42 %. Únicamente en la parte más profunda del núcleo se presenta una disminución considerable a partir de los 230 cm, teniendo su valor mínimo 10.34%, en los 250 cm, dicho valor se puede explicar porque hace aproximadamente 2000 años no había un aporte importante de carbonatos, debido a la litología continental, formada principalmente por rocas sedimentarias.

5.8.3.3 Núcleo 30

Se presentan variaciones a lo largo del núcleo. En la superficie del núcleo se presenta el valor más bajo (13.93%). A partir de los 30 cm los valores son más regulares aunque el valor más alto de carbonatos se encuentra a los 70 cm (18.31%). Estos valores son menores en comparación a los otros 2 núcleos debido a que se encuentra más alejado de la zona carbonatada, no hay asociación entre Ca y CO₃.

5.8.4 Elementos Mayores

La concentración de los Elementos Mayores, así como el orden de abundancia varían ligeramente entre un núcleo y otro como se puede observar a continuación:

N-13: SiO₂> Al₂O₃>CaO> Fe₂O₃>MgO> Na₂O > K₂O > SO₃> TiO₂> P₂O₅>MnO

N-22: SiO₂> Al₂O₃>CaO> Fe₂O₃>MgO> Na₂O > K₂O > SO₃> TiO₂> P₂O₅>MnO

N-30: SiO₂> Al₂O₃>CaO> Fe₂O₃>MgO>K₂O >Na₂O > SO₃> TiO₂> P₂O₅>MnO

Los núcleos 13 y 22 presentan el mismo orden de abundancia, únicamente el N-30, el más cercano a la costa presenta más K₂O que Na₂O.

El resumen de los valores obtenidos para los Elementos Mayores, se muestra en la Tabla 13:

Elemento (% p/p)	Núcleo-13				Núcleo-22				Núcleo-30			
	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.
% SiO ₂	41.66	39.37	43.22	0.78	45.48	42.72	58.67	4.25	45.34	41.18	46.64	1.22
% Al ₂ O ₃	14.18	13.56	14.63	0.23	13.49	9.77	14.60	1.14	14.66	13.31	15.43	0.46
% TiO ₂	0.63	0.58	0.67	0.02	0.64	0.58	0.67	0.02	0.70	0.67	0.72	0.01
% Fe ₂ O ₃	5.87	5.62	6.10	0.11	5.58	3.82	6.04	0.54	6.13	5.68	6.48	0.20
% MnO	0.07	0.06	0.08	0.004	0.06	0.05	0.07	0.005	0.07	0.06	0.11	0.01
% CaO	11.32	10.64	11.94	0.31	10.48	4.94	12.80	1.71	9.21	8.45	9.52	0.28
% MgO	3.44	3.17	3.62	0.10	3.21	2.51	3.49	0.21	3.14	2.92	3.33	0.12
% Na ₂ O	1.74	1.30	2.09	0.21	1.63	1.11	2.11	0.24	1.81	1.49	2.11	0.17
% K ₂ O	1.51	1.31	1.78	0.12	1.58	1.22	1.84	0.14	1.82	0.68	1.99	0.09
% P ₂ O ₅	0.52	0.49	0.55	0.02	0.48	0.35	0.53	0.04	0.47	0.44	0.56	0.03
% SO ₃	0.98	0.40	1.47	0.23	1.17	0.23	1.85	0.41	0.86	0.33	1.31	0.28

Tabla 14: Resumen de los promedios mínimo, máximo y desviación standard de los Elementos Mayores de los núcleos N-13, N-22 y N-30.

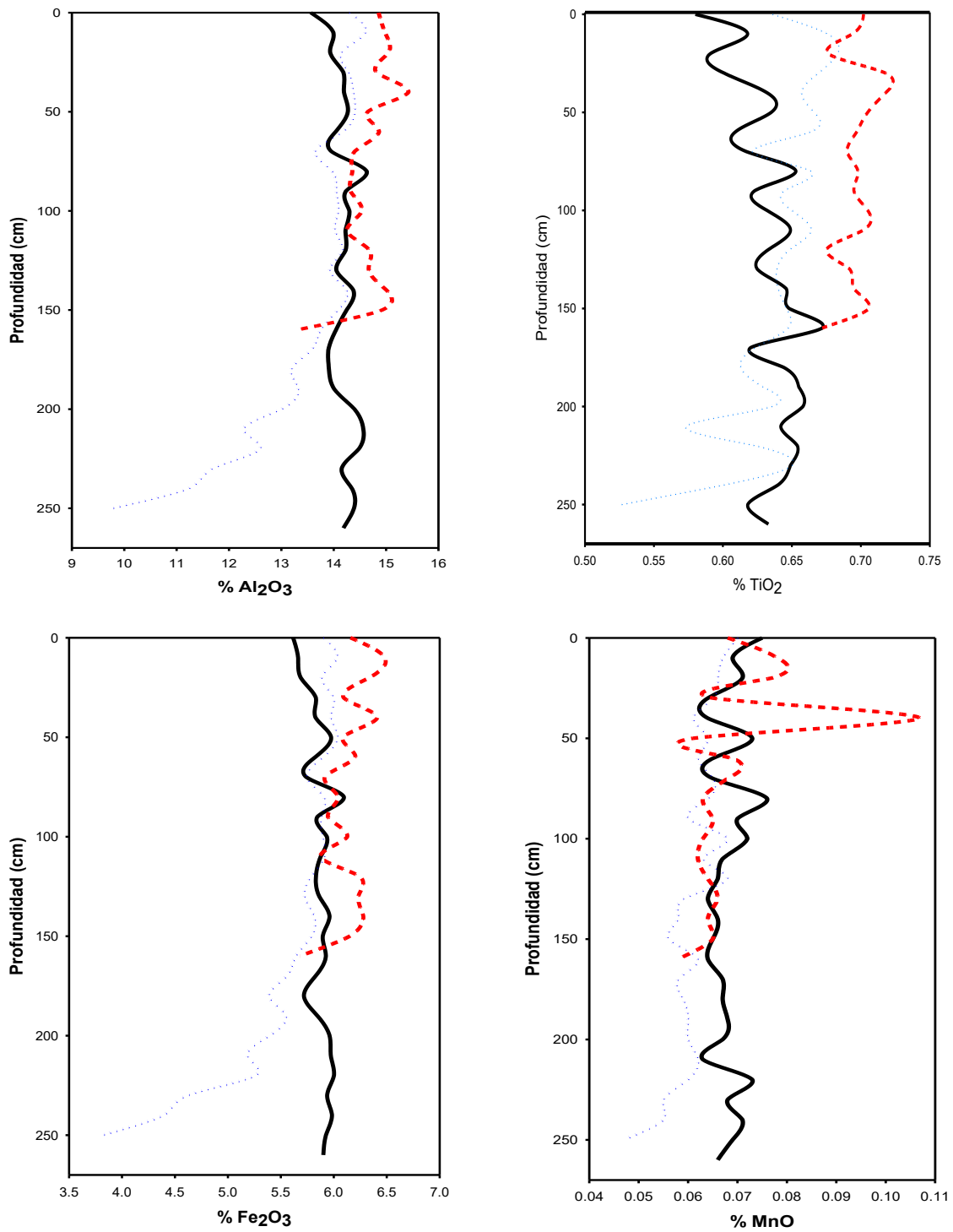
El N-13 presentó los promedios de las concentraciones más altas en CaO(11.32%); MgO(3.44%); P₂O₅(0.52%).Este núcleo se encuentra más alejado de la costa. En general, los valores de cada uno de los elementos mayores se comportan de manera similar a lo largo de todo el núcleo, no existen variaciones importantes.

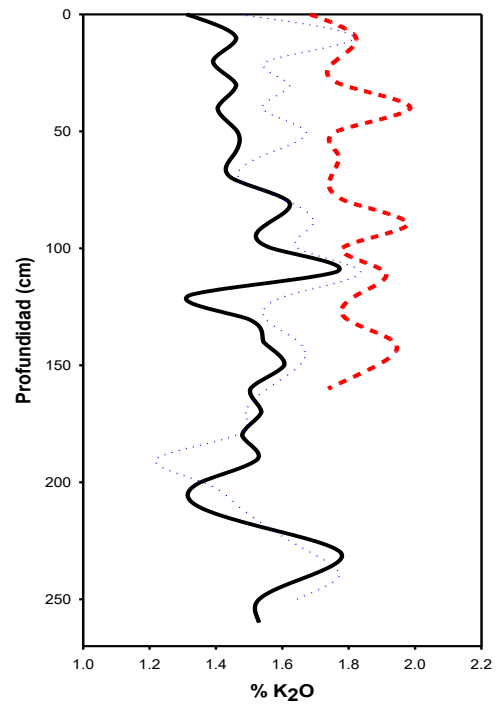
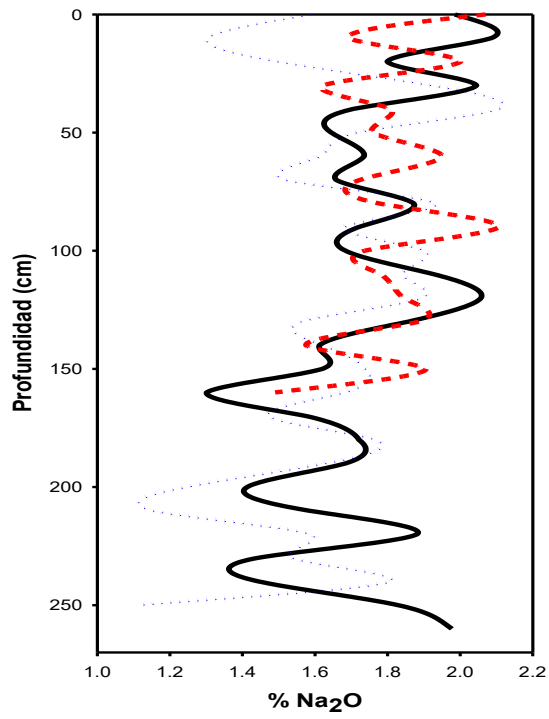
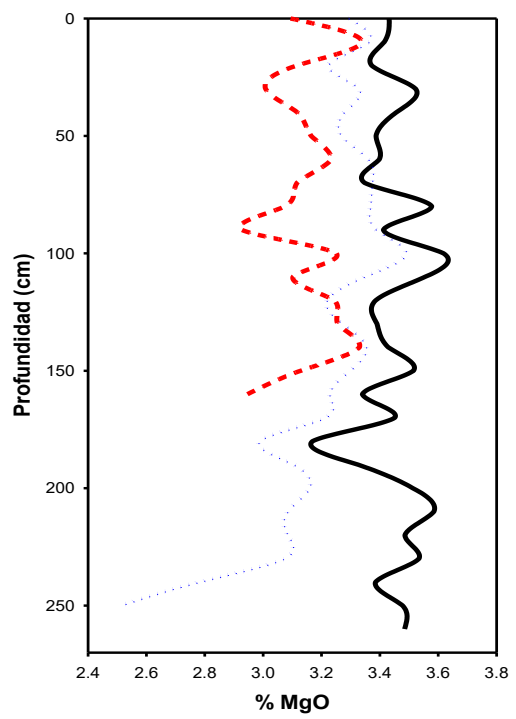
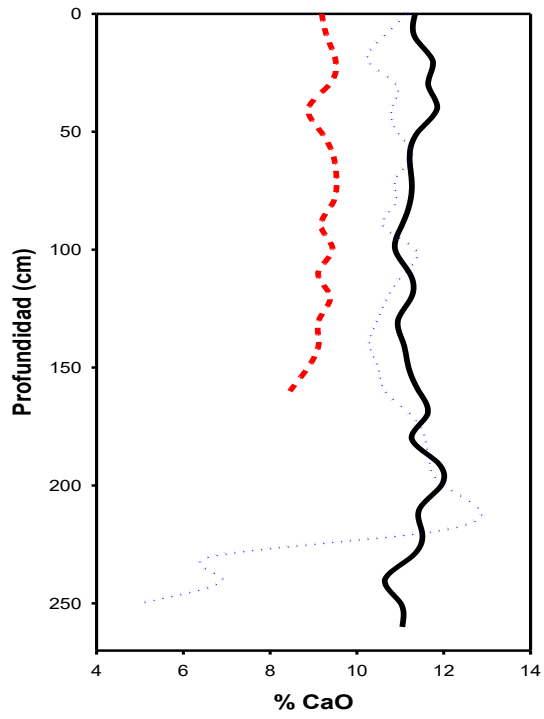
El N-22 tiene los promedios de las concentraciones más altos en SiO₂ (45.48%); y en SO₃ (1.17%).Existen variaciones importantes en los valores de SiO₂; Al₂O₃; Fe₂O₃; CaO; MgO; Na₂O; K₂O y SO₃.

El N-30 es el que presenta una mayor cantidad de elementos con concentraciones más altas en los casos de elementos pesados Al₂O₃ (14.66%); TiO₂ (0.70%);Fe₂O₃(6.13%);Na₂O(1.81%); K₂O(1.82%). Existen variaciones importantes en los valores de SiO₂; Al₂O₃; CaO; Na₂O; K₂O y SO₃.

En el caso del MnO, el porcentaje fue el mismo en N-13 y N-30(0.07%).

En la Fig. 10 se muestran los perfiles de Elementos Mayores para cada núcleo seguido de un análisis para cada elemento.





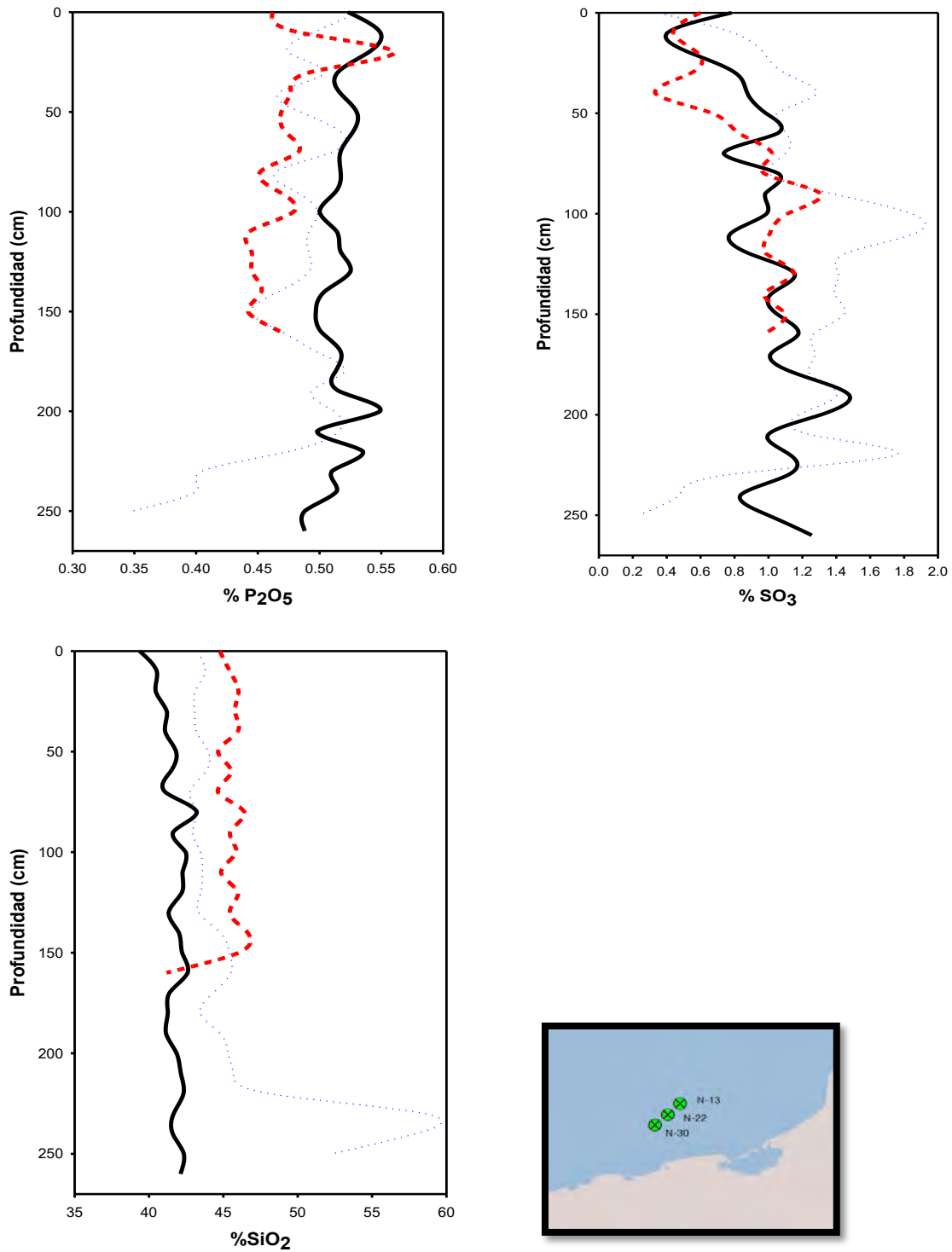


Figura 16: Perfiles de los Elementos Mayores de los núcleos N-13 — N-22 ●●● y N-30 — — —

El aluminio en los núcleos N-13 y N-30 presenta un comportamiento similar. El N-22 presenta una disminución en la parte final a los 200 cm (9.78%). En el N-30, se presenta el valor máximo de este elemento (15.43%) (Figura 10), lo que aparentemente está asociado a su mayor cercanía a la costa y descargas terrígenas.

Al comparar los perfiles de Aluminio y Silicio, del núcleo N-22, observamos que no existe un comportamiento similar entre ellos. La concentración de silicio presente en el N-22 se incrementa en la parte final del núcleo alcanzando un máximo de 58.67%, mientras que la del aluminio disminuye, 14.60%, probablemente por la litología existente en el continente hace 2000 años y por diagénesis explicando el proceso de degradación que sufre más fácilmente el aluminio. Los núcleos N-13 y N-30 presentan valores similares de Aluminio y Silice, como se puede observar en los perfiles de la Fig 10, la asociación de estos elementos sugiere la presencia de silicoaluminatos.

La concentración promedio del hierro es mayor en el N-30 (6.13%) y menor en el N-22 (5.57%). Hay una disminución de este elemento en la parte final del N-22 a partir de los 230 cm (4.62%-3.82%), como también se observa en los perfiles de otros elementos (Mg, P, Al y Ca). Tiene una relación significativa con aluminio, silicio, titanio, y magnesio en el N-13; con aluminio, magnesio, manganeso, y sodio en el N-22 y con aluminio, manganeso, y magnesio en el N-30, que sugiere la presencia de metales pesados.

El titanio presenta concentraciones similares en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (0.63%); N-22 (0.63%) y N-30 (0.69%) (Figura 10), Tiene una relación significativa con silicio, aluminio, hierro y potasio en el N-13, con silicio en el N-22.

El sodio presenta concentraciones similares en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (1.73%); N-22 (1.63%) y N-30 (1.80%) (Figura 10), pero no se encuentra asociado con silicio y aluminio.

La concentración del potasio es similar en los 3 núcleos, siendo la mayor concentración en el N-30 (1.82%). Tiene una relación significativa con silicio, titanio, hierro en el N-13, y únicamente con silicio en el N-30.

La concentración promedio del calcio es mayor en el N-13 (11.32%) y menor en el N-30 (9.20%). Esto se debe probablemente a que el N-13 se encuentra más cerca de la zona carbonatada de Yucatán, por lo que existe una mayor concentración de sedimentos carbonatados predominantes en las playas de Yucatán (Kasper-Zubillaga et al., 2106). Hay una disminución de este elemento en la parte final del N-22 a partir de los 230 cm (6.64%-4-95%), como también se observa en los perfiles

de otros elementos (Mg, P, Al y Fe). La presencia de calcio podría estar asociado a carbonato de calcio. Tiene una relación significativa con fósforo en el N-22 y N-30.

La concentración del fósforo es similar en los 3 núcleos, siendo ligeramente mayor la concentración en el N-13 (0.51%). Existe una disminución en la parte final del N-22, con el valor mínimo (0.35%) de los 3 núcleos. Existe una relación significativa con el calcio en los 3 núcleos. Este comportamiento es similar al perfil del calcio (Figura 10). Esta relación indica la presencia del mineral apatita y presencia de restos de organismos biogénicos.

La concentración del magnesio es similar en los 3 núcleos, siendo la mayor concentración en el N-13 (3.44%) y la menor en el N-30 (3.14%). En el N-22 existe una disminución en la parte final del núcleo (240-250 cm) con un valor de 2.51%. Tiene una relación significativa con silicio, aluminio y hierro en el N-13, con silicio, manganeso y hierro en el N-22 y con aluminio y hierro en el N-30.

El manganeso presenta concentraciones similares en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (0.068%); N-22 (0.061%) y N-30 (0.068%) (Figura 10). En el N-30 existe el valor más alto (0.11%) a los 40 cm. Tiene una relación significativa con aluminio, hierro, magnesio y fósforo en el N-22, con aluminio y hierro en el N-30.

5.8.5 Elementos Traza

Los elementos traza son elementos que están presentes en las rocas en concentraciones menores al 0.1% (1000 ppm).

La mayoría de los elementos traza si bien no forman especies minerales por si solos, son capaces de sustituir a los elementos mayores en los minerales formadores de roca. Los elementos traza son importantes en estudios geoquímicos, ya que son mejores discriminantes entre procesos geoquímicos que los elementos mayores.

La concentración de los Elementos Traza así como el orden de abundancia varían en ciertos elementos, entre un núcleo y otro, como se puede muestra a continuación:

N-13: Cr >Zn > V>Ni > Cd>Cu>Pb

N-22: Cr >V > Zn >Ni > Cd>Cu>Pb

N-30: Cr >V > Zn>Ni > Cd>Cu>Pb

El N-13 tiene los promedios más altos en las concentraciones para el Zn (97.78 ppm); y Ni (78.29 ppm).

El N-22 tiene el promedios más alto en las concentraciones para el Cr (180.10 ppm).

El N-30 tiene los promedios más altos en las concentraciones para el Cu (18.79 ppm).

Elemento (mg/kg))	Núcleo-13				Núcleo-22				Núcleo-30			
	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.	Promedio	Mínimo	Máximo	D.S.
Cu	18.17	16.18	19.46	0.71	12.62	5.19	16.60	3.72	18.79	13.23	21.52	2.06
Zn	97.78	82.57	105.29	4.51	78.68	47.38	94.47	10.35	88.66	48.13	93.90	10.67
Ni	78.29	35.18	92.10	14.47	76.79	34.44	108.21	13.33	67.49	33.60	81.25	14.70
V	96.26	67.52	113.60	10.60	97.34	73.37	112.63	11.23	100.51	86.90	130.93	10.81
Cr	143.36	121.68	158.72	7.71	180.10	133.60	383.51	74.63	133.13	121.28	149.83	7.32
Pb	12.65	6.61	17.86	3.00	11.41	4.33	17.92	3.04	13.57	7.91	18.72	3.52
Cd*	46.70	31.68	64.93	6.97	52.94	25.14	64.31	10.09	73.26	56.87	92.54	8.79

Tabla 13: Resumen de los valores promedio, mínimo, máximo y desviación standard de los elementos traza de los núcleos N-13, N-22 y N-30, expresado en ppm, Cd expresado en ppb

El análisis por núcleos de las concentraciones de los elementos traza muestra que:

La concentración promedio del cobre en los 3 núcleos es menor que el valor de la corteza continental que es de 25 ppm (Taylor, McLennan, 1985) El N-30 tiene el promedio más alto de Cu con 18.79 ppm. En el N-22 hay variaciones importantes a lo largo de todo el núcleo, con un valor mínimo de 5.19 ppm y un máximo de 16.60 ppm.

El zinc presenta concentraciones diferentes en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (97.78 ppm); N-22 (78.68 ppm) y N-30 (88.65 ppm) (Figura 14). El valor máximo es de 105.29 ppm en el N-13. En la parte final de los núcleos N-22 y N-30 hay una disminución en la concentración de zinc. El valor reportado en la corteza continental es de 71 ppm por lo que existe un aumento en la concentración de este elemento en esta zona del Golfo de México.

El níquel presenta concentraciones muy variadas a lo largo de los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (78.28 ppm); N-22 (76.79 ppm) y N-30 (67.48 ppm) (Figura 14). El valor máximo se encuentra en el N-22 (108.21 ppm). El valor reportado en la corteza continental es de 44 ppm (Taylor, McLennan, 1985) menor al encontrado en los 3 núcleos estudiados.

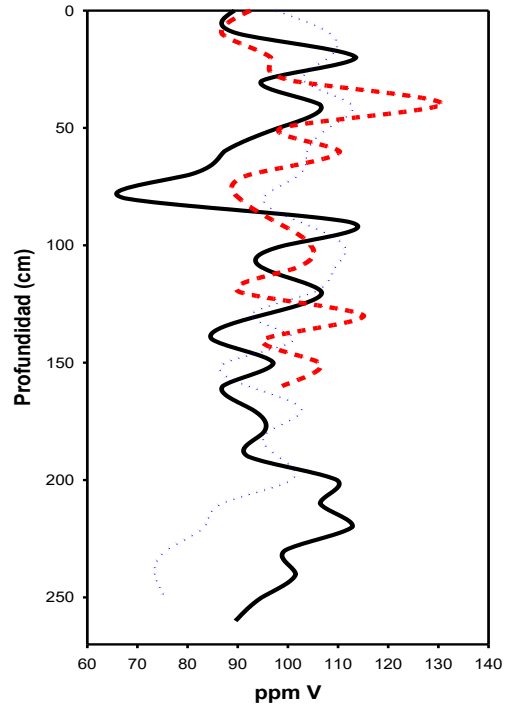
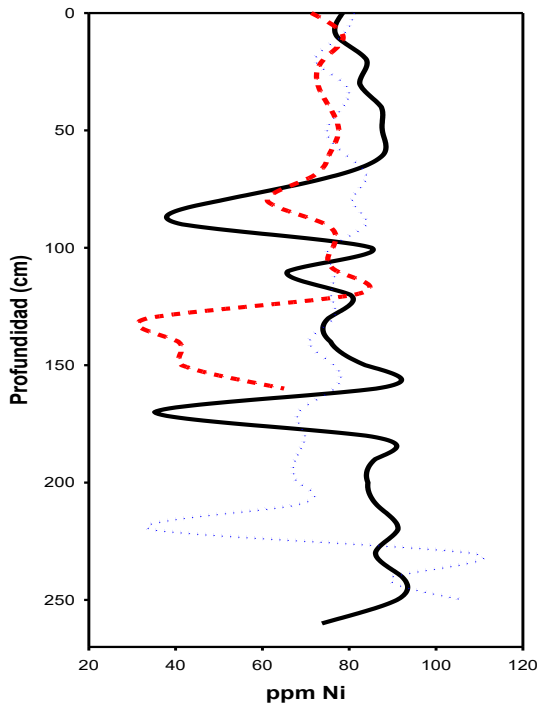
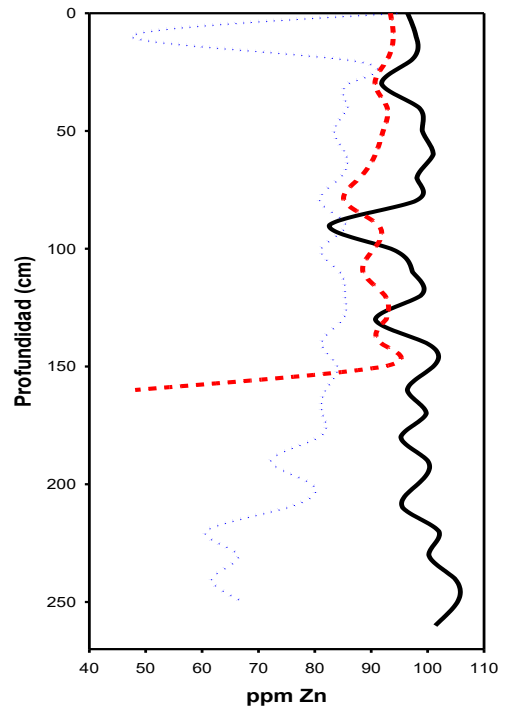
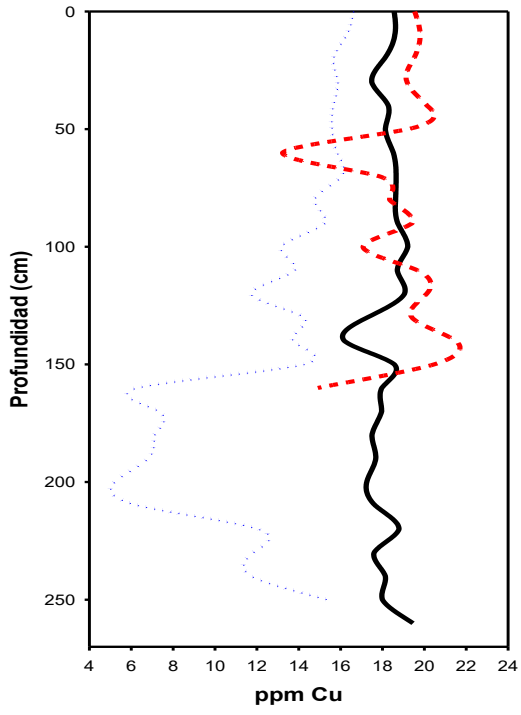
El vanadio presenta concentraciones diferentes en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios N-13 (96.23 ppm); N-22 (97.33 ppm) y N-30 (100.51 ppm) (Figura 14). El valor máximo se encuentra en el N-30 (130.93 ppm). El valor

reportado en la corteza continental es de 107 ppm (Taylor, McLennan, 1985), mayor al encontrado en los 3 núcleos estudiados.

El cromo presenta concentraciones muy variadas a lo largo de los 3 núcleos, N-13 (143.36 ppm); N-22 (180.09 ppm) y N-30 (133.13 ppm) (Figura 14). En la parte final del N-22 a partir de los 200 cm hasta los 250 cm hay un aumento importante en la concentración, alcanzando un valor máximo de 383.51 ppm. El valor reportado en la corteza continental es de 83 ppm (Taylor, McLennan, 1985) es decir, es menor al encontrado en los 3 núcleos estudiados.

El plomo presenta concentraciones similares en los 3 núcleos, como se puede observar en sus promedios, N-13 (12.65 ppm), N-22 (11.41 ppm) y N-30 (13.57 ppm.). El valor reportado en la corteza continental es de 17 ppm (Taylor, McLennan, 1985) mayor al encontrado en los 3 núcleos estudiados.

El cadmio presenta concentraciones muy variadas a lo largo de los 3 núcleos, N-13 (46.69 ppm); N-22 (52.93 ppm) y N-30 (73.26 ppm) (Figura 14). El valor máximo (92.54 ppm) se encuentra a los 100 cm en el N-30. El reportado en la corteza continental es de 98 ppm (Taylor, McLennan, 1985) que es mayor al encontrado en los 3 núcleos estudiados.



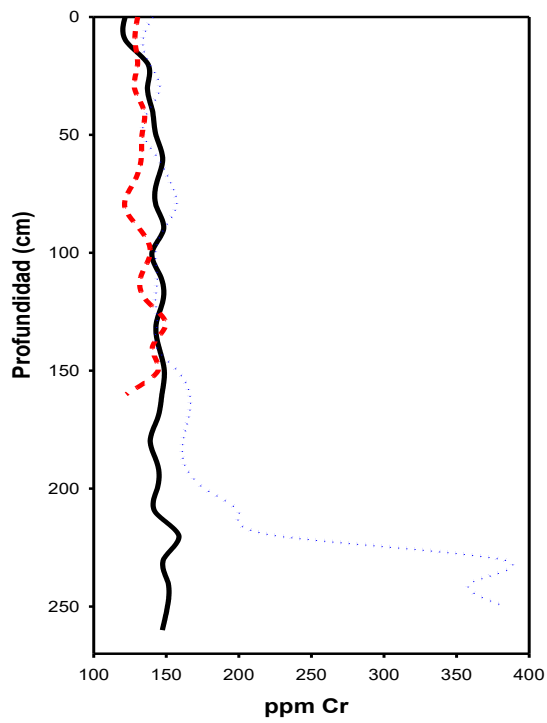
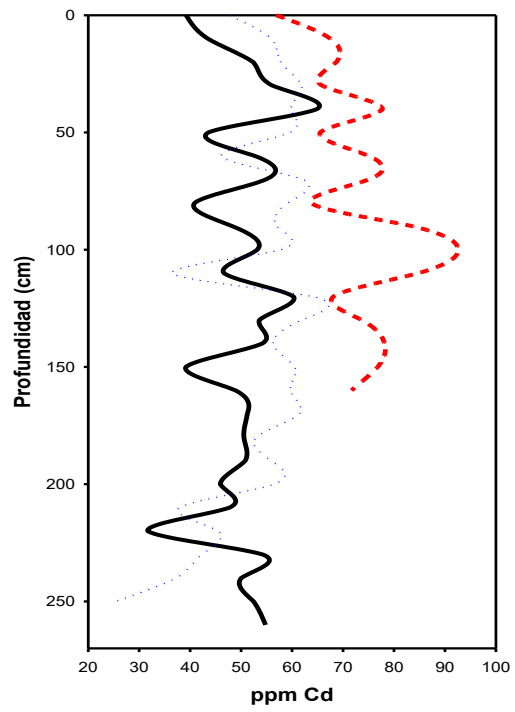
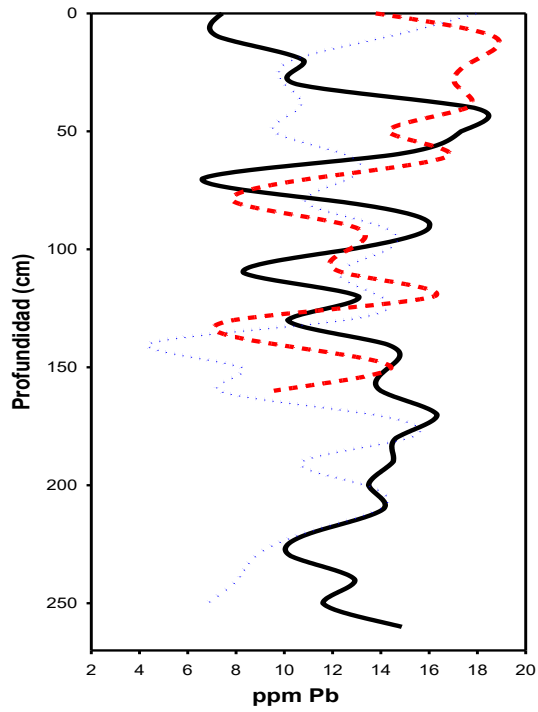


Figura 17: Perfiles de los Elementos Trazas (Cu, Zn, Ni, V, Pb, Cd y Cr) de los núcleos N-13 — N-22 ●●● y N-30 — —

De acuerdo al fechado realizado en el N-13, se determinó que las 3 edades fechadas a diferentes profundidades de dicho núcleo (0 cm, 100 cm y 260 cm), comprenden un intervalo de los 50 AP a los 1985 AP, es decir, todos los sedimentos del núcleo pertenecen al período Cuaternario de la era Cenozoica que comenzó hace 10 000 años. Los sedimentos de la profundidad del núcleo eran de origen terrígeno, como se observa con los resultados obtenidos y perfiles realizados de Elementos Mayores.

Por las características dinámicas y morfológicas de los ríos, la trayectoria de cada uno fue cambiando con el paso de los años. Los ríos Grijalva y Usumacinta se unieron y formaron el delta activo del Grijalva-Usumacinta. Con esta unión disminuyó el aporte sedimentario del brazo derecho del Río Usumacinta (el Río San Pedro-San Pablo) y así su importancia hidrológica al anularse la morfogénesis de cordones costeros, éstos se erosionaron y retrocedió la línea de costa del frente deltaico (Psuty, 1967).

5.9 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Para poder interpretar los datos obtenidos de los núcleos N-13, N-22 Y N-30, se realizó un análisis de correlación de Pearson, con el programa StatGraphics versión XVII-X64. Se consideraron correlaciones con un nivel de significancia >95% para los 3 núcleos.

Para el N-13, con $n=27$, las correlaciones significativas se muestran en el Anexo 1, los valores significativos encontrados fueron:

Fe_2O_3 con Al_2O_3 (0.86); con SiO_2 (0.75); con TiO_2 (0.66), estos valores sugieren la presencia de silicoaluminatos. La correlación con las arcillas (0.47) se asocia al tamaño de partícula.

La correlación de CaO con CO_3 (0.53) sugiere la presencia de carbonato de calcio, cabe recordar que el núcleo se encuentra cerca de la zona carbonatada de la península de Yucatán, lo que podría explicar dicho valor.

Con los metales traza, únicamente se presentaron correlaciones positivas de Zn con Ni (0.41), con Cr (0.64), podrían indicar la presencia de olivino (De Carlo y Anthony, 2001).

Para el N-22, $n=26$, en el Anexo 1, se presentan las correlaciones significativas:

Fe₂O₃ con Al₂O₃ (0.92); con MgO (0.68); con MnO(0.73), sugieren la presencia de minerales pesados. La correlación con las arcillas (0.50) se asocia al tamaño de partícula.

La alta correlación de CaO con CO₃ (0.94) sugiere la presencia de carbonato de calcio, cabe recordar que el núcleo se encuentra cerca de la zona carbonatada de la península de Yucatán. Con los limos (0.64) sugieren el predominio de esta fracción en el núcleo.

Con los metales traza, las correlaciones positivas son Cu con Ni (0.55); con Zn (0.49); con V (0.51); con Cd (0.50).

Por último en el N-30, n=17, en el Anexo 1 se muestran las correlaciones significativas observadas.

Fe₂O₃ con Al₂O₃ (0.90); y con SiO₂ (0.51) sugieren nuevamente la presencia de silicoaluminatos.

La correlación de CaO con P₂O₅ (0.53) podría deberse tanto a la posible presencia del mineral apatita, Ca₅(PO₄)₃(F, Cl, OH).

Con los metales traza, las correlaciones positivas son Cu con Zn (0.64); Cr con V (0.53); Zn con Pb (0.57); Ni con Pb (0.60); V con Cd (0.49).

5.10 ELEMENTOS TRAZA Y EVALUACIÓN AMBIENTAL

En estudios de sistemas naturales es importante analizar el posible origen de los metales traza y si su origen se asocia a procesos naturales o antrópicos. Con este fin, se evaluaron varios índices como Índice de Terrígenos, Factor de Enriquecimiento, e Índice de Geo-acumulación para conocer el origen de dichos elementos.

5.10.1 Índice de Terrígenos

Este índice utiliza el porcentaje obtenido de los elementos Al, Fe y Mn que se encuentran en los sedimentos, mediante la relación:

$$I.T. = \frac{Al}{Al+Fe+Mn}$$

El resumen de los resultados de los 3 núcleos se muestra en la siguiente Tabla:

	I.T N-13	I.T. N-22	I.T. N-30
Promedio	0.643	0.644	1.022
Mínimo	0.639	0.638	0.988
Máximo	0.648	0.656	1.041
Des. Est.	0.0021	0.0048	0.150

Tabla 14: Resumen del Índice de Terrígenos

Al analizar cada uno de los valores encontrados a lo largo de los 3 núcleos estudiados, se observa que:

Los valores obtenidos en los núcleos N-13 y N-22 son constantes a lo largo de todo el núcleo (Anexo 1). En el N-30, se encuentran valores más altos a lo largo de todo el núcleo, con un valor máximo de 1.041 a los 70 cm de profundidad cabe recordar que este núcleo es el más cercano a la costa.

Este valor indica que el suministro de terrígenos en los núcleos estudiados están en función del área de influencia terrígena, (Boström, 1973; Ruíz-Fernández et al., 2014) como lo es la desembocadura del río Usumacinta.

5.10.2 Factor de Enriquecimiento (FE)

El Factor de enriquecimiento permite comparar que tan enriquecido está un elemento comparándolo contra una muestra de referencia. La selección de los sedimentos usados como referencia es muy importante, y varía de un estudio a otro. La referencia seleccionada puede ser el valor más bajo encontrado en el área de estudio; el valor correspondiente a la parte más profunda de un núcleo que puede corresponder a condiciones prístinas o bien usar como referencia los valores de metales presentes en la corteza continental superior. Para determinar el grado de enriquecimiento se toman en cuenta las concentraciones de metales observadas en la corteza terrestre, asumiendo que las relaciones entre los diferentes metales y los elementos conservativos son relativamente constantes durante los procesos naturales a los que están expuestos los sedimentos. El Al es de los elementos más usados debido a que considera su concentración como una aproximación al contenido de arcillas en los sedimentos (Chiu-Wen, 2007; Celis, 2014).y su concentración generalmente no es afectada por procesos antrópicos.

El modelo del Factor de Enriquecimiento se representa como:

$$FE = \frac{(ET)/(Al)_{Muestra}}{(ET)/(Al)_{Referencia}}$$

Donde: *ET* = Concentración de Elemento Traza estudiado en los sedimentos

Al = Concentración de Aluminio presente en la muestra

ET = Concentración del Elemento Estándar de Referencia

Al = Concentración del Aluminio Estándar no contaminado

De acuerdo a Del Águila et al, 2005, el valor del Factor de Enriquecimiento (FE) refleja las condiciones en que se encuentra el sistema tal como se muestra en la Tabla 10.

Valor Obtenido del Factor de Enriquecimiento	Condición
< 1	No Enriquecido
1 – 3	Enriquecimiento Menor
3 – 5	Enriquecimiento Moderado
5 – 10	Enriquecimiento Moderadamente Severo
10 – 25	Enriquecimiento Severo
25 – 50	Enriquecimiento Muy Severo
> 50	Enriquecimiento Extremadamente Severo

Tabla 15: Valores del Factor de Enriquecimiento y sus parámetros

Tomando como referencia los valores de los metales traza de la corteza continental, se encontró que de los siete metales traza analizados en los 3 núcleos (Cu, Ni, Zn, Cr, V, Cd y Pb), únicamente se presenta un enriquecimiento menor para Ni, cuyos valores máximos son N-13 (1.17); N-22 (1.98) y N-30 (1.01). (Tabla 17)

Para el Cr, en el N-13 se presenta un enriquecimiento menor (1.06) y un enriquecimiento moderado en el N-22 (3.79). (Tabla 17)

	Cu	Zn	Ni	V	Cr	Pb	Cd
	N-13						
Promedio	0.41	0.78	1.00	0.50	0.97	0.42	0.28
Mínimo	0.36	0.65	0.46	0.34	0.84	0.22	0.17
Máximo	0.44	0.82	1.17	0.61	1.06	0.59	0.37
Des. Std.	0.01	0.03	0.18	0.05	0.04	0.09	0.04
	N-22						
Promedio	0.30	0.66	1.05	0.54	1.35	0.39	0.31
Mínimo	0.12	0.36	0.49	0.46	0.88	0.14	0.21
Máximo	0.50	0.77	1.98	0.59	3.79	0.59	0.37
Des. Std.	0.08	0.07	0.27	0.03	0.77	0.09	0.04
	N-30						
Promedio	0.41	0.68	0.84	0.51	0.88	0.43	0.41
Mínimo	0.28	0.40	0.41	0.43	0.81	0.25	0.31
Máximo	0.46	0.72	1.01	0.63	0.98	0.59	0.52
Des. Std.	0.04	0.07	0.18	0.05	0.04	0.10	0.05

Tabla 16: Resumen del Factor de Enriquecimiento (FE), utilizando los valores de la corteza continental superior (Taylor, McLennan, 1985)

5.10.3 Índice de Geo-acumulación

El índice de Geo-acumulación permite calcular el grado de aporte antrópico de un metal tomando en cuenta la litología del área. En el presente trabajo se midió el índice de geo acumulación de cada metal, usando la siguiente ecuación (Müller, 1969).

$$I_{GEO} = \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right)$$

Donde:

C_n = Representa la concentración de los metales estudiados en las muestras de los sedimentos.

B_n = Representa la concentración del valor tomado como referencia de los metales en la corteza terrestre.

1.5 = Factor que considera posible la variabilidad de variaciones litológicas.

Se utilizaron valores de la corteza continental superior (Taylor- McLennan, 2001).

De acuerdo a Muller (1969) el valor del índice de Geo-acumulación corresponde a las condiciones dadas en la Tabla 18.

I_{GEO}	Clase de I	Grado de Contaminación
0	$I_{GEO} \leq 0$	No contaminado
1	$0 \leq I_{GEO} \leq 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 \leq I_{GEO} \leq 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 \leq I_{GEO} \leq 3$	Moderado a fuertemente contaminado
4	$3 \leq I_{GEO} \leq 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 \leq I_{GEO} \leq 5$	Fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$I_{GEO} \geq 5$	Extremadamente contaminado

Tabla 17: Parámetros del índice de geo-acumulación

Los valores obtenidos del índice de geo-acumulación en este estudio (Tabla 19) mostraron que los valores promedio están por debajo de 1 en el caso de todos los metales estudiados, excepto para el Ni y el Cr que muestran grados diferentes de contaminación:

	Cu	Zn	Ni	V	Cr	Pb	Cd
N-13							
Promedio	-1.04	-0.12	1.18	-0.74	0.06	-1.05	-1.57
Mínimo	-1.21	-0.36	0.53	-1.24	0.00	-1.94	-2.21
Máximo	-0.94	-0.01	1.39	-0.49	0.10	-0.51	-1.17
Des. Std.	0.04	0.04	0.15	0.12	0.01	0.30	0.16
N-22							
Promedio	-1.65	-0.45	1.16	-0.73	0.13	-1.21	-1.50
Mínimo	-2.85	-1.16	0.52	-1.12	0.03	-2.55	-2.54
Máximo	-1.17	-0.17	1.63	-0.51	0.48	-0.50	-1.19
Des. Std.	0.41	0.15	0.12	0.13	0.09	0.33	0.25
N-30							
Promedio	-1.00	-0.27	1.02	-0.68	0.02	-0.95	-1.01
Mínimo	-1.50	-1.14	0.50	-0.88	-0.01	-1.68	-1.37
Máximo	-0.80	-0.18	1.23	-0.29	0.08	-0.44	-0.66
Des. Std.	0.12	0.10	0.17	0.10	0.01	0.32	0.13

Tabla 18: Índices de Geo-acumulación para los núcleos N-13, N-22 y N-30, usando los valores de la corteza continental superior como referencia

En el N-13, el índice de geo-acumulación obtenido para los elementos Cu, Zn, V, Pb y Cd es $I_{GEO} \leq 0$, es decir, los sedimentos estudiados no presentan contaminación. El Ni presenta un valor máximo de 1.39, indica que el sedimento está moderadamente contaminado. En el caso del Cr, su valor máximo es de 0.10, es decir, se encuentra en el rango de no contaminado a moderadamente contaminado. (Tabla 19).

En el N-22, el índice de geo-acumulación obtenido para los elementos Cu, Zn, V, Pb y Cd es $I_{GEO} \leq 0$, los sedimentos estudiados no presentan contaminación. El Ni presenta un valor máximo de 1.63, indica que el sedimento está moderadamente contaminado. En el caso del Cr, su valor máximo es de 0.48, es decir, se encuentra en el rango de no contaminado a moderadamente contaminado. (Tabla 19).

En el N-30, el índice de geo-acumulación obtenido para los elementos Cu, Zn, V, Pb y Cd es $I_{GEO} \leq 0$, los sedimentos estudiados no presentan contaminación. El Ni presenta un valor máximo de 1.23, indica que el sedimento está moderadamente contaminado. En el caso del Cr, su valor máximo es de 0.08, es decir, se encuentra en el rango de no contaminado a moderadamente contaminado. (Tabla 19).

Es importante señalar que al evaluar el Factor de Enriquecimiento, y el Índice de Geo-acumulación, se observa que el níquel (Ni) y el cromo (Cr) son los únicos elementos que presentan enriquecimiento menor y moderado, a la vez que son los únicos que presentan una contaminación moderada, dichos valores se encuentran en el N-22.

5.11 ANÁLISIS DISCRIMINANTE

Se realizó un análisis discriminante con la finalidad de observar si existen diferencias significativas en las características de los 3 núcleos estudiados. Se utilizó el programa STATGRAPHICS XVII-X64.

Como se observa en la gráfica 12, hay diferencias entre los 3 núcleos debido a la distancia en la que se encuentran cada uno de la costa. El núcleo más alejado es el N-13 que se encuentra a 87.41 km, por lo que experimenta una menor energía, el N-22 está a 70.49 km y el N-30 a 55.94 km es el que se encuentra más cercano a la costa, por lo que se deduce que es una zona con mayor energía y a las corrientes.

El cuadro muestra los coeficientes de las funciones usadas para discriminar entre las distintas variables de cada núcleo.

Parámetro	Función	
	1	2
ARENAS	-4.28805	-0.567337
LIMOS	-4.40453	0.197958
ARCILLAS	-5.01445	-0.182449
M.O.	-0.0941022	0.811441
CARBONATOS	-0.548361	0.0723038
SiO ₂	-3.79707	1.02434
Al ₂ O ₃	3.80447	0.388548
MnO	0.417696	-0.303651
CaO	3.15478	0.790648
Na ₂ O	-0.389712	0.224729
K ₂ O	-0.199939	0.0167595
TiO ₂	0.167969	-0.0214066
Fe ₂ O ₃	3.57152	0.921583
MgO	0.404993	-0.168316
P ₂ O ₅	-0.816278	.0.177144
SO ₃	0.275008	-0.181695
Zn	-0.0804835	.0.787885
Ni	0.00684501	0.250431
Cu	0.380852	-0.747068
Pb	-0.396731	-0.104024
Cr	1.65348	1.62244
V	-0.345417	0.150653
Cd	-0.421062	-0.0805463

Tabla 19: Coeficientes para la Función Discriminante

Los coeficientes para la primera función discriminante son:

$$\begin{aligned}
 & -4.28805 \cdot \text{ARENAS} - 4.40453 \cdot \text{LIMOS} - 5.01445 \cdot \text{ARCILLAS} - 0.0941022 \cdot \text{MO} - \\
 & 0.548361 \cdot \text{CARBONATOS} - 3.79707 \cdot \text{SiO}_2 + 3.80447 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.417696 \cdot \text{MnO} + \\
 & 3.15478 \cdot \text{CaO} - 0.389712 \cdot \text{Na}_2\text{O} - 0.199939 \cdot \text{K}_2\text{O} + 0.167969 \cdot \text{TiO}_2 - 3.57152 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \\
 & + 0.404993 \cdot \text{MgO} - 0.816278 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 0.275008 \cdot \text{SO}_3 - 0.0804835 \cdot \text{Zn} + \\
 & 0.00684501 \cdot \text{Ni} + 0.380852 \cdot \text{Cu} - 0.396731 \cdot \text{Pb} + 1.65348 \cdot \text{Cr} - 0.345417 \cdot \text{V} - \\
 & 0.421062 \cdot \text{Cd}
 \end{aligned}$$

Se realizó un análisis discriminante, con el programa Statistica 6, para observar si existen diferencias significativas entre las variables estudiadas en cada uno de los núcleos (Textura, Elementos Mayores, Elementos Traza). Este cuadro muestra los coeficientes de las funciones usadas para discriminar entre los distintos niveles de cada sitio de muestreo. El Factor 1 está integrado por Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃. El Factor 2 está integrado por CaO, Fe₂O₃, Zn y Cr.

Considerando los resultados obtenidos con el Factor Discriminante y el Análisis Cluster, se compararon dichos resultados con los obtenidos de forma analítica con el coeficiente de correlación r tipo Pearson, con el objeto de ayudar a la interpretación de los datos obtenidos.

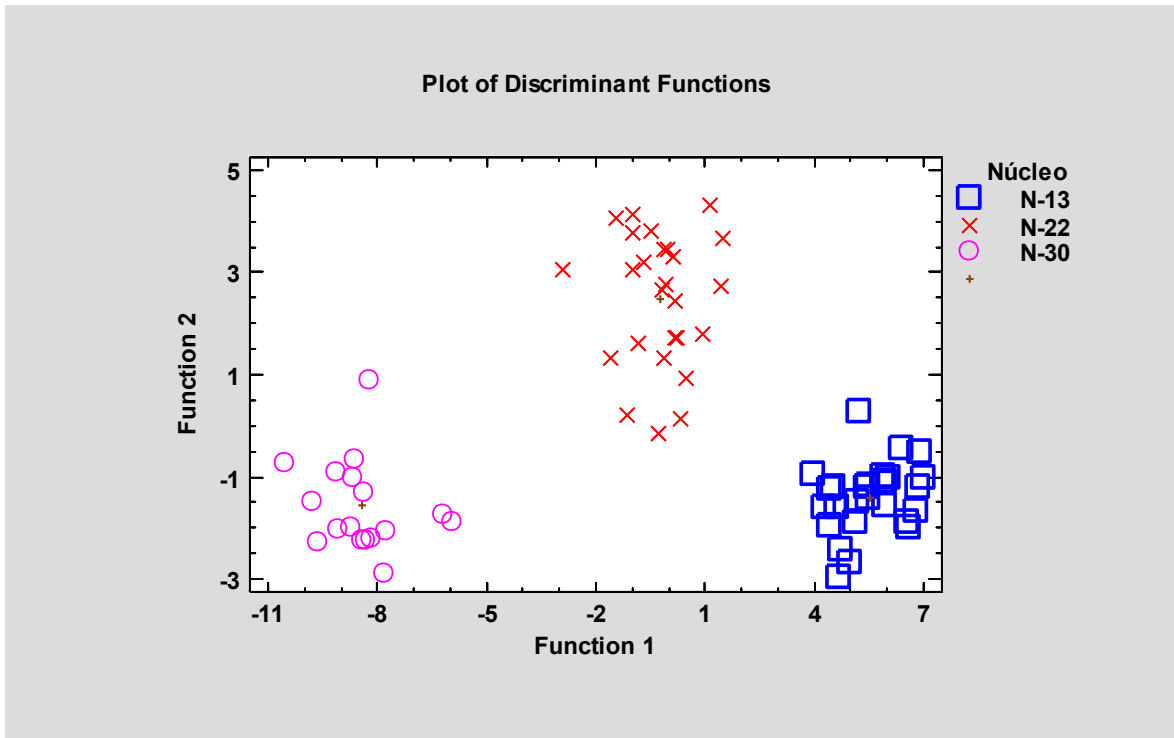


Figura 18: Gráfica del Factor Discriminante de los Núcleos N-13, N-22 y N-30, obtenida del programa STATGRAPHICS versión 1.0.

5.12 ANÁLISIS CLUSTER

Se realizó un análisis Cluster para agrupar las principales variables, como son: factores granulométricos, elementos mayores y elementos traza de los sedimentos estudiados, con el fin de observar los grupos que se forman y el grado de homogeneidad que presentan y que nos permiten encontrar ciertas relaciones entre las variables estudiadas.

Se utilizó el programa Statistica 6, considerando vecinos lejanos para graficar los dendogramas de los 3 núcleos.

5.12.1 Núcleo 13

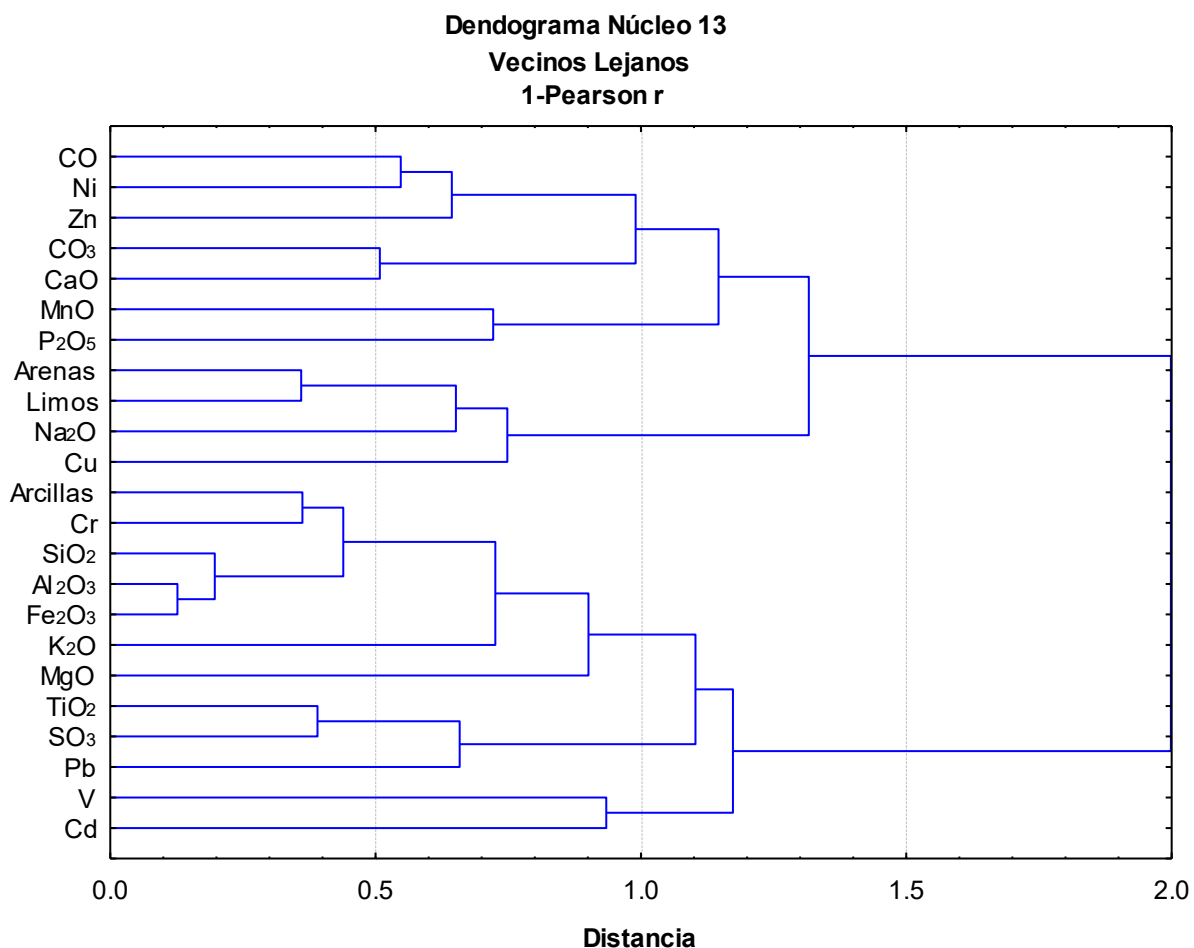


Figura 19: Dendrograma para 23 casos del N-13, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r.

De acuerdo al análisis de cluster del Núcleo 13 (Fig. 16) se observa la presencia de dos grupos integrados de la siguiente manera: cluster 1, formado por la presencia de CO, Ni, Zn, CO₃, CaO, MnO, P₂O₅, Arenas, Limos, Na₂O y Cu, sugiere un origen asociado a sedimentos carbonatados con los Limos y una influencia importante de la provincia carbonatada de Yucatán.

El cluster 2, está integrado por Arcillas, Cr, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, MgO, TiO₂, SO₃, Pb, V y Cd, la composición de este grupo sugiere un origen terrígeno de estos sedimentos, la distancia entre Al₂O₃, SiO₂ y Fe₂O₃ sugiere su presencia como silicoaluminatos; dentro de este cluster se presenta un subgrupo formado por Cd y V, que podría asociarse a un origen antrópico.

5.12.1.1 Rotación Varimax

Para determinar las variables más significativas que se encuentran en este núcleo, se aplicó la Rotación Varimax, para maximizar las varianzas y determinar las cargas asociados al N-13 y se observó la presencia de 3 factores, en la Tabla 21 se observan los parámetros que le dan peso a cada factor. El Factor 1 explica 30.56 % de la varianza, los parámetros significativos son: Limos, Arcillas, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, Cr lo que sugieren la presencia de sedimentos terrígenos, como son aluminosilicatos (Al₂O₃) asociados a partículas finas del núcleo. Las variables con carga negativa como son Arenas y Limos, sugieren que tienen una constitución química diferente a las arcillas.

Factor Loadings (Varimax raw) (N-13 Z Coast Tabasco)
Extraction: Principal Components

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Profundidad	0.752183	0.293941	-0.0126
% MO	-0.226504	0.440094	0.513771
% CO₃	0.00773	0.622521	-0.003234
ARENAS	-0.546433	0.048382	-0.097495
LIMOS	-0.846879	-0.003333	0.2537
ARCILLAS	0.846034	-0.000067	-0.235889
% SiO₂	0.840294	-0.221245	0.020818
% Al₂O₃	0.770111	-0.170475	0.115851
% TiO₂	0.77156	0.230673	0.044039
% Fe₂O₃	0.872827	-0.063238	0.186662
% MnO	-0.115921	-0.158977	0.755317
% CaO	-0.337932	0.57109	-0.136867
% MgO	0.333004	-0.431743	0.270277
% Na₂O	-0.479839	-0.53518	0.017701
% K₂O	0.574228	-0.305936	0.269144
% P₂O₅	-0.484715	0.247669	0.276113
% SO₃	0.565447	0.354456	-0.155829
ppm Cu	-0.283216	-0.190528	-0.272015
ppm Zn	0.268364	0.402901	0.386799
ppm Ni	0.04157	0.488198	0.132756
ppm V	0.087224	0.335937	-0.179884
ppm Cr	0.802321	0.131485	-0.090744
ppm Pb	0.413188	0.350977	-0.40357
ppm Cd	-0.025775	-0.036663	-0.773731
Expl.Var	7.33487	2.601641	2.323189
Prp.Totl	0.30562	0.108402	0.0968

Tabla 20: Coeficientes para la Función Discriminante, N-13

El Factor 2 explica 10.84 % de la varianza, los parámetros que le dan peso a este factor son CO_3 y CaO lo que indica su asociación a sedimentos carbonatados. El Factor 3 explica 9.68 % de la varianza y está asociado a la concentración de Cd un elemento muy posiblemente asociado a actividades antrópicas.

Se realizó un análisis cluster *Complete Linkage*, considerando la distancia que hay entre los grupos con la distancia entre los individuos más alejados. Se utilizó este tipo, porque asegura la distancia máxima que hay en un grupo de variables siendo menor que la distancia entre cualquiera de sus elementos y los elementos más alejados de los demás clusters.

Basado en los parámetros significativos de acuerdo al análisis de Factores se realizó un cluster con los diferentes intervalos analizados a lo largo del núcleo; en la Figura 17, se observa la presencia de dos grupos, cada uno incluye la presencia de 2 subgrupos. El grupo de la parte superior presenta una mayor cantidad de sedimentos carbonatados; el segundo grupo corresponden a diferentes intervalos de profundidad presentan diferente contenido de sedimentos terrígenos.

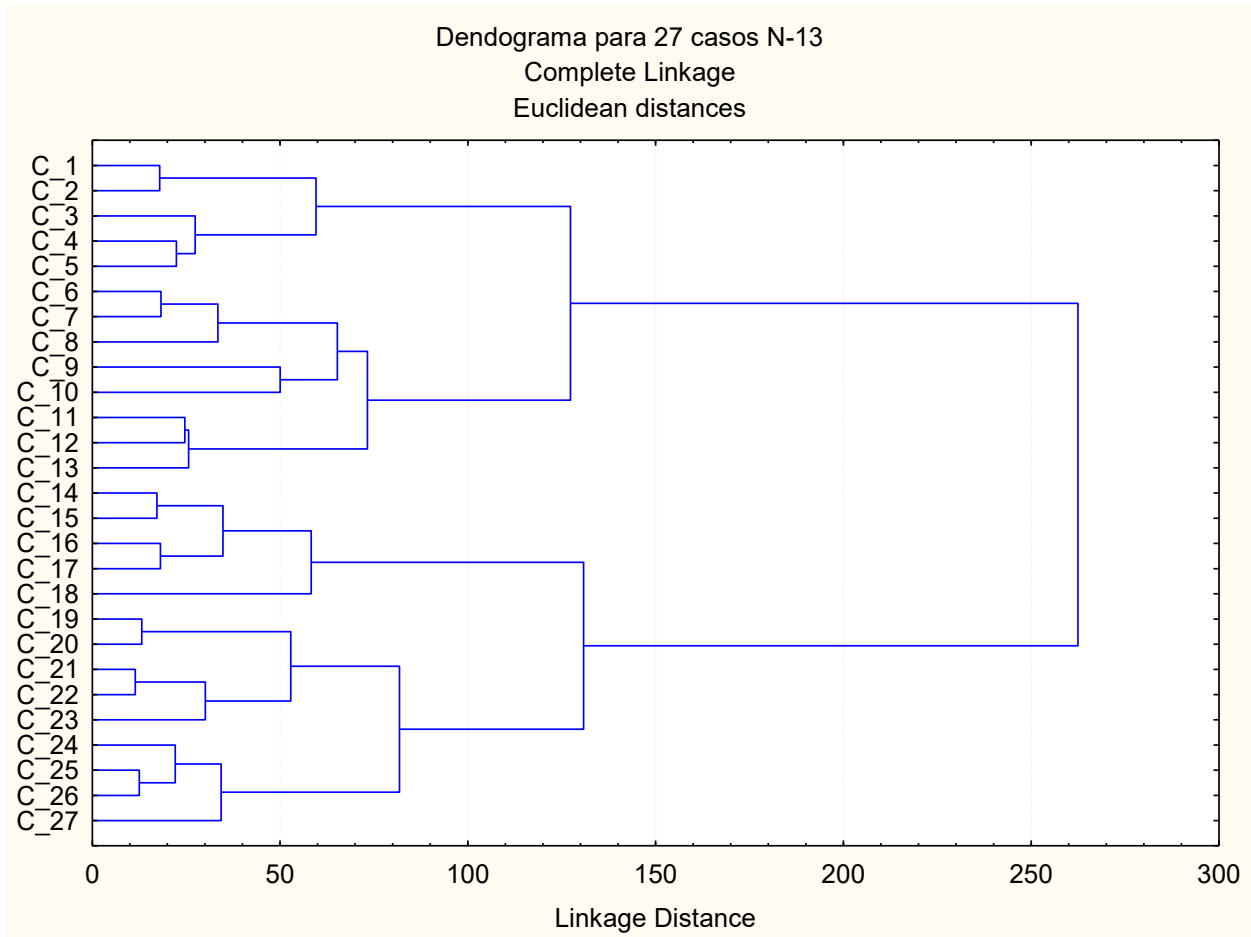


Figura 20: Dendrograma para 27 casos del N-13, tomando en cuenta los parámetros de mayor peso en los Factores 1 y 2.

En base a los grupos mostrados en el cluster de la Fig. 19, se calcularon los valores promedio de cada parámetro por grupo. En la Tabla 22 se dan los valores promedio de cada grupo, donde se observan 6 intervalos de profundidad con características texturales y químicas diferentes. Se incluye la relación terrígenos (arcillas + SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3) entre biógenos (CO_3 + CaO) como un parámetro más que permite de una manera rápida inferir el tipo de sedimento predominante. En la parte superficial del núcleo de 0 a 40 cm predominan los sedimentos de tipo carbonatado, en este intervalo se observan las concentraciones más altas de limos, C.O., CO_3 y CaO , presenta el valor más bajo en la relación Terrígenos/Biógenos. Estos datos sugieren que en estas profundidades una mayor abundancia de organismos. En profundidades entre 80 y 110 cm se presentan los valores más altos de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Cu . Si bien la relación Terrígenos/Biógenos está entre las más altas en este intervalo, el valor más alto de esta relación se presenta en el intervalo

120 a 140 debido a una concentración más baja de carbonatos. El alto valor de sedimentos de composición terrígena a profundidad entre 80 y 110 cm, sugiere que a partir de este intervalo se produjo la desviación en las descargas del Río Usumacinta, hace aproximadamente 1000 años de acuerdo a la gráfica de profundidad vs edad de la Figura 6, a partir de este momento el aporte de terrígenos disminuyó gradualmente. El intervalo localizado a mayor profundidad de 230 a 256 cm presenta los valores más altos de arcillas y de metales traza Zn, Ni, Cr, en esta época hace aproximadamente 1985 años, en la zona continental no había presas y el cauce del Río Usumacinta no se había desviado, por lo que las descargas eran más ricas en arcillas, esa época corresponde a un clima cálido y húmedo por lo que el nivel del mar estaba más alto. El barrido de arcillas a lo largo de una mayor columna de agua permite que estas atrapen los metales traza y produce un enriquecimiento de los mismos.

Intervalo (cm)	0-40	50-70	80-110	120-140	150-210	230-256
Arenas	0.30	0.18	0.14	0.27	0.23	0.05
Limos	60.80	58.41	57.61	57.40	58.01	55.63
Arcillas	38.90	41.41	42.25	42.33	41.76	44.32
CO ₃	29.19	20.46	17.91	15.58	21.37	20.63
C.O.	1.17	1.12	1.06	1.10	1.13	1.14
Al ₂ O ₃	13.97	14.09	14.35	14.22	14.15	14.27
SiO ₂	40.53	41.45	42.39	41.85	41.80	41.93
Fe ₂ O ₃	5.72	5.85	5.94	5.89	5.88	5.94
TiO ₂	0.60	0.62	0.64	0.63	0.65	0.64
MnO	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
CaO	11.58	11.30	11.09	11.09	11.53	10.99
MgO	3.44	3.38	3.54	3.40	3.41	3.47
Na ₂ O	1.92	1.68	1.80	1.84	1.56	1.67
K ₂ O	1.41	1.46	1.63	1.45	1.48	1.63
P ₂ O ₅	0.53	0.52	0.51	0.52	0.51	0.50
Cu	18.20	18.44	18.82	17.51	17.80	18.30
Zn	96.36	99.38	92.76	96.41	98.04	102.92
Ni	81.89	83.61	60.63	77.05	77.97	85.72
V	98.88	88.58	93.61	95.33	97.19	96.33
Cr	131.74	144.63	144.33	145.27	144.14	149.38
Pb	10.78	12.81	12.38	12.47	14.49	12.41
Cd	51.23	50.37	47.26	56.01	47.75	52.89
Terr/Biog	2.45	3.26	3.64	3.93	3.17	3.39

Tabla 21: Promedio de los parámetros en intervalos del N-13, de acuerdo al Cluster, construido en base a factores

5.1.2.2 Análisis Núcleo 22

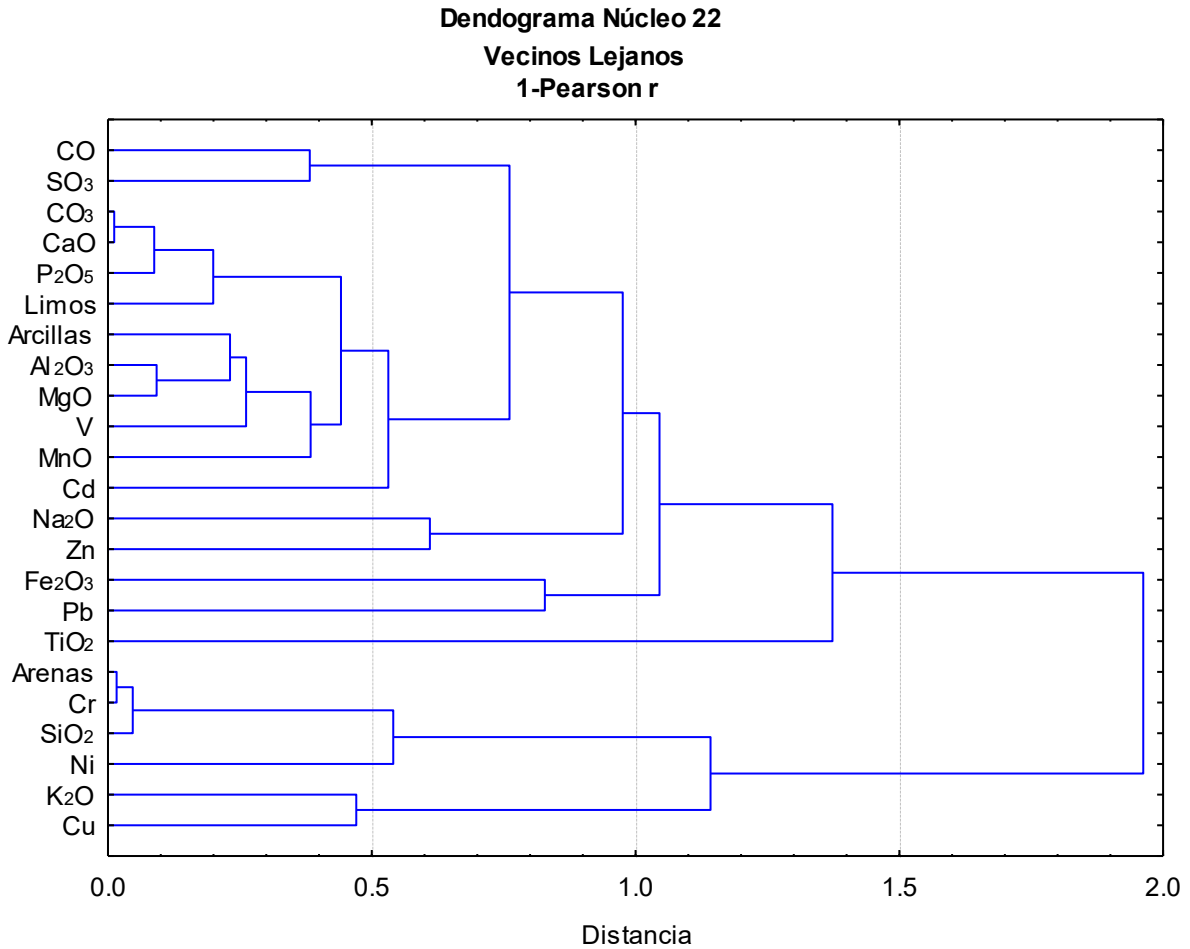


Figura 21: Dendograma para 23 casos del N-13, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r.

De acuerdo al análisis de cluster del Núcleo 22 (Fig. 14) se observa la presencia de dos grupos integrados de la siguiente manera: Cluster 1, en este grupo se observa la presencia de varios subgrupos: Subgrupo 1a, fuertemente asociados el CO₃, CaO y P₂O₅ que sugiere que se encuentra como fase carbonatada; subgrupo 1b, agrupados a distancias cercanas se presentan las arcillas, Al₂O₃, MgO y asociado a estos el MnO y el V; se presentan otros elementos en este grupo a mayores distancias, la composición de este grupo sugiere un origen terrígeno.

El segundo grupo asocia Arenas, Cr, SiO₂, K₂O, Ni y Cu estos elementos sugieren una asociación de cuarzo (SiO₂) en la fracción de Arenas. Además hay una distribución de los elementos traza (Cu, Ni y Cr) en las Arenas.

5.12.2.1 Rotación Varimax

Para determinar las variables más significativas que se encuentran en este núcleo, se aplicó la Rotación Varimax, para maximizar las varianzas y determinar las cargas asociados al N-22 y se observó la presencia de 3 factores. En la Tabla 23 se observan los parámetros que le dan peso a cada factor. El Factor 1 explica 48.61 % de la varianza, está constituido por la agrupación de parámetros en sentidos inversos, por un lado se agrupan las arenas con el SiO₂ y el Cr que sugiere la presencia de cuarzo en el sedimento. Por otro lado con un peso altamente significativo se tienen los CO₃ (0.976), el CaO (0.9557), el P₂O₅ (0.9294), y limos (0.919) estos parámetros sugieren la presencia de sedimentos carbonatados. Esto nos sugiere que la zona donde se encuentra el N-22, es una zona donde se presentan diferentes facies en la composición de los sedimentos.

Factor Loadings (Varimax raw) (N-22 Z Coast Tabasco)
Extraction: Principal Components

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Profundidad	-0.54798	-0.751189	-0.282417
% MO	0.46074	0.046495	0.688376
% CO₃	0.97634	-0.153081	0.024415
ARENAS	-0.94771	-0.061466	-0.19493
LIMOS	0.91908	-0.017901	-0.128715
ARCILLAS	0.86134	0.099085	0.354351
% SiO₂	-0.90933	-0.189928	-0.153919
% Al₂O₃	0.80007	0.269108	0.47066
% TiO₂	-0.12502	-0.879626	0.195626
% Fe₂O₃	0.08416	-0.04227	0.273454
% MnO	0.72658	0.385086	0.123493
% CaO	0.9557	-0.20214	-0.057838
% MgO	0.71922	0.227441	0.483287
% Na₂O	0.18172	0.015502	0.713022
% K₂O	-0.42378	0.279581	0.591457
% P₂O₅	0.92947	0.06381	-0.1533
% SO₃	0.56018	-0.553582	0.441899
ppm Cu	-0.11017	0.78299	0.403093
ppm Zn	0.4999	0.229948	0.252332
ppm Ni	-0.65287	0.475711	0.106795
ppm V	0.75936	0.320615	0.299187
ppm Cr	-0.93621	-0.142286	-0.273538
ppm Pb	0.5741	0.269709	-0.358461
ppm Cd	0.6377	0.027717	0.391297
Expl.Var	11.66682	3.206431	3.105268
Prp.Totl	0.48612	0.133601	0.129386

Tabla 22: Coeficientes para la Función Discriminante, N-22

El Factor 2 explica 13.36 % de la varianza, los parámetros que le dan peso a este factor son TiO₂, y Cu lo que sugiere su aporte está asociado a actividades antrópicas. El Factor 3 explica 12.93 % de la varianza y está asociado a la concentración de CO y Na₂O.

Con el objeto de poder visualizar las diferencias de composición a lo largo del núcleo que nos permitan inferir los diferentes procesos que se llevaron a cabo a través del tiempo, se realizó un análisis cluster de los diferentes intervalos de sedimento analizados que agruparan los intervalos con características similares.

En la Figura 20, se presenta el cluster que agrupa los intervalos con características similares; se observan tres grandes grupos (A, B y C) cada uno incluye la presencia de sub grupos. El primer grupo contiene dos subgrupos: A1, constituido por las muestras 1,3,4,2 y A2 constituido por las muestras 5,6,7,8 9,10,11 y 12. El segundo grupo B contiene tres subgrupos: B1 constituido por las muestras 14, 15, 16 y 17. El segundo subgrupo B2 constituido por las muestras 18, 19, 20, 21; y un tercer subgrupo B3 constituido por las muestras 22 y 23. Se observa un agrupamiento independiente (C), de las muestras 24, 25 y 26. Por ultimo separada de todas las demás muestras se encuentra la muestra 13. Se realizó un análisis de la composición de cada grupo vertido por el cluster, el promedio de las características de cada subgrupo se muestra en la Tabla 17. Se incluye la relación terrígenos (arcillas + SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3) entre biógenos (CO_3 + CaO) como un parámetro más que permite de una manera rápida inferir el tipo de sedimento predominante.

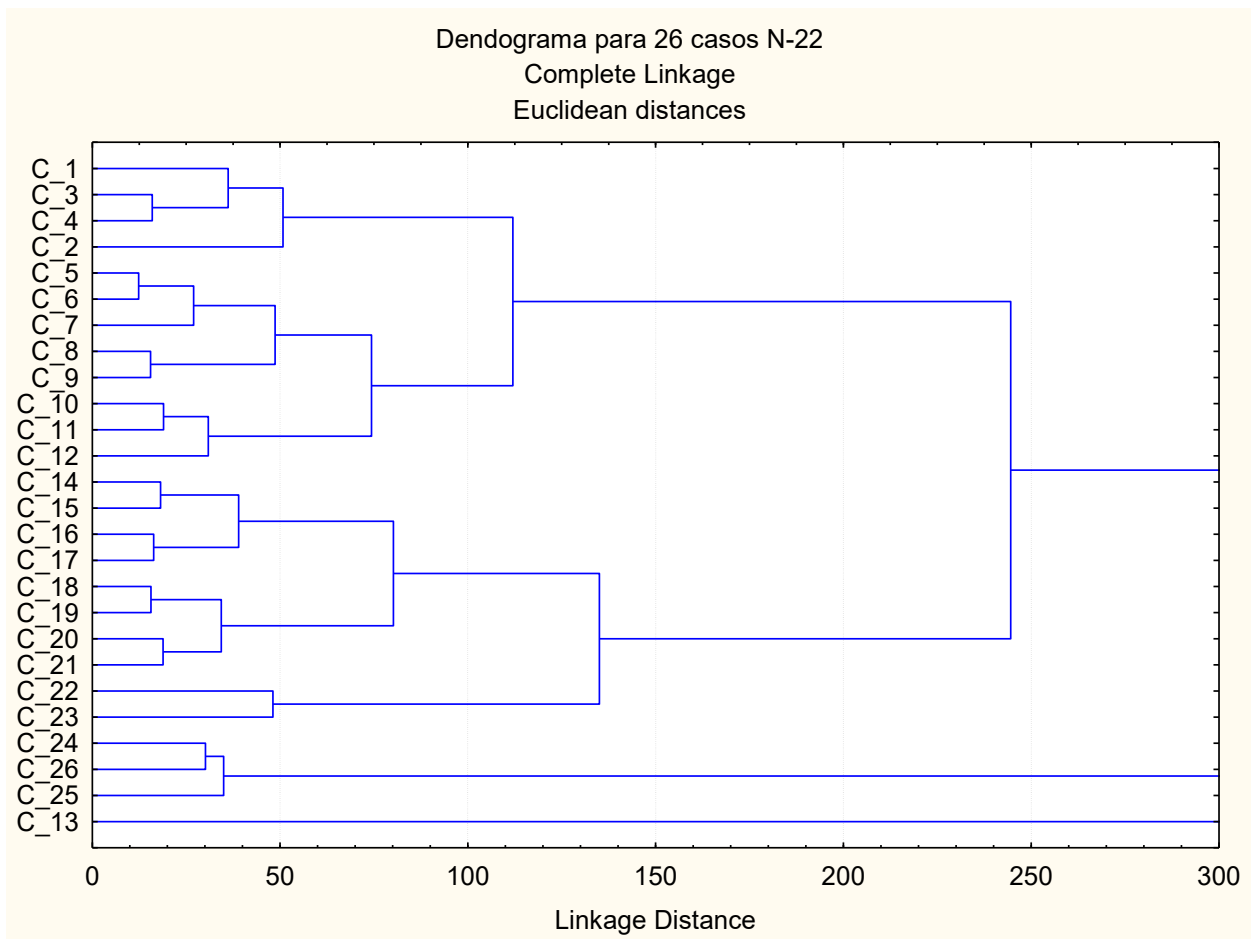


Figura 12: Dendograma para 26 casos del N-22, tomando en cuenta los parámetros de mayor peso en los Factores 1 y 2

En la Tabla 24 se observan 7 intervalos de profundidad con características texturales y químicas diferentes. En el intervalo de 0-30 cm se presentan los valores promedio más altos de elementos terrígenos Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 y de Cu, así como el valor más bajo de SiO_2 , arenas y Cd. Las concentraciones de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , presentan una disminución gradual desde la superficie.

En el intervalo de 40 a 110 cm se encuentran las concentraciones más altas de MgO y V. En el intervalo de 120 cm, se encuentra la concentración más alta de Arcillas, C.O. Na_2O , así como de Zn, Pb y Cd.

En el intervalo de 210 a 230 cm, predominan los sedimentos de tipo carbonatado, se observan las concentraciones más altas de Limos, CO_3 y CaO, y presenta el valor más bajo en la relación Terrígenos/Biogenos. Estos datos sugieren que en estas profundidades existe una mayor abundancia de organismos.

En las profundidades del núcleo, en el intervalo de 230 a 250 cm se encuentran las concentraciones más altas de Arenas, SiO₂, K₂O, además de los elementos traza Ni y Cr, que indican una asociación con actividades antrópicas. En este intervalo se presenta el valor más alto en la relación Terrígenos/Biogenos debido a una concentración más baja de carbonatos.

Intervalo (cm)	0-30	40-110	120	130-160	170-200	210-220	230-250
Arenas	0.34	0.61	0.42	0.33	2.27	8.74	45.48
Limos	61.02	60.68	57.64	57.80	61.69	62.81	44.85
Arcillas	38.64	38.72	41.95	41.80	36.04	28.46	9.67
CO₃	18.76	19.32	19.24	18.73	19.92	20.30	11.60
C.O.	1.12	1.26	1.65	1.27	0.92	0.87	0.59
Al₂O₃	14.33	14.09	14.17	14.00	13.27	12.44	10.90
SiO₂	43.27	43.34	43.46	44.75	44.43	46.90	56.25
Fe₂O₃	5.95	5.90	5.78	5.74	5.47	5.22	4.28
TiO₂	0.67	0.65	0.65	0.64	0.63	0.60	0.59
MnO	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05
CaO	10.71	10.97	10.70	10.46	11.62	12.19	6.17
MgO	3.30	3.36	3.22	3.29	3.12	3.08	2.79
Na₂O	1.58	1.79	1.90	1.65	1.53	1.37	1.48
K₂O	1.62	1.63	1.62	1.60	1.38	1.52	1.70
P₂O₅	0.50	0.49	0.49	0.47	0.51	0.50	0.38
Cu	16.09	14.99	11.69	12.11	6.60	9.21	12.97
Zn	78.48	83.83	85.26	82.95	78.37	67.70	65.07
Ni	77.48	79.04	75.70	74.98	68.38	50.33	101.52
V	104.33	105.52	105.01	93.29	99.24	84.95	74.79
Cr	139.39	144.80	142.20	152.46	166.08	213.24	374.57
Pb	13.08	12.09	13.97	8.07	13.22	12.43	7.88
Cd	55.81	54.62	64.31	59.47	56.58	41.63	34.78
Terr/Biog	3.49	3.39	3.54	3.66	3.16	2.88	4.59

Tabla 23: Promedio de los parámetros en intervalos del N-22, de acuerdo al Cluster, construido en base a factores

5.12.3 Núcleo 30

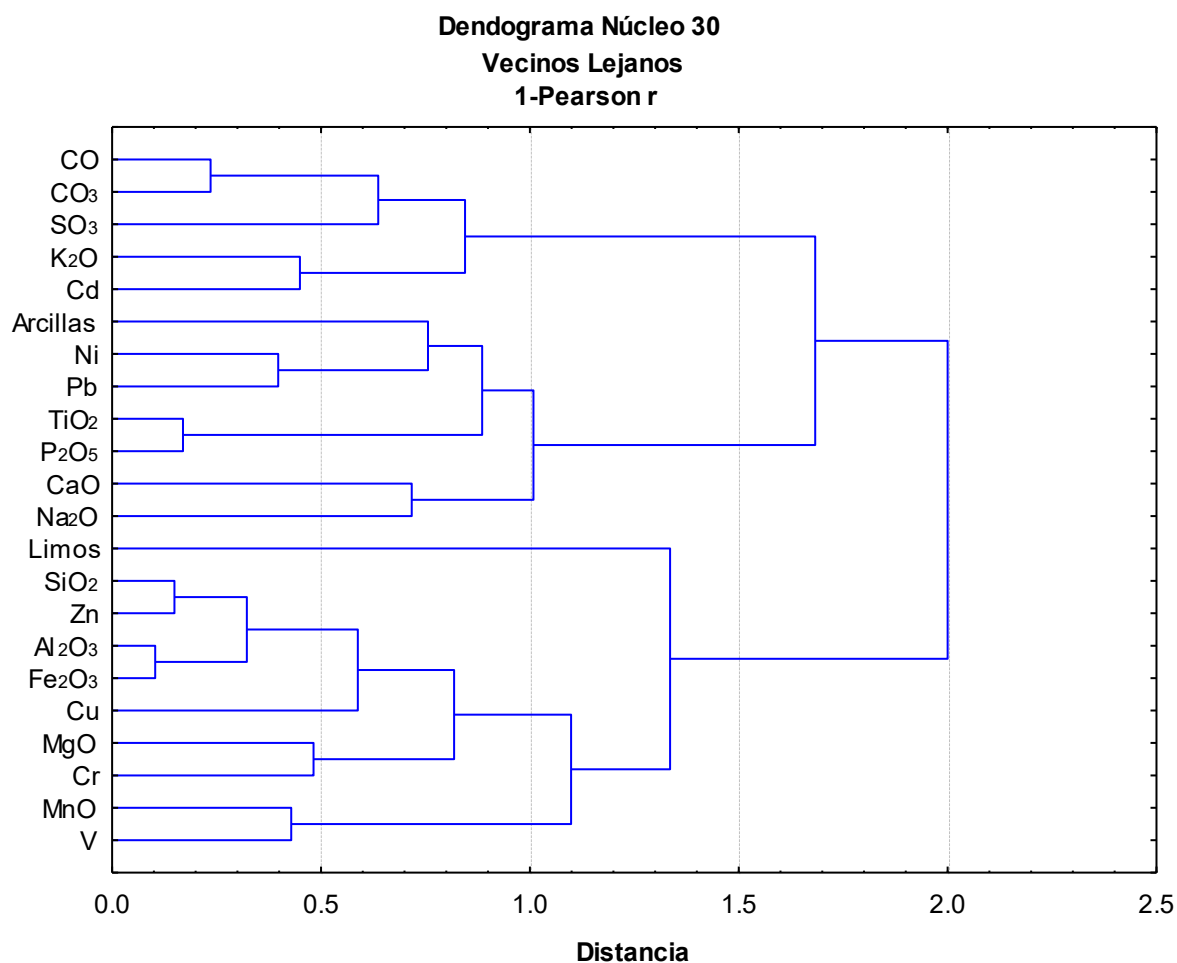


Figura 23: Dendograma para 22 casos del N-30, por el método de vecinos lejanos, utilizando 1-Pearson r

De acuerdo al análisis de cluster de los parámetros estudiados en el Núcleo 30 (Fig. 21) se observa la presencia de dos grupos integrados de la siguiente manera:

El primer grupo está conformado por CO, CO₃, SO₃, K₂O, Cd, Ni, Pb, TiO₂, CaO, P₂O₅, Arcillas y Na₂O (Fig. 15). La presencia en este grupo de C.O., CO₃, P₂O₅ y CaO sugiere su asociación a sedimentos carbonatados. Se observa una asociación de los elementos traza Cd, Ni y Pb a las Arcillas.

El segundo grupo asocia principalmente SiO_2 , Zn, Al_2O_3 , Fe_2O_3 y Cu, lo que sugiere un origen terrígeno en forma de silicoaluminatos, probablemente aportados por el río Usumacinta.

5.12.3.1 Rotación Varimax

Para determinar las variables más significativas que se encuentran en este núcleo, se aplicó la Rotación Varimax, para maximizar las varianzas y determinar las cargas asociados al N-30. En la Tabla 25 se observan los parámetros que le dan peso a cada factor. El Factor 1 explica 23.78 % de la varianza, los parámetros significativos son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, Cu, Zn y Cr, lo que sugieren un componente de sedimentos terrígenos a este factor.

Factor Loadings (Varimax raw) (N-30 Z Coast Tabasco)
Extraction: Principal Components

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Profundidad	-0.266825	0.878178	0.136362
% MO	-0.122312	0.309189	0.847553
% CO₃	-0.23758	0.576594	0.515201
LIMOS	-0.120423	0.204398	-0.906503
ARCILLAS	0.120423	-0.204398	0.906503
% SiO₂	0.84447	0.036673	0.098919
% Al₂O₃	0.923672	-0.282822	0.062917
% TiO₂	0.119579	-0.531371	0.135124
% Fe₂O₃	0.858998	-0.321636	0.087319
% MnO	0.509107	-0.407774	0.306827
% CaO	0.325983	-0.374752	0.061739
% MgO	0.599887	0.095499	0.088406
% Na₂O	0.393327	-0.180131	-0.14075
% K₂O	0.41724	0.401654	0.379033
% P₂O₅	0.006217	-0.758442	0.238864
% SO₃	-0.261222	0.782377	0.027151
ppm Cu	0.632693	0.135913	-0.323275
ppm Zn	0.885437	-0.119076	-0.034192
ppm Ni	-0.19527	-0.690484	0.178153
ppm V	0.292445	0.207365	0.410012
ppm Cr	0.634877	0.585696	0.027791
ppm Pb	0.377937	-0.701273	0.217903
ppm Cd	0.062063	0.511234	0.479171
Expl.Var	5.470181	5.095512	3.595919
Prp.Totl	0.237834	0.221544	0.156344

Tabla 24: Coeficientes para la Función Discriminante, N-30

El Factor 2 explica el 22.15 % de la varianza, los parámetros de peso son Pb, Ni, P₂O₅ y CO₃, los cuales coinciden con los parámetros asociados en el Grupo 2 del cluster de variables descrito en la Fig.15.

El Factor 3 explica 12.93 % de la varianza, los parámetros significativos son: CO, Limos y Arcillas.

Con el objeto de poder visualizar las diferencias de composición a lo largo del núcleo que nos permitan inferir los diferentes procesos que se llevaron a cabo a través del

tiempo, se realizó un análisis cluster de los diferentes intervalos de sedimento analizados que agruparan los intervalos con características similares. En la Figura 16, se presenta el cluster del N-30 donde se observa la presencia de cuatro grupos con características composicionales diferentes. En base a los grupos mostrados en el cluster de la Fig. 22, se calcularon los valores promedio de cada parámetro por grupo. En la Tabla 17 se dan los valores promedio de cada grupo.

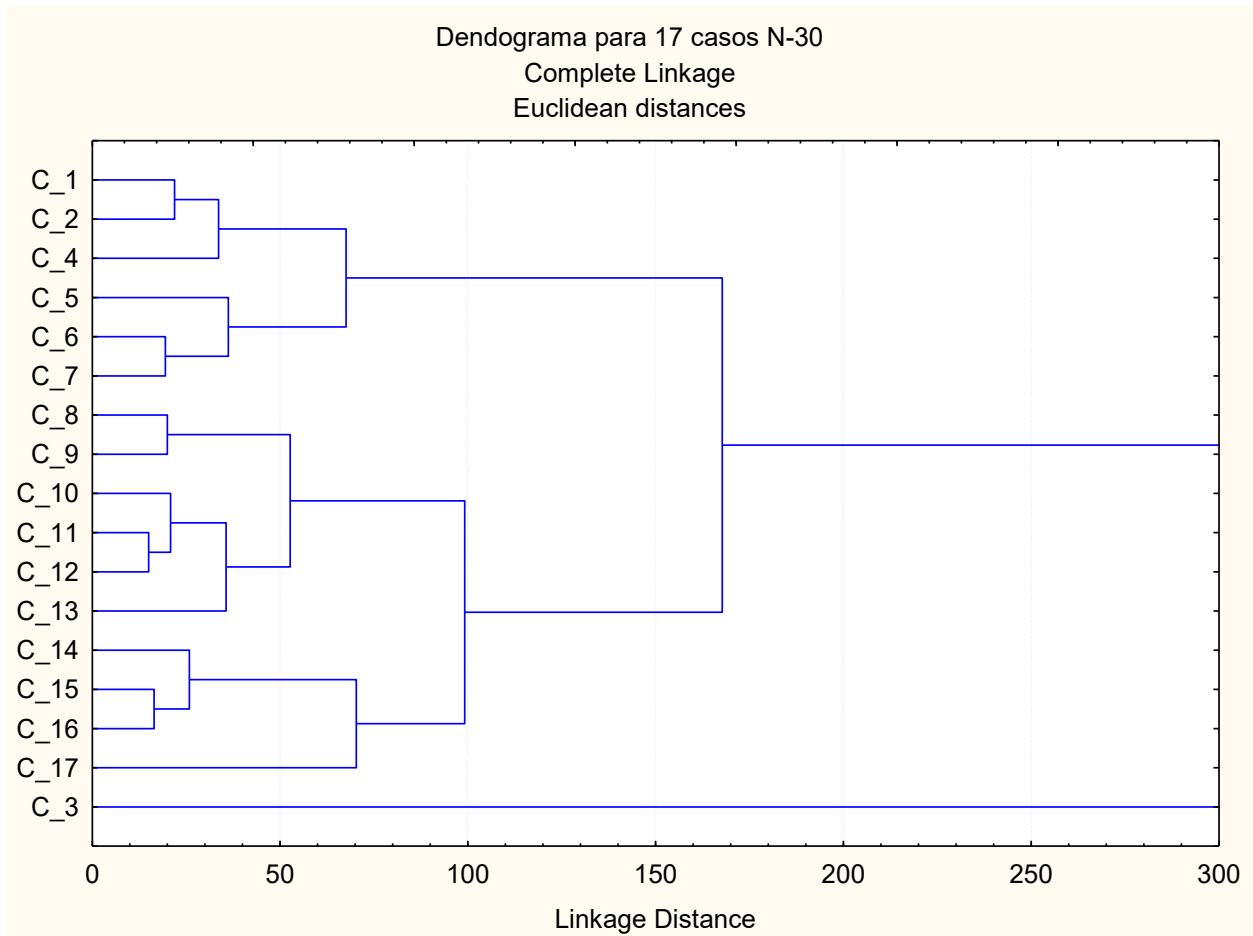


Figura 24: Dendrograma para 17 casos del N-30, tomando en cuenta los parámetros de mayor peso en los factores 1 y 2

En base a los grupos mostrados en el cluster de la Fig. 15, se calcularon los valores promedio de cada parámetro por grupo. En la Tabla 26 se dan los valores promedio de cada grupo.

Se observan 4 intervalos de profundidad (Fig. 22) con características texturales y químicas diferentes. Se incluye la relación terrígenos (arcillas + SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3) entre biógenos (CO_3 + CaO) como un parámetro más que permite de una manera rápida inferir el tipo de sedimento predominante.

En el intervalo de 0-30 cm predominan las concentraciones de Limos, Fe_2O_3 , P_2O_5 , Cu y Zn. Estos últimos probablemente estén asociados a actividades antrópicas. Es importante señalar que a partir de este punto, el Fe_2O_3 tiene una disminución gradual en la concentración en los próximos intervalos. En este intervalo se encuentra el valor más alto del índice de Terrígenos/Biógenos, por lo tanto la concentración más baja de carbonatos.

En el intervalo de 40 a 60 cm se encuentran las concentraciones más altas corresponden a Arcillas, C.O., Al_2O_3 , TiO_2 , MnO, MgO, Na_2O , K_2O , así como de Ni y V, que están asociados a actividades antrópicas.

En el intervalo de 70 a 120 cm, se observan las concentraciones más altas de SiO_2 , CO_3 y CaO , y presenta el valor más bajo en la relación Terrígenos/Biógenos. Estos datos sugieren que en estas profundidades existe una mayor abundancia de organismos.

En la parte final del núcleo, en el intervalo de 130 a 160 cm se encuentran las concentraciones más bajas de Zn, Ni y Pb que sugiere, corresponden a los valores base en la zona.

Los valores más altos de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 en comparación con el primer grupo del cluster a los 20 cm de profundidad sugieren una mayor descarga de terrígenos en esta etapa lo que lo diferencia en el Dendograma (Fig 22) del resto de grupos encontrados.

Intervalo	0-30*	40-60	70-120	130-160
Limos	63.99	58.55	61.88	62.48
Arcillas	36.01	41.45	38.13	37.52
CO₃	15.46	17.25	17.51	17.34
CO	0.90	1.06	1.04	1.04
SiO₂	45.33	45.39	45.54	44.83
Al₂O₃	14.88	14.98	14.43	14.48
TiO₂	0.70	0.71	0.69	0.69
Fe₂O₃	6.24	6.23	6.02	6.09
MnO	0.07	0.08	0.06	0.06
CaO	9.29	9.17	9.35	8.89
MgO	3.15	3.17	3.12	3.17
Na₂O	1.79	1.84	1.83	1.71
K₂O	1.76	1.84	1.84	1.84
P₂O₅	0.48	0.47	0.46	0.45
Cu	19.51	17.54	18.74	19.08
Zn	92.65	91.89	89.33	81.20
Ni	74.20	76.17	73.59	45.15
V	93.48	113.32	96.04	103.87
Cr	128.93	133.63	131.41	139.24
Pb	16.53	16.25	12.19	10.34
Cd	63.41	72.76	78.00	75.07
Terr/Biog	4.16	4.11	3.90	3.95

Tabla 25: Promedio de los parámetros en intervalos del N-30, de acuerdo al Cluster, construido en base a factores

Capítulo 6: CONCLUSIONES

1.- Se observó que en el N-13 hay una disminución en la presencia de terrígenos en la parte final del núcleo, correspondiente a un tiempo de aproximadamente 2000 años; esta podría estar asociada a la desviación del cauce del río Usumacinta, la cual produjo un decrecimiento en el aporte de sedimentos terrígenos a la zona costera.

2.- La textura predominante en los núcleos es del tipo limo-arcilloso, siendo su orden de abundancia N-30>N-22>N-13. Esto aparentemente asociado por su distancia a la costa. Esta composición textural sugiere la presencia de bajas condiciones de energía que permiten el depósito de sedimentos finos. En el N-30 no se encontraron arenas.

3.- El N-22, es el único en mostrar la presencia de arenas a partir de los 190 cm, hasta alcanzar un valor máximo de 51% a los 230 cm de profundidad, lo que sugiere que las condiciones de depósito de la parte inferior del núcleo fueron diferentes.

4.- Las condiciones del sitio de depósito de los 3 núcleos, se reflejan en los parámetros texturales. El N-13 presenta el valor más alto de Mz, correspondiente a sedimentos más finos, así como mayor simetría, lo que sugiere que son menores los cambios bruscos, estas características pueden estar asociadas a su localización más alejada de la costa, así como a su ubicación al pie de un promontorio que lo protege.

5.- La composición química de los núcleos y su comportamiento a lo largo del tiempo es considerablemente diferente. El N-30, el más cercano a la costa, muestra una mayor acumulación de terrígenos en la superficie, con una disminución gradual. Las concentraciones de carbonatos a lo largo del núcleo son relativamente constantes y más bajas con respecto a los otros núcleos estudiados. Únicamente el Zn y el Ni, muestran concentraciones promedio más altas en el N-30, en relación a los otros núcleos.

6.- El N-22 muestra concentraciones similares de sedimentos asociados a un origen terrígeno desde la superficie hasta los 200 cm; a partir de los 210 cm, muestra una disminución de Al_2O_3 . Los sedimentos localizados al fondo del núcleo, de los 240 a los 260 cm, muestran los valores más altos de arena y SiO_2 , que sugiere la presencia de cuarzo y valores más bajos de C.O., CO_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO, CaO, así como metales traza Zn, V, Pb y Cd

7.- El N-13, el más alejado de la costa, muestra los valores promedio más altos de CO_3 , que se pueden explicar por su cercanía a la zona carbonatada de Yucatán. En la superficie presenta valores más bajos de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 . Entre los 120 y los 140 cm, muestra una baja considerable en su concentración de carbonatos. Muestra los valores más altos de Cu, V, Pb y Cd.

8.-El Factor de Enriquecimiento, muestra que existe un enriquecimiento menor en el N-22 para el níquel y para el cromo. Los núcleos N-13 y N-30 no están enriquecidos en algún elemento.

9.- El índice de geo acumulación señala que los elementos traza estudiados no presentan contaminación. Únicamente el cromo muestra un índice de no contaminado a moderadamente contaminado y el níquel muestra un índice moderadamente contaminado, aunque se descarta que exista contaminación ambiental, por ser valores muy bajos.

Bibliografía

Arreguín, F., Rubio, H., Domínguez, R., De Luna, F. 2014. Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V, núm. 3.

Armstrong-Altrin J.S., Lee Y.I., Kasper-Zubillaga J.J., Carranza-Edwards A., Daniel García D., G. Eby N., Balaram V., Cruz-Ortiz N.L. 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico: Implication for provenance. Chem. Erde Geochem. 72, 345-362.

Carranza-Edwards A., Márquez-García A., Tapia-González Citlalli., Rosales-Hoz L., Alatorre-Mendieta M. 2015. Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 67, p.21-43.

Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L., Monreal-Gómez A. 1993. Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics. p. 257-269.

Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L., Santiago-Pérez S., 1996 A reconnaissance study of carbonates in Mexican beach sands: Sedimentary Geology. 101, pp 261-268.

Celis Hernández O. 2014. Evaluación Ambiental de la Porción Norte del SAV y Zona Marítima Adyacente de la Plataforma Continental Somera del Estado de Veracruz, México. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. pp. 143-145.

Celis-Hernández O., Rosales-Hoz L., Cundy Andrew B., Carranza-Edwards Arturo. 2017. Sedimentary heavy metal (loid) contamination in the Veracruz shelf, Gulf of Mexico: A baseline survey from a rapidly developing tropical coast. Marine Pollution Bulletin. p: 1-10.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2014. Estadísticas del Agua en México. CONAGUA. México. P.240

Contreras R.-E.; P. Douillet and J. Zavala-Hidalgo. 2014. Tidal dynamics of the Terminos Lagoon, Mexico: Observations and 3D numerical modelling. Ocean Dynamics. Vol. 64. pp.1349-1371.

Cuevas Madrid, H. 2017. Estudio Geoquímico Ambiental en núcleos de sedimentos del área de manglar de la isla del Carmen, Laguna de Términos. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. pp. 59-63; 99-102.

Del Aguila Juárez, Pedro; Lugo de la Fuente, Jorge; Vaca Paulín, Rocío Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma Ciencia Ergo Sum, vol. 12, núm. 2, julio-octubre, 2005, pp. 155-161

Diario Oficial de la Federación. La region hidrológica No.30 Grijalva-Usumacinta. Obtenido el 18 de Octubre de 2017 de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5141106&fecha=29/04/2010

García A., Soberón E., Cortés M. Guía de validación de métodos analíticos. Colegio Nacional de Químicos Farmacéuticos Biólogos México, A.C. 2002. pp.1-43.

Gobierno del estado de Tabasco. 2007. Obtenido el 28 de Mayo de 2018 de: <https://web.archive.org/web/20120509103248/http://www.tabasco.gob.mx/estado/geo-hidrografia.php>

Hernández Hernández H. Análisis Geoquímico de Sedimentos Adyacentes a la Desembocadura del Río Pánuco. 2005. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. pp.132-155.

Jensen J. R., Kjerfve B., Ramsey E.W., Magill K.E., Madeiros C., Sneed J. 1989. Remote Sensing and Numerical Modeling of Suspended Sediment in Laguna de Terminos, Campeche, Mexico. Elsevier Science Publishing Co. Inc. pp 33-44.

Loring D., and Rantala R., 1992. "Manual for the Geochemical Analyses of marine sediments and suspended particulate matter", Earth Sciences Review 32, 235-283.

Hernández-Santana J.R., Ortíz-Pérez M.A., Méndez-Linares A.P., Gama-Campillo L. 2007. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. ISSN 2448-7279.

Mapoteca Manuel Orozco y Berra. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido el 11 de Mayo de 2018 de: <http://w2.siap.sagarpa.gob.mx/mapoteca>

Nriagu Wiley J.O. 1980. Zinc in the environment Part I. Ecological cycling. Edited by J.O. Nriagu, Wiley. Pp. 453.

Núñez G., J. C., R. Ramos R., E. Barba M., A. Espinoza T., L. M. Gama C. 2016. Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. Investigaciones

Geográficas, núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 70-85, dx.doi.org/10.14350/rig.50172.

Ortiz P., M.A., C. Valverde, N.P. Psuty, and L. M. Mitre. 1990. The Lowlands of the Mexican Gulf Coast.

Páez-Osuna, F., Valdez-Lozano D., Alexander H., Fernández-Pérez H. 1987. Trace Metals in the fluvial System of Términos Lagoon, Mexico. Marine Pollution Bulletin. Volumen 18. Issue 6. pp. 294-297.

Paneer Selvam A., Laxmi Priya S., Banerjee K., Hariharan G., Purvaja R., Ramesh R. 2011. Heavy Metal Assessment Using Geochemical and Statistical Tools in the Surface Sediments of Vembanad Lake, Southwest Coast of India. Springer. Environmental Monitoring and Assessment. pp.1-17

Ramos Vázquez, M.A. 2016. Geoquímica de dos núcleos de mar profundo en el suroeste del Golfo de México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. pp. 47-53.

Ramos-Hernández J.G. 2008. CONAGUA. Plan Hídrico Integral de Tabasco. pp. 5

Riley J.P., Chester R., Introducción a la Química Marina. 1990. AGT Editor. pp. 323-379.

Rosales-Hoz L., Carranza-Edwards A., Martínez-Serrano R., Alatorre-Mendieta M. Martínez-Serrano R., Armstrong-Altrin J. 2014. Textural and Geochemical characteristics of marine sediments in the SW Gulf of Mexico: implications for source and seasonal change. Environmental Monitoring and Assessment. pp: 1-19.

Secretaría de Gobernación. 2016. Dirección General de Protección Civil. Boletín No. 12 de Alertamiento por Ciclón Tropical. Obtenido el 25 de Mayo de 2018 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/123230/19_TT-EARL_12_04082016.pdf

Skoog D.A. James; Holler F. James. Principios de análisis instrumental. 5ª. Edición. Ed. Mc-Graw-Hill. 1998. 219-239.

Schlumberger. Glosario Oilfield. 2018. Obtenido el 01 de Junio de 2108 de: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es.aspx>

Van Rijn L.C. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas (Part II). Department of Physical Geography. Universiteit Utrecht. Aqua Publications.

Villanueva S., Botello A. 1992. Metales Pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: Una revisión. p. 47-61

Villanueva S., Vázquez-Botello A. 2011. Vigilancia y Presencia de Metales Tóxicos en la Laguna El Yucateco, Tabasco, México. p. 407-430.

West R. C., Psuty N. P., Thom B.G. Las Tierras Bajas de Tabasco. 1985. Gobierno del estado de Tabasco. Pp. 15-122

Anexo1: Índice de Terrígenos

Índice de Terrígenos

Profundidad	N-13	N-22	N-30
0	0.643	0.644	1.032
10	0.649	0.644	0.988
20	0.646	0.643	1.015
30	0.645	0.640	1.040
40	0.646	0.643	1.026
50	0.641	0.641	1.030
60	0.643	0.643	1.025
70	0.645	0.640	1.041
80	0.642	0.639	1.017
90	0.645	0.641	1.031
100	0.643	0.641	1.016
110	0.644	0.640	1.039
120	0.646	0.647	1.007
130	0.642	0.645	1.008
140	0.643	0.647	1.023
150	0.644	0.646	1.039
160	0.639	0.646	1.003
170	0.641	0.646	
180	0.645	0.647	
190	0.642	0.642	
200	0.644	0.643	
210	0.646	0.639	
220	0.643	0.641	
230	0.640	0.654	
240	0.642	0.656	
250	0.645	0.657	
256	0.642		

Anexo 2: Tabla de correlaciones N-13

	% MO	% CO ₃	% Arenas	% Limos	% Arcillas	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% TiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% P ₂ O ₅	% SO ₃	ppm Cu	ppm Zn	ppm Ni	ppm V	ppm Cr	ppm Pb	ppm Cd
% MO		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.39	0.49	0.55	X	X	X	X
%CO ₃	X		X	X	X	X	X	X	X	X	0.53	X	-0.54	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% Arenas	X	X		0.81	-0.82	X	X	X	X	X	0.50	X	X	X	0.40	X	X	X	X	X	X	X	X
% Limos	X	X	0.81		-1.00	X	-0.51	X	-0.48	X	0.39	X	X	X	0.39	X	X	X	X	X	X	-0.54	X
% Arcillas	X	X	-0.82	-1.00		X	0.49	X	0.47	X	X	X	X	0.39	-0.40	X	X	X	X	X	X	0.53	X
% SiO ₂	X	X	X	X	X		0.72	0.58	0.75	X	X	0.48	X	0.50	-0.47	X	X	X	X	X	X	0.52	X
% Al ₂ O ₃	X	X	X	-0.51	0.49	0.72		0.47	0.86	X	X	0.55	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.39	X
% TiO ₂	X	X	X	X		0.58	0.47		0.66	X	X	X	-0.44	0.44	X	0.64	X	X	X	X	X	X	X
% Fe ₂ O ₃	X	X	X	-0.48	0.47	0.75	0.86	0.66		X	X	0.42	-0.40	0.52	X	0.40	X	X	X	X	X	0.46	X
% MnO	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% CaO	X	0.53	0.50	0.39	X	X	X	X	X	X		X	X	-0.51	0.47	X	X	X	X	X	X	-0.38	X
% MgO	X	X	X	X	X	0.48	0.55	X	0.42	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% Na ₂ O	X	-0.54	X	X	X	X	X	-0.44	-0.40	X	X	X		X	X	X	0.61	X	X	X	X	X	X
% K ₂ O	X	X	X	X	0.39	0.50	X	0.44	0.52	X	-0.51	X	X		-0.42	X	X	X	X	X	X	0.54	X
% P ₂ O ₅	X	X	0.40	0.39	-0.40	-0.47	X	X	X	X	0.47	X	X	-0.42		X	X	X	X	X	X	X	X
%SO ₃	X	X	X	X	X	X	X	0.64	0.40	X	X	X	X	X	X		-0.42	X	X	X	X	0.41	X
ppm Cu	-0.39	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.61	X	X	-0.42		X	X	X	X	X	X
ppm Zn	0.49	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	0.64	X
ppm Ni	0.55	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.41		X	X	X	X
ppm V	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
ppm Cr	X	X	X	-0.54	0.53	0.52	0.39	x	0.46	X	-0.38	X	X	0.54	X	X	X	0.64	X	X		X	X

Anexo 3: Tabla de correlaciones N-22

	% MO	% CO ₃	% Arenas	% Limos	% Arcillas	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% TiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% P ₂ O ₅	% SO ₃	ppm Cu	ppm Zn	ppm Ni	ppm V	ppm Cr	ppm Pb	ppm Cd
% MO		X	-0.65	X	0.65	-0.56	0.71	X	0.68	X	X	0.70	X	X	X	0.48	0.39	0.60	X	0.57	-0.75	X	0.45
%CO ₃	X		X	0.56	X	X	X	X	X	X	0.94	X	X	-0.56	0.76	0.39	X	X	-0.58	X	X	0.65	X
% Arenas	-0.65	X		X	-0.86	0.64	-0.60	X	-0.59	-0.39	X	-0.54	X	X	X	X	X	-0.66	X	X	0.54	X	-0.56
% Limos	X	0.56	X		X	X	X	X	X	0.45	0.64	X	X	-0.45	0.54	X	X	X	-0.53	0.51	X	X	X
% Arcillas	0.65	X	-0.86	X		-0.46	0.45	X	0.50	X	X	0.44	0.41	X	X	X	X	0.54	X	X	X	X	0.58
% SiO ₂	-0.56	X	0.64	X	-0.46		-0.55	0.53	-0.63	-0.61	X	-0.65	X	X	X	X	0.57	0.69	X	-0.61	0.64	-0.44	-0.54
% Al ₂ O ₃	0.71	X	-0.60	X	0.45	-0.55		-0.44	0.92	0.62	X	0.67	X	X	X	X	0.63	0.61	X	0.75	-0.92	X	0.43
% TiO ₂	X	X	X	X	X	0.53	-0.44		X	X	X	X	X	X	X	0.39	-0.76	-0.53	X	X	0.47	X	X
% Fe ₂ O ₃	0.68	X	-0.59	X	0.50	-0.63	0.92	X		0.73	X	0.68	0.49	X	X	X	0.56	0.60	X	0.80	-0.88	X	0.48
% MnO	X	X	-0.39	0.45	X	-0.61	0.62	X	0.73		X	0.53	X	X	0.49	X	0.42	0.44	X	0.63	-0.68	0.50	X
% CaO	X	0.94	X	0.64	X	X	X	X	X	X		X	X	-0.58	0.74	X	X	X	-0.61	X	X	0.56	X
% MgO	0.70	X	-0.54	X	0.44	-0.65	0.67	X	0.68	0.53	X		X	X	X	X	0.56	0.45	X	0.59	-0.62	X	0.39
% Na ₂ O	X	X	X	X	0.41	X	X	X	0.49	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% K ₂ O	X	-0.56	X	-0.45	X	X	X	X	X	X	-0.58	X	X		-0.58	X	X	X	0.44	X	X	X	X
% P ₂ O ₅	X	0.76	X	0.54	X	X	X	X	X	0.49	0.74	X	X	-0.58		X	X	X	X	X	X	0.77	X
%SO ₃	0.48	0.39	X	X	X	X	X	0.39	X	X	X	X	X	X	X		-0.39	X	-0.53	X	X	X	X
ppm Cu	0.39	X	X	X	X	-0.57	0.63	-0.76	0.56	0.42	X	0.56	X	X	X	-0.39		0.49	0.55	X	-0.60	X	X
ppm Zn	0.60	X	-0.66	X	0.54	-0.69	0.61	-0.53	0.60	0.44	X	0.45	X	X	X	X	0.49		X	0.51	-0.59	X	0.50
ppm Ni	X	-0.58	X	-0.53	X	X	X	X	X	X	-0.61	X	X	0.44	X	-0.53	0.55	X		X	x	X	X
ppm V	0.57	X	X	0.51	X	-0.61	0.75	X	0.80	0.63	X	0.59	X	X	X	X	X	0.51	X		-0.81	X	X
ppm Cr	-0.75	X	0.54	X	X	0.64	-0.92	0.47	-0.88	-0.68	X	-0.62	X	X	X	X	0.60	-0.59	X	-0.81		X	-0.41
ppm Pb	X	0.65	X	X	X	-0.44	X	X	X	0.50	0.56	X	X	X	0.77	X	X	X	X	X	X		X
ppm Cd	0.45	X	-0.56	X	0.58	-0.54	0.43	X	0.48	X	X	0.39	X	x	x	X	X	0.50	X	X	-0.41	X	

Anexo 4: Tabla de correlaciones N-30

	% MO	% CO ₃	% Limos	% Arcillas	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% TiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% P ₂ O ₅	% SO ₃	ppm Cu	ppm Zn	ppm Ni	ppm V	ppm Cr	ppm Pb	ppm Cd
% MO		0.61	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
%CO ₃	0.61		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.62	X	X	X	X	X
% Limos	X	X		-1.00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% Arcillas	X	X	-1.00		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% SiO ₂	X	X	X	X		0.54	X	0.51	X	X	X	X	0.53	X	X	X	X	0.49	X	X	X	X
% Al ₂ O ₃	X	X	X	X	0.54		X	0.90	0.71	X	0.50	X	X	X	-0.59	0.55	0.75	X	X	X	0.63	X
% TiO ₂	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% Fe ₂ O ₃	X	X	X	X	0.51	0.90	X		0.67	X	0.68	X	X	X	X	0.54	0.83	X	X	X	0.54	X
% MnO	X	X	X	X	X	0.71	X	0.67		X	X	X	X	X	X	X	0.65	X	X	X	0.57	X
% CaO	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	0.53	X	X	X	X	X	X	X	X
% MgO	X	X	X	X	X	0.50	X	0.68	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	0.63	X	X
% Na ₂ O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
% K ₂ O	X	X	X	X	0.53	X	X	X	X	X	X	X		X	X	0.64	X	X	X	X	X	0.53
% P ₂ O ₅	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.53	X	X	X		-0.52	X	X	X	X	X	0.50	X
% SO ₃	X	X	X	X	X	-0.59	X	X	X	X	X	X	X	-0.52		X	X	X	X	X	-0.65	0.54
ppm Cu	X	X	X	X	X	0.55	X	0.54	X	X	X	X	0.64	X	X		0.64	X	X	X	X	X
ppm Zn	X	-0.62	X	X	X	0.75	X	0.83	0.65	X	X	X	X	X	X	0.64		X	X	X	0.57	X
ppm Ni	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	0.60	X
ppm V	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		0.53	X	0.49
ppm Cr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.63	X	X	X	X	X	X	X	0.53		X	X
ppm Pb	X	X	X	X	X	0.63	X	0.54	0.57	X	X	X	X	0.50	-0.65	X	0.57	0.60	X	X		X
ppm Cd	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.53	X	0.54	X	X	X	0.49	X	X	