



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
UNAM**

**ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DE ARENAS DE PLAYAS DE LA  
PROVINCIA DE SOTAVENTO EN EL SUR DEL GOLFO DE  
MÉXICO.**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS**  
(GEOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:  
**INGRID FACIO LINCE TÉLLEZ**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**COMITÉ TUTOR:**  
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
DR. RAYMUNDO GERARDO MARTÍNEZ SERRANO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**CD. MX., OCTUBRE, 2019**



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.



**ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DE ARENAS DE PLAYAS DE LA  
PROVINCIA DE SOTAVENTO EN EL SUR DEL GOLFO DE  
MÉXICO.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS**  
(GEOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:  
**INGRID FACIO LINCE TÉLLEZ**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**COMITÉ TUTOR:**  
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. ANTONIO ZOÍLO MÁRQUEZ GARCÍA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
DR. RAYMUNDO GERARDO MARTÍNEZ SERRANO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE, 2019**

## AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México por ser el lugar en donde adquirí los conocimientos necesarios para seguir ejerciendo mi profesión de la mejor manera.

Al apoyo recibido por medio de la beca CONACYT 893673 (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por permitir dedicarme a la investigación.

Al Dr. Arturo Carranza Edwards, tutor principal, que siempre generó en mí nuevas preguntas y discusiones que me fueron llevando por el camino de la investigación y de la profundización de los temas de la tesis.

Al Dr. Raúl Aguirre Gómez, Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta, Dr. Antonio Zoilo Márquez García y al Dr. Raymundo Gerardo Martínez Serrano, quienes hacen parte del Jurado de Examen de Grado, por siempre estar atentos a mis avances y cuestionamientos en cada área del conocimiento.

Al personal académico, técnico y administrativo, especialmente a M. C. Eduardo Alfredo Morales de la Garza y a Ricardo Martínez Domínguez que siempre estaban dispuestos a brindarme su apoyo y ayuda en el Laboratorio de Sedimentología.

Al Laboratorio Ultra limpio e ICP-MS y a la M. C. Ofelia Pérez Arvizu por la preparación y medición de las muestras de análisis geoquímicos y a Q. F. B. Susana Santiago Pérez por su explicación y colaboración en el análisis de materia orgánica de las muestras.

Siempre he contado con una significativa red de apoyo, que son mi faro en muchos aspectos personales y académicos, por eso quiero agradecer los sabios consejos, enseñanzas, experiencias y emociones, a mis padres: Luis Fernando e Ingrid, a Máriam y Luis, a Papi Jaime, a Rodri, a mis amigas siempre llenas de amor: Sandra, Diana, Dana, Paola y Adriana, a mis amigos y colegas geólogos de la Universidad Nacional de

Colombia, a mis profesores de Geología de la Universidad Nacional de Colombia, que siempre me infundieron ese amor infinito por la investigación de este fantástico planeta.

A la Geología, por permitirme recorrer y explorar lugares recónditos y maravillosos, que siempre dejaran en mí enseñanzas excepcionales.

## ÍNDICE GENERAL

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 2. ANTECEDENTES.....  | 5  |
| 3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....                              | 7  |
| 4. HIPÓTESIS.....   | 8  |
| 5. OBJETIVOS.....   | 8  |
| 5.1 General.....  | 8  |
| 5.2 Específicos .....   | 8  |
| 6. ÁREA DE ESTUDIO.....   | 10 |
| 6.1 Localización.....   | 10 |
| 6.2 Factores endógenos.....                                       | 11 |
| 6.2.1 Hidrografía y relieve .....                                 | 11 |
| 6.2.2 Geología .....  | 16 |
| 6.3 Factores exógenos.....  | 19 |
| 6.3.1 Clima .....   | 19 |
| 6.3.2 Corrientes, oleaje, marea y viento.....                     | 21 |
| 6.4 Factores antrópicos .....                                     | 25 |
| 6.4.1 Represamiento de ríos y otras obras de infraestructura..... | 25 |
| 7. METODOLOGÍA .....  | 27 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 8.  | RESULTADOS.....   | 34  |
| 8.1 | Perfiles de playa.....  | 34  |
| 8.2 | Parámetros texturales.....  | 41  |
| 8.3 | Composición de las arenas de playa .....                                  | 47  |
| 8.4 | Geoquímica de elementos mayores .....                                     | 54  |
| 8.5 | Geoquímica de elementos traza .....                                       | 60  |
| 8.6 | Geoquímica de tierras raras .....   | 66  |
| 9.  | DISCUSIÓN GENERAL.....  | 74  |
| 9.1 | Perfiles de playa.....  | 74  |
| 9.2 | Parámetros texturales.....  | 76  |
| 9.3 | Composición de las arenas de playa .....                                  | 77  |
| 9.4 | Geoquímica de elementos mayores .....                                     | 86  |
| 9.5 | Geoquímica de elementos traza .....                                       | 89  |
| 9.6 | Geoquímica de tierras raras .....   | 90  |
| 9.7 | Correlación entre parámetros texturales, petrográficos y geoquímicos..... | 92  |
| 10. | CONCLUSIONES.....   | 95  |
| 11. | LITERATURA CITADA.....  | 99  |
| 12. | ANEXO I.....  | 104 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en el Golfo de México.....   | 2  |
| Figura 2. Mapa de localización de playas estudiadas. Playas de occidente a oriente: 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6 Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóbata: 20 m. ....  | 10 |
| Figura 3. Localización de la desembocadura del río Tonalá, lagunas costeras del estado de Tabasco y playas de estudio. 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6. Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóbata: 20 m. ....   | 12 |
| Figura 4. Localización de la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro, y playas de estudio. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóbata: 20 m. ....  | 14 |
| Figura 5. Mapa de hidrología y relieve de las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta y Tonalá. Playas de estudio: 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6. Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)).....  | 15 |
| Figura 6. Mapa geológico del área de influencia de los sedimentos de playa, con las unidades litológicas más extensas y la localización del volcán Chichonal (modificado de la Carta Geológica de la República Mexicana, Instituto de Geología-UNAM, 2007). Unidades litológicas: Qho: depósitos recientes, de origen aluvial, eólico, litoral, palustre y lacustre. V A-A: rocas volcánicas de composición andesítica. T Ar: areniscas de grano fino a grueso. |    |

K: Rocas calcáreas (packstone y wackstone). CM: Complejo ígneo metamórfico del basamento de la Sierra de Chiapas y Guatemala..... 17

Figura 7. Geología del litoral del área de estudio. Unidades litológicas: Qhoal (aluvión), Qhoeo (eólico), Qholi (litoral), Qhopa (palustre), Qhola (lacustre). Modificado de carta geológico-minera Frontera E-15 (SGM, 2003). Batimetría de Uchupi (1967). Isóbata: 20 m. .... 18

Figura 8. Temporada de huracanes en el año 1981. Tomado de NOAA-Historical Hurricane Tracks. .... 20

Figura 9. Trayectoria de la tormenta tropical Hermine en 1980 y su paso por la costa del estado de Campeche. Tomado de NOAA-Historical Hurricane Tracks..... 21

Figura 10. Mapa de velocidad de corrientes litorales en playas de Tabasco y Campeche. Isóbata: 20 m. (Carranza-Edwards, A. Datos de campo 24 – 29 de mayo de 1981)...... 23

Figura 11 (A-F). Marea diaria del 24 al 29 de mayo de 1981 en las playas de Tabasco y Campeche. Modificado de: Mar V1.0 (Versión 1) “software”. Predicciones de mareas en México. CICESE, 2011. .... 24

Figura 12. Mapa de localización de las presas en el río Grijalva, las cuales han modificado la dinámica y régimen del río. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001). .... 26

Figura 13. Esquema de perfil de playa. El muestreo de las 13 playas de Tabasco y una Campeche se obtuvo en las zonas denominadas infraplaya, mesoplaya y supraplaya. A: plataforma continental. B: infraplaya. C: mesoplaya. D: supraplaya. E: dominio terrestre. I: olas simétricas sin influencia en el fondo. II: olas simétricas con influencia en el fondo. III: olas asimétricas con influencia en el fondo. IV: zona de rompientes. V: zona de barrido. VI: zona de vaivén. a: piso liso sin rizaduras. b: rizaduras simétricas. c: rizaduras asimétricas. d:

|  |    |
|--|----|
| barras y canales. e: frente de playa. f: cresta de berma. g: berma. h: escalón de playa. i: berma de tormentas. j: dunas (tomado de Carranza-Edwards, et al., 1994). .....   | 27 |
| Figura 14. Playas 1 a 4. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 36 |
| Figura 15. Playas 5 a 8. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 38 |
| Figura 16. Playas 9 y 10. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....   | 39 |
| Figura 17. Playas 11 y 12. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 40 |
| Figura 18. Playas 13 y 14. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 41 |
| Figura 19. Tamaño de partículas ( $Mz\phi$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....   | 42 |
| Figura 20. Desviación media gráfica inclusiva ( $\sigma_I\phi$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....   | 43 |
| Figura 21. Asimetría ( $SK_i$ ) de arenas de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 45 |
| Figura 22. Curtosis ( $K_G$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.....  | 46 |
| Figura 23. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A: playa Campechito (14-S) (LPP). B: playa Campechito (14-S) (XPL). C: playa El Limón (6-I) (XPL). D: playa El Limón (6-I) (LPP). MP: minerales pesados. Hbl: Hornblenda. Zrn: Zircón. Qz: cuarzo. |    |

Mnz: Monazita. Fsp: feldespato potásico. Cb: carbonato. Pl: plagioclasa. Ls: fragmento lítico sedimentario. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados. .... 51

Figura 24. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A, C: playa Pailebot (6-I) (XPL). B, D: playa Pailebot (6-I) (LPP). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Pl: plagioclasa. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lv: fragmento lítico volcánico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados. .... 52

Figura 25. Láminas delgadas de arenas de playa. A: playa Tonalá (1-S) (XPL). B: playa Tonalá (1-S) (LPP). C: playa El Bosque (11-I) (LPP). D: playa El Bosque (11-I) (XPL). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lm: fragmento lítico metamórfico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados. .... 53

Figura 26. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A: playa La Estrella (12-M) (XPL). B: La Estrella (12-M) (LPP). C: playa Boquerón (13-M) (XPL). D: playa Boquerón (13-I) (XPL). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Fsp: feldespato potásico. Glt: Glauconita. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lm: fragmento lítico metamórfico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados. .... 54

Figura 27. Normalización de elementos mayores de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. .... 57

Figura 28. Normalización de elementos mayores de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. .... 59

Figura 29. Normalización de elementos mayores de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. .... 60

|  |    |
|--|----|
| Figura 30. Normalización de elementos traza de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....   | 64 |
| Figura 31. Normalización de elementos traza de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....  | 65 |
| Figura 32. Normalización de elementos traza de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....   | 66 |
| Figura 33. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....                         | 70 |
| Figura 34. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....                          | 71 |
| Figura 35. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés. ....                         | 72 |
| Figura 36. Fotografía de trinchera excavada en la playa Campechito (14), cerca de la supraplaya se observa el horizonte de arenas negras en el que hay minerales pesados. Se aprecia el efecto erosivo que deja ver el horizonte oscuro. Fotografía tomada por Arturo Carranza Edwards. .... | 75 |
| Figura 37. Desviación media gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ ) y tamaño de partículas ( $Mz\phi$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. ....  | 77 |

Figura 38. Porcentaje de sedimentos terrígenos y biógenos de los sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya..... 78

Figura 39. A- Diagrama Qt-Ft-Lt de los sedimentos de las 14 playas en estudio en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. B- Diagrama Qt-Ft-Lt del promedio y la desviación estándar de las 42 muestras de sedimentos. Qt: cuarzo total; Ft: feldespatos totales; Lt: fragmentos líticos totales; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya..... 79

Figura 40. A- Diagrama Qt-Ft-Lt de infraplaya. B- Diagrama Qt-Ft-Lt de mesoplaya. C- Diagrama Qt-Ft-Lt de supraplaya. D- Diagrama Qt-Ft-Lt del promedio y la desviación estándar de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Qt: cuarzo total; Ft: feldespatos totales; Lt: fragmentos líticos totales; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya; 1. Tonalá; 2. Pailebot; 3. Santa Ana; 4. Macayo; 5. Pajonal; 6. Playa Azul; 7. El Limón; 8. Emiliano Zapata; 9. Miramar; 10. Carrillo Puerto; 11. El Bosque; 12. La Estrella; 13. Boquerón; 14. Campechito..... 81

Figura 41. A- Diagrama Lv,Ls,Lm-Lp de los sedimentos de las 14 playas de estudio en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. B- Diagrama Lv,Ls,Lm-Lp del promedio y la desviación estándar de las 42 muestras de sedimentos. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya. Los Lp son escasos pues se les observa principalmente en arenas gruesas o muy gruesas..... 82

Figura 42. A- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en infraplaya. B- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en mesoplaya. C- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en supraplaya. D- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos del promedio y la desviación estándar en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya; 1. Tonalá; 2. Pailebot; 3. Santa Ana; 4. Macayo; 5. Pajonal; 6. Playa Azul; 7. El Limón; 8. Emiliano Zapata; 9. Miramar; 10. Carrillo Puerto; 11. El Bosque; 12. La Estrella; 13. Boquerón; 14. Campechito..... 83

Figura 43. Porcentaje de minerales pesados en los sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya, valores relacionados con la Tabla 7. .... 84

Figura 44. Distribución de Qt-Ft-Lt en el litoral del área estudiada en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Qt: cuarzo total; Ft: feldespatos totales; Lt: fragmentos líticos totales. .... 85

Figura 45. Distribución de Lv,Ls,Lm-Lp en el litoral del área estudiada en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos. .. 86

Figura 46. Diagrama de madurez composicional de sedimentos (Herron, 1988). .... 89

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.- Playas de muestreo de los estados de Tabasco y Campeche en el Golfo de México.....   | 11 |
| Tabla 2.- Parámetros oceanográficos playas de Tabasco y Campeche. (Carranza-Edwards, A. Datos de campo 24 – 29 de mayo de 1981).....   | 22 |
| Tabla 3.- Escala de tamaño de partículas de Wentworth.....   | 29 |
| Tabla 4.- Pendiente de los perfiles de playa.....  | 34 |
| Tabla 5.- Parámetros texturales de los sedimentos en infraplaya (I), mesoplaya (M) y supraplaya (S) de 14 playas de los estados de Tabasco y Campeche. $Mz\phi$ : tamaño de partícula. $\sigma_1\phi$ : desviación media gráfica inclusiva. $Ski$ : Asimetría. $K_G$ : Curtosis. M.A: Muy asimétrico. A: Asimétrico..... | 44 |
| Tabla 6.- Porcentaje de sedimentos terrígenos y biógenos.....  | 47 |
| Tabla 7.-Composición de las arenas de playa.....   | 49 |
| Tabla 8.- Concentración de elementos mayores en peso % de las arenas de playas en Tabasco y Campeche. SUMAT = sumatoria total, PPC = pérdida por calcinación. ....   | 55 |
| Tabla 9.- Concentración de elementos traza en partes por millón (ppm) de arenas en las playas de Tabasco y Campeche. ....  | 61 |
| Tabla 10.- Concentración de elementos de tierras raras en partes por millón (ppm) de arenas en las playas de Tabasco y Campeche.....   | 67 |

## RESUMEN

El estudio sedimentológico de arenas del ambiente playa de los estados de Tabasco y Campeche, se realiza a través del análisis textural, composicional y geoquímico de las muestras de arena colectadas del 24 al 29 de mayo de 1981 en la costa de Sotavento.

La zona de estudio está localizada en el Golfo de México, comprendida entre las coordenadas 18.2°N, 94.1°O, 18.7°N y 92.4°O, en los estados de Tabasco y Campeche, entre el río Tonalá al occidente y la playa Campechito al oriente. El muestreo se obtuvo de infraplaya, mesoplaya y supraplaya de las playas: Tonalá., Pailebot, Santa Ana, Macayo, Pajonal, Playa Azul, El Limón, Emiliano Zapata, Miramar, Carrillo Puerto, El Bosque, La Estrella, Boquerón y Campechito.

El objetivo es estudiar 42 muestras de arena de playa distribuidas en 14 playas, entre la playa oriente del río Tonalá y la playa Campechito, por medio del análisis textural, petrográfico y geoquímico, de los sedimentos de infraplaya, mesoplaya y supraplaya, para determinar la relación existente entre los parámetros físicos y químicos de los sedimentos de ambiente costero, considerando su potencial variabilidad en supraplaya, mesoplaya e infraplaya y los factores endógenos (hidrografía, relieve y litología) y exógenos (clima, marea, corrientes y viento) del área de depositación de los sedimentos.

Las playas fueron escogidas debido a su localización en cercanías a las desembocaduras de ríos importantes como el Tonalá, Grijalva-Usumacinta, San Pedro y San Pablo, con respecto a lagunas y centros urbanos, como parte del “Proyecto Sedimentología de playas de México” del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Dentro de la metodología se usaron técnicas analíticas para la determinación de tamaño de partículas por medio del tamizado y pesaje, para el análisis composicional por medio del conteo de granos en lámina delgada y para la geoquímica de elementos mayores

espectrometría de fluorescencia de Rayos X (FRX) y de elementos traza y tierras raras por medio de la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Por medio de los resultados de textura, composición y geoquímica de los sedimentos, se determina la relación por medio de correlaciones entre las variables, como el tamaño de grano con respecto a los porcentajes de cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos; y la relación entre la cantidad de elementos mayores, traza y tierras raras, con la composición mineralógica de las arenas.

### **ABSTRACT**

Sedimentological study of surficial beach sands from the states of Tabasco and Campeche, is characterized by the textural, compositional and geochemical analysis of the sediments collected from May 24 to 29, on the Sotavento coast.

The study area is located in the Gulf of Mexico, between coordinates 18.2°N, 94.1°W, 18.7°N y 92.4°W, in the states of Tabasco and Campeche, between Tonalá river to the west and Campechito beach to the east. Sampling was obtained from the inshore, foreshore, backshore: Tonalá., Pailebot, Santa Ana, Macayo, Pajonal, Playa Azul, El Limón, Emiliano Zapata, Miramar, Carrillo Puerto, El Bosque, La Estrella, Boquerón and Campechito.

The objective is to study 42 samples of the beach sand distributed in 14 beaches, between the east beach of the Tonalá river and Campechito beach, by means of textural, petrographic and geochemical analysis, of the sediments of inshore, foreshore and backshore, to determinate the relationship between the physical and chemical parameters of the sediments of the coastal environment, considering their potential variability in inshore, foreshore and backshore and the endogenous factors (hydrography, relief and lithology) and exogenous factors (climate, tide, currents and wind) of the area of sediment deposition.

The beaches were chosen because of their location, near the mouths of important rivers such as the Tonalá, Grijalva-Usumacinta, San Pedro and San Pablo, with respect to lagoons and urban centers, all framed within the project entitled "*Proyecto Sedimentología de playas de México*" of the Institute of Marine Sciences and Limnology (ICML) of the UNAM.

Within the methodology, analytical techniques were used for the determination of particle size by means of sieving and weighing, for compositional analysis by means of grain count in thin sheet and for the geochemistry major elements X-ray fluorescence spectrometry (FRX) and trace and rare earth elements by means of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Through the results of texture, composition and geochemistry of the sediments, the relationship between the variables is determined, such as grain size with respect to the percentages of quartz, feldspar and lithic fragments; and according to the amount of major elements, and the relationship between trace and rare earths with the mineralogical composition of the sands.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las playas es de gran relevancia teniendo en cuenta que son ambientes altamente sensibles a cambios físicos, químicos, biológicos y antrópicos. Se requiere estudiar las playas puesto que su calidad ambiental se puede ver altamente vulnerada (Botero-Saltaren et al., 2013), tanto a escala local como regional, para así generar planes o proyectos que busquen remediar y organizar las zonas costeras.

México cuenta con cerca de once mil kilómetros de litoral (Carranza-Edwards, 2011), al occidente se tienen las del océano Pacífico y al oriente, las del Golfo de México que contrastan en morfología, tipo de sedimentos y rocas de procedencia; las zonas de transición agua-tierra están sujetas a la erosión y al depósito de sedimentos. El ambiente de playa es afectado por la influencia de varios factores: el relieve, el clima, la tectónica, la hidrología y la litología, tanto de la franja costera como de la cuenca a la cual pertenece y los fenómenos oceanográficos del área (Davies, 1980).

La presente tesis se inserta dentro del “*Proyecto Sedimentología de playas de México*” a cargo del doctor Arturo Carranza Edwards, el cual tiene como finalidad global realizar un estudio a nivel regional de playas de México, para generar información de utilidad para el conocimiento tanto básico como aplicado en áreas como ingeniería para la construcción de infraestructuras para la mitigación de la erosión (Silva et al., 2019), toma de decisiones en políticas públicas como en procesos de zonificación costera (Silva et al., 2017) y estudios para biología y ecología en la descripción de fauna costera como lugares de anidación de tortugas (Márquez et al., 2010).

La zona de estudio está localizada en el Golfo de México (Figura 1), comprendida entre las coordenadas 18.2°N, 94.1°O, 18.7°N y 92.4°O, en los estados de Tabasco y Campeche, entre el río Tonalá al occidente y la playa Campechito al oriente. El muestreo se obtuvo de infraplaya, mesoplaya y supraplaya de las playas: Tonalá., Pailebot, Santa Ana, Macayo,

Pajonal, Playa Azul, El Limón, Emiliano Zapata, Miramar, Carrillo Puerto, El Bosque, La Estrella, Boquerón y Campechito.

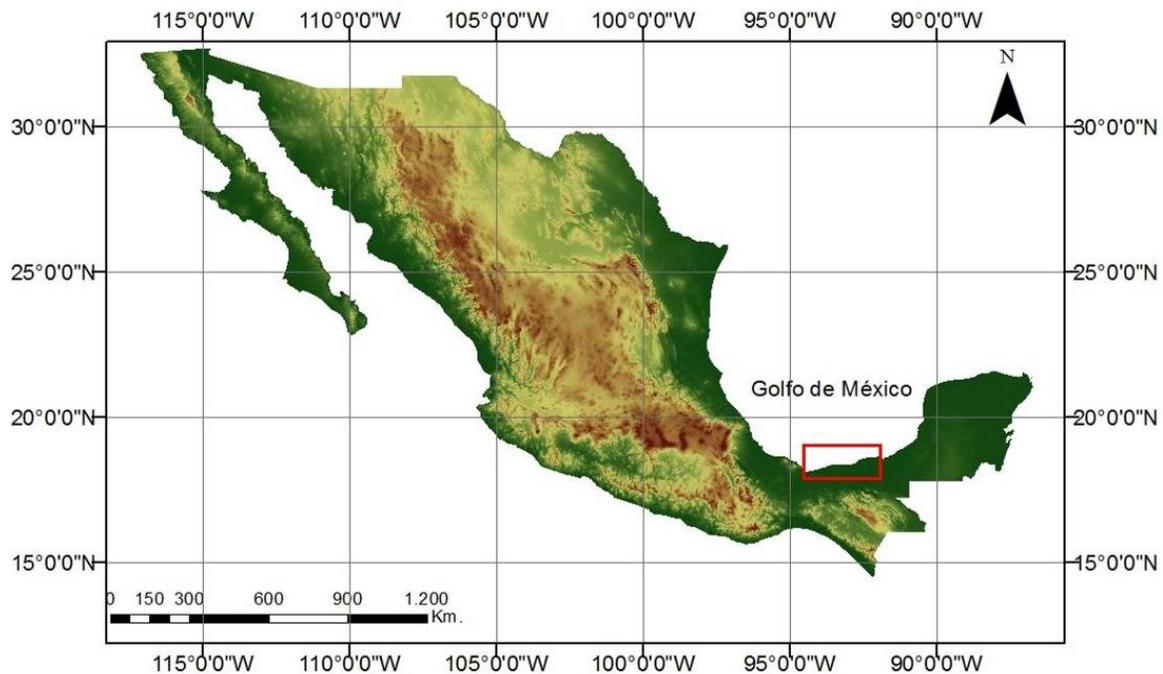


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en el Golfo de México.

El sistema litoral del sur del Golfo de México es de gran complejidad pues incluye ambientes y sub ambientes entre los que destacan: fluviales, deltaico, planicies de inundación, lagunas costeras y manglares, entre otros (Hernández et al., 2008). Según Davies (1980) y Carranza-Edwards et al. (1975), la zona del Golfo de México está clasificada por Inman y Nordstrom (1971) como una costa de mar marginal la cual es frecuentemente modificada por llanuras fluviales y deltas. De igual forma, Carranza-Edwards (1975) clasificó el área de estudio dentro de la Unidad III en las “Unidades morfotectónicas de las costas mexicanas”, recalcando que ha recibido gran parte de sedimentos clásticos de grano fino, acumulado en los complejos deltaicos de los ríos Tonalá, Grijalva y San Pedro-San Pablo. La acumulación de arena de tamaño fino o muy fino genera sitios de erosión en playas dominadas por oleaje. También la describe como

una llanura costera amplia y de pendiente moderada con lomeríos bajos de suave relieve (Carranza-Edwards et al., 1975).

La playa es un ambiente de depósito transicional de sedimentos no consolidados (Carranza-Edwards et al., 2015). Carranza-Edwards et al. (1994) clasifican y definen los límites de la infraplaya, mesoplaya y supraplaya, según la morfología y características físicas. Exponen que, ya que la playa es un límite natural entre el aire, la tierra y el agua estos tres agentes van a ejercer cambios diferenciales en el perfil de playa de acuerdo con la dinámica de cada uno y los límites son controlados principalmente por el oleaje, las corrientes y las mareas (Carranza-Edwards et al., 1994).

El límite inferior de la playa tiene un desplazamiento vertical y horizontal, y se localiza "en punto en el cual el material no consolidado del fondo entra en movimiento por la acción de las olas" y el límite superior es "en donde el material no consolidado puede entrar en movimiento, por la acción del viento y generalmente se encuentra disgregado"; pueden ser modificados por "la acción del viento, por tormentas y ciclones, erosión, etc. También puede estar dado por la vegetación o por algún cambio en la fisiografía, como pueden ser acantilados o incluso construcciones u obras civiles" (Carranza-Edwards et al., 1994).

Ya definidos los límites inferior y superior de la playa, los autores proponer la zonificación del perfil de playa en tres: infraplaya, mesoplaya y supraplaya, de acuerdo con los rasgos mayores del perfil de playa y con las diferentes zonas dinámicas del ambiente (Carranza-Edwards et al., 1994):

a) Infraplaya (*inshore*): es la zona de la playa que siempre está cubierta por agua en condiciones normales. Se presentan rizaduras simétricas generadas por oleaje simétrico, y se inicia el movimiento vertical del material suelto del piso, sin transporte de sedimentos hacia la costa. Más cerca de la línea de costa, el perfil presenta rizaduras asimétricas generadas por el oleaje asimétrico seguidas por barras y canales asociados con la zona de rompientes de la ola.

b) Mesoplaya (*foreshore*): está localizada entre la infraplaya y la supraplaya. Es una superficie inclinada hacia el mar y en la cual se tiene la zona de vaivén en donde ocurre el lavado y relavado debido al máximo avance y retroceso del flujo laminar.

c) Supraplaya (*backshore*): zona de la playa que en condiciones normales se encuentra seca, predominan los agentes eólicos sobre los acuosos. Puede estar afectado ocasionalmente por mareas de tormentas o por olas extremadamente altas.

En cuanto al análisis textural se realiza a partir de los parámetros estadísticos del tamaño de grano de los sedimentos: 1. Tamaño gráfico promedio ( $Mz\phi$ ), 2. Desviación gráfica inclusiva ( $\sigma\phi$ ), 3. Grado de asimetría ( $Sk_l$ ) y 4. Curtosis ( $K_G$ ) (Folk, 1980), brindando información sobre el transporte de los sedimentos hacia su lugar de depositación y el origen de los mismos.

El análisis petrográfico involucra la descripción de láminas delgadas por medio de observaciones y conteos de microscopio petrográfico determinando los principales componentes mineralógicos. El procedimiento para el conteo de minerales se realiza de acuerdo con Franzinelli y Potter (1983), recorriendo líneas imaginarias paralelas en la lámina delgada, identificando los componentes en uno de los nueve campos; las líneas paralelas no deberán interceptar partículas ya contadas. El análisis mineralógico modal se realiza: 1. conteo de 100 puntos para determinar el origen de los sedimentos (terrágenos y biógenos). 2. Conteo de 300 puntos en seis campos: Qt (cuarzo total), Feldespato potásico (Fk), Plagioclasa (Fp), Líticos totales (Lt), Mi (micas) y MP (minerales pesados). 3. Conteo de 100 puntos de líticos: Lv (fragmentos líticos volcánicos), Ls (fragmentos líticos sedimentarios), Lm (fragmentos líticos metamórficos), Lp (fragmentos líticos plutónicos).

Por último, en cuanto al análisis geoquímico se determinaron: 1. Elementos mayores por medio de espectrometría de fluorescencia de Rayos X (FRX); 2. Elementos traza y tierras raras, por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). La normalización se llevó a cabo según tres conjuntos de datos: 1. Promedio de cada playa; 2. Rudnick (2003); 3. Taylor y McLennan (1985).

## 2. ANTECEDENTES

De acuerdo con estudios de Carranza et al. (1996), la cantidad de carbonatos presentes en la arena depende de la región en la que se encuentren. En las playas del sur del Golfo de México se encontró una baja presencia de carbonatos, a pesar de estar tan cercanas a la Plataforma de Yucatán que es una zona muy rica en carbonatos. En contraste, las playas del sur del Golfo de México son muy ricas en sedimentos terrígenos (Carranza-Edwards et al. 1996) lo que se debe a que la precipitación pluvial es alta en las tierras elevadas de Chiapas y Guatemala que son sus principales regiones de aportación sedimentaria, mayormente en época de huracanes.

De acuerdo con el trabajo publicado por Carranza-Edwards en 2001 sobre el tamaño de grano y clasificación en arenas de playas recientes, se ha encontrado que existe relación entre el ancho de la planicie costera y las características físicas de las arenas de playa (Carranza-Edwards, 2001). De manera general, se puede decir que en el sur del Golfo de México se tienen las partículas más finas y mejor clasificadas de todas las muestras analizadas de diferentes litorales de México, lo que explica por qué las planicies costeras son amplias debido principalmente a las condiciones tectónicas y por el gran aporte fluvial y eólico influyen en la morfodinámica litoral.

En el artículo Hernández et al. (2008), se muestra la morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco realizando la comparación de documentos cartográficos de los años 1943, 1972, 1984 y 1995 y se describen los cambios morfológicos mediante mediciones en campo de 2003 a 2004. Los resultados muestran una clara evidencia del retroceso de la línea de costa hacia el continente y lo engloban en otros proyectos sobre el ascenso del nivel medio del mar reportado en otras zonas del Golfo de México y otras latitudes.

En el artículo Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste (Carranza-Edwards et al., 2015), presentan los resultados de un muestreo de arenas en mesoplaya de los estados de Tabasco, Campeche y Quintana Roo, describiendo sitios de erosión y depósito, comparando muestreos de diferentes épocas y en

el cual analizan perfiles de playa, variaciones de línea de costa, parámetros texturales y composición de arenas superficiales. En el artículo, anteriormente mencionado, se presenta que la dinámica en la línea de costa es por motivos antrópicos o naturales, dando ejemplos de los mismos para cada zona de muestreo y se clasifican las playas de acuerdo con el contenido de carbonatos, tamaño de grano de los sedimentos y pendiente de la playa.

### **3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

La línea de costa es un ambiente altamente vulnerable por factores naturales y antrópicos, así mismo varía con gran facilidad en el tiempo y espacio, ya que existen fenómenos naturales como huracanes, inundaciones, marea de fondo y erosión costera o acciones humanas como construcción de presas en los ríos, escolleras, puertos y refinerías que afectan directamente la distribución y depositación de los sedimentos en la playa, lo cual repercute en el ecosistema y altera las condiciones de la biomasa presente.

Por lo anterior, es importante realizar la investigación integral de los sedimentos que conforman los litorales del sur del Golfo de México, que constituye el tamaño de la arena, la composición y geoquímica de la misma; lo que es fundamental para conocer su origen, distribución y propiedades, e incluir todos los aspectos ambientales y factores que influyen en la depositación.

Puesto que la tesis está enmarcada en el Proyecto Sedimentología de playas de México, es una parte importante para la integración de la información ya obtenida en otras playas y que dentro del proyecto se llegue a una descripción regional de las playas que conforman el litoral costero de México.

Este tipo de análisis integral en muestra total de arena de diferentes zonas de playa servirá como referente y de comparación para estudios actuales que continuamente se están realizando en el área del sur del Golfo de México.

#### **4. HIPÓTESIS**

Existe relación entre la textura (tamaño y clasificación), composición mineralógica y geoquímica de los sedimentos de 14 playas de los estados de Tabasco y Campeche. Según la localización del área de estudio en el sur del Golfo de México, el transporte de los sedimentos tienen diferentes fases: 1. A través de las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta y la cuenca del río Tonalá. 2. Por el oleaje y corrientes marinas.

Así mismo el tamaño de los granos influye en la morfología de la playa en su extensión y pendiente. Por último, los factores endógenos y exógenos de la cuenca y del lugar de depositación de los sedimentos afectan la distribución de las arenas en el perfil de cada playa (infraplaya, mesoplaya y supraplaya) como también a lo largo del área de estudio.

#### **5. OBJETIVOS**

##### **5.1 General**

Estudiar 42 muestras de arena de playa de los estados de Tabasco y Campeche, entre la playa oriente del río Tonalá y la playa Campechito, por medio del análisis textural, petrográfico y geoquímico, de los sedimentos de infraplaya, mesoplaya y supraplaya, para determinar la relación existente entre los parámetros físicos y químicos de los sedimentos de ambiente costero, considerando su potencial variabilidad en supraplaya, mesoplaya e infraplaya y los factores endógenos (hidrografía, relieve y litología) y exógenos (clima, marea, corrientes y viento) del área de depositación de los sedimentos.

##### **5.2 Específicos**

- Por medio del tamaño de grano de la muestra total de arena de infraplaya, mesoplaya y supraplaya definir las características texturales como clasificación

(variación de tamaño de partículas), asimetría, curtosis (cantidad de tamaño de partículas).

- Analizar la relación entre la textura de los sedimentos con la morfología del perfil de playa, para determinar si existe o no una dependencia entre estos parámetros.
- Determinar los principales componentes mineralógicos de los sedimentos por medio de la petrografía a través del conteo de puntos en secciones delgadas.
- Analizar la composición geoquímica de los sedimentos de playas de elementos mayores y tierras raras, y su relación con la petrografía, para evaluar la influencia de factores endógenos y exógenos.
- Investigar las interrelaciones entre textura, petrografía y geoquímica en cada una de las muestras de las zonas de playa (infraplaya, mesoplaya y supraplaya) para contribuir al conocimiento de la dinámica costera.

## 6. ÁREA DE ESTUDIO

### 6.1 Localización

Las 42 muestras de sedimentos de playa analizadas, fueron obtenidas del 24 al 29 de mayo de 1981 dentro del “Proyecto Sedimentología de playas de México” y corresponden a catorce playas, trece del estado de Tabasco y una del estado de Campeche, en el Golfo de México (Figura 1). El área está delimitada por el río Tonalá (Tabasco) al occidente y Campechito (Campeche) al oriente, cubriendo un segmento litoral de 200 km. que corresponde con la provincia de Sotavento. Está comprendido entre las latitudes 18.2° N y 18.7° N, y las longitudes 94.1° O y 92.4° O. Las playas de estudio se encuentran en cercanías a las desembocaduras de los ríos Tonalá, Grijalva-Usumacinta y San Pedro y San Pablo, de occidente a oriente respectivamente (Figura 2)



Figura 2. Mapa de localización de playas estudiadas. Playas de occidente a oriente: 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6 Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóbata: 20 m.

La obtención de las muestras se realizó en 14 playas (Tabla 1); de cada playa se realizó el muestreo de las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya, propuestas por Carranza y Caso (1994). Las coordenadas se presentan en el sistema de coordenada geográficas, datum ITRF92.

Tabla 1.- Playas de muestreo de los estados de Tabasco y Campeche en el Golfo de México.

| Playa | Nombre          | Estado   | Long. O   | Lat. N    |
|-------|-----------------|----------|-----------|-----------|
| 1     | Tonalá          | Tabasco  | 94.119587 | 18.217651 |
| 2     | Pailebot        | Tabasco  | 93.932887 | 18.265486 |
| 3     | Santa Ana       | Tabasco  | 93.859988 | 18.297731 |
| 4     | Macayo          | Tabasco  | 93.832224 | 18.307830 |
| 5     | Pajonal         | Tabasco  | 93.739709 | 18.339349 |
| 6     | Playa Azul      | Tabasco  | 93.306642 | 18.438018 |
| 7     | El Limón        | Tabasco  | 93.210000 | 18.440000 |
| 8     | Emiliano Zapata | Tabasco  | 92.949555 | 18.434883 |
| 9     | Miramar         | Tabasco  | 92.783608 | 18.496514 |
| 10    | Carrillo Puerto | Tabasco  | 92.725748 | 18.554164 |
| 11    | El Bosque       | Tabasco  | 92.677119 | 18.613120 |
| 12    | La Estrella     | Tabasco  | 92.594685 | 18.619292 |
| 13    | Boquerón        | Tabasco  | 92.509502 | 18.638587 |
| 14    | Campechito      | Campeche | 92.416903 | 18.660219 |

## 6.2 Factores endógenos

### 6.2.1 Hidrografía y relieve

La dinámica fluvial y el relieve, tanto de la zona de influencia como directamente del área de estudio, son factores endógenos que modifican las características texturales de los

sedimentos de las playas, según el transporte y la morfología de la cuenca de donde proceden los mismos.

La hidrografía de la zona de influencia del área de estudio se encuentra delimitada por las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta y Tonalá. La cuenca del río Tonalá está comprendida por 5630 Km<sup>2</sup> y según la Síntesis de información geográfica del estado de Tabasco (INEGI, 2001) el río Tonalá inicia en la sierra de Chiapas, a 1000 m.s.n.m. y su recorrido es el límite entre los estados de Tabasco y Veracruz, su dirección es en general hacia el noroeste con una longitud de 150 Km. La mayoría de su recorrido se encuentra en la zona de llanura de inundación y lagunas periféricas que se incrementan hacia la parte final del recorrido (Figura 3).



Figura 3. Localización de la desembocadura del río Tonalá, lagunas costeras del estado de Tabasco y playas de estudio. 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6. Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóbata: 20 m.

El área cuenta con un sistema lagunar costero comprendido por las lagunas: El Carmen, Pajonal, La Machona y Redonda, localizadas hacia el occidente del área de estudio y otros sistemas acuáticos como son las lagunas: Cocal, Grande de las Flores y Mecoacán.

Estos sistemas, están formados por procesos de sedimentación fluvio-terrágena y protegidos principalmente por islas de barrera, sujetas a una constante de erosión natural, acelerada por la modificación del transporte de sedimentos a causa de la retención de partículas tamaño arena en las presas del río Grijalva (Vázquez-Gutiérrez, 1994), ya que el transporte litoral es de oriente a occidente, las islas de barrera que protegen al sistema lagunar (occidente) no reciben el suficiente aporte de sedimentos del río Grijalva (oriente) y están más vulnerables a la erosión costera.

El territorio de la cuenca Grijalva-Usumacinta forma parte de la Región Hidrológico-Administrativa XI, Frontera Sur. Geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos 14°55' y 18°35' de latitud Norte y los meridianos 91° 20' y 94°15' de longitud Oeste. Limita al norte con el Golfo de México, al sur con la Región Hidrológica veintitrés Costa de Chiapas, al oriente con la Republica de Guatemala y al occidente con Veracruz y Oaxaca. Se encuentra subdividida en: Depresión Central, Meseta Central, Montañas del Norte, Montañas del Oriente, Planicie Costera del Golfo y las tierras bajas Chapayal. Tiene una superficie aproximada de 87700 km<sup>2</sup> y comprende 102 municipios del estado de Chiapas y 17 municipios del estado de Tabasco (CONAGUA, 2014).

Según el informe realizado por CONAGUA (2014) para el Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de Cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta, se destaca la importancia en el ciclo hidrológico de los ríos Usumacinta y Grijalva. El río Usumacinta cuenta con una longitud 1200 km siendo el más caudaloso de Guatemala y México. Los tributarios principales son los ríos: Cala, Serchil, Copón, Salama, Icbolay, Tzeja, San Román, La Pasión, San Pedro y Lacantún. Recorre el noroeste de Guatemala y es la frontera entre los dos países a lo largo de 200 km, para luego ingresar a México por el estado de Tabasco, en donde al unirse con el río Grijalva forma un extenso

delta pantanoso llamado pantanos de Centla, en donde tiene un caudal de 5400 m<sup>3</sup>/s (Figura 4).

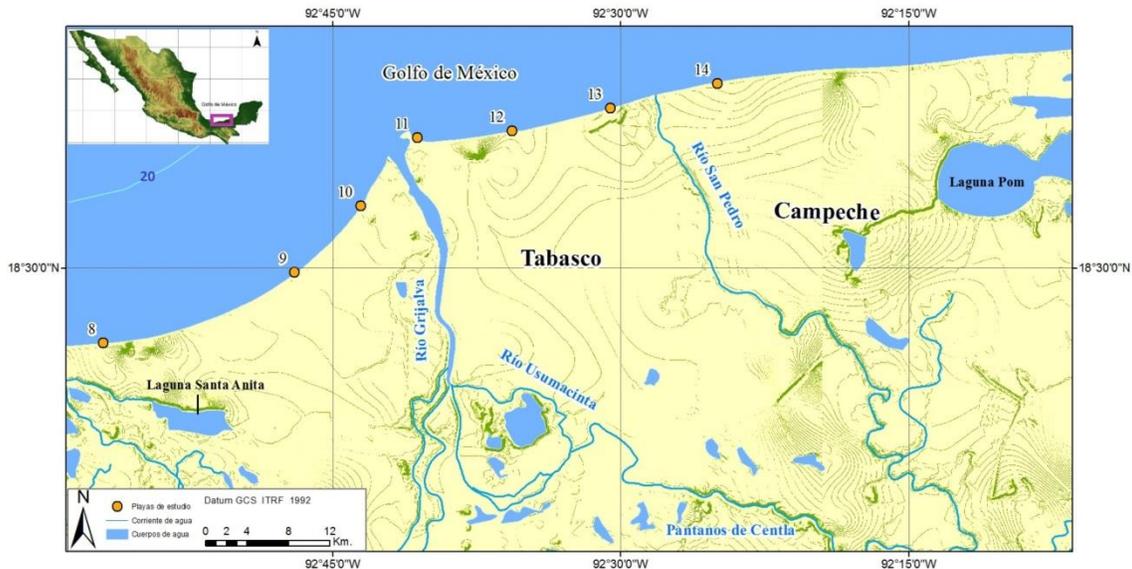


Figura 4. Localización de la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro, y playas de estudio. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003)). Isóбата: 20 m.

Por su parte, el río Grijalva es el segundo más caudaloso del país, de acuerdo con el informe de Programa Integral Hídrico de Tabasco (CONAGUA, 2014), cuenta con una longitud de 700 km. y nace a 4026 m.s.n.m en el volcán Tacaná, en Guatemala; en Chiapas la corriente sigue con una dirección sureste-noroeste, a todo lo largo de la Depresión Central, luego recorre la Meseta Central por el Cañón del Sumidero, pasa por las sierras del Norte, y desciende en la llanura tabasqueña hasta que se une al río Usumacinta, desembocando en el Golfo de México. En la literatura se nombra al río Grijalva con una gran variedad de nombres en diferentes lugares que cruza: cuando entra a México se llama río Cuilco; en el Cañón de la Angostura se llama río Chejil; en la Depresión Central, río Grande de Chiapas; en el Cañón del Sumidero, río Mezcapalapa; y en su parte final Río Grijalva.

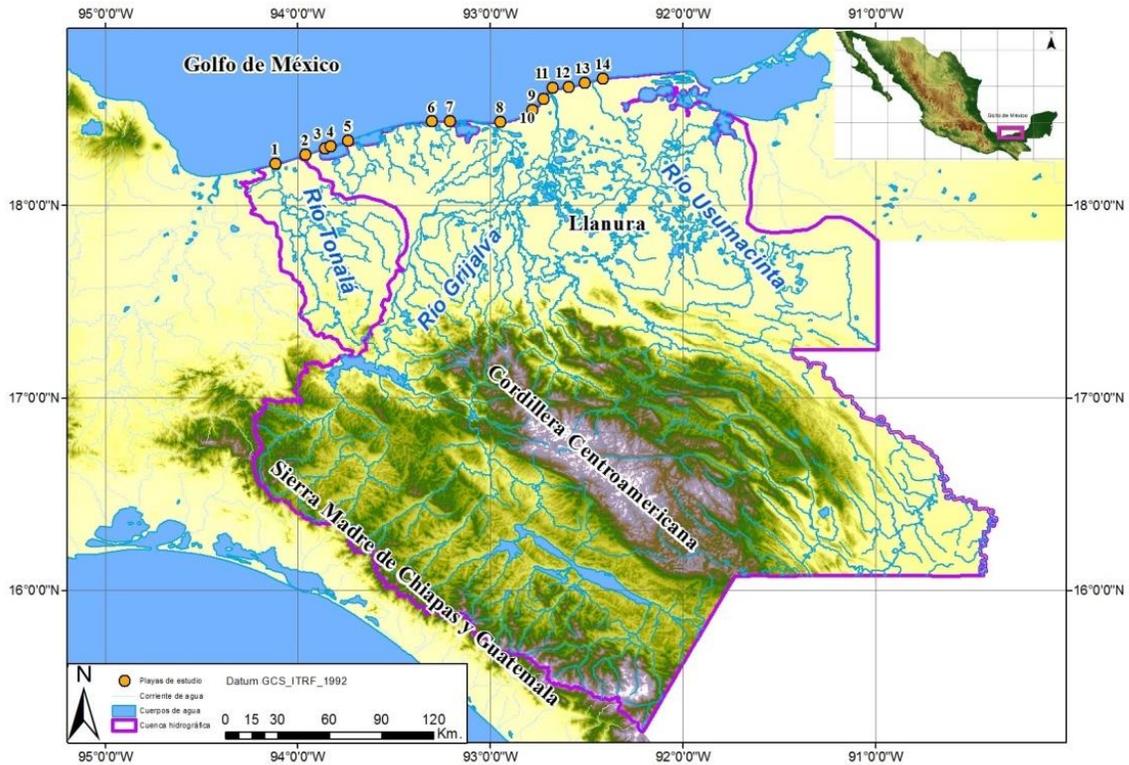


Figura 5. Mapa de hidrología y relieve de las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta y Tonalá. Playas de estudio: 1. Tonalá. 2. Pailebot. 3. Santa Ana. 4. Macayo. 5. Pajonal. 6. Playa Azul. 7. El Limón. 8. Emiliano Zapata. 9. Miramar. 10. Carrillo Puerto. 11. El Bosque. 12. La Estrella. 13. Boquerón. 14. Campechito. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001), SGM (2003))

El relieve de la zona de influencia del área de estudio está compuesta por: 1. Zona montañosa hacia el sur, denominada Sierra Madre de Chiapas y Guatemala, la cual se extiende desde el límite de la Sierra Madre del Sur en Oaxaca hasta la frontera con Guatemala, es la divisoria de agua entre la vertiente del Pacífico y al norte, los valles centrales de Chiapas. La mayor altura es el volcán Tacaná con 4026 m.s.n.m. (INEGI, 2001) y la Cordillera Centroamericana con una altura media de 2000 m.s.n.m., compuesta por Lacandona, el Macizo central y Montañas del Norte. 2. Llanuras aluviales y costeras de baja pendiente, y los pantanos de Centla, humedales y manglares.

Las playas, lugar en donde se centra el presente trabajo, se espera que reflejen el comportamiento de los factores como el relieve y la hidrología del área de influencia y así mismo, la dinámica costera (Figura 5).

### 6.2.2 Geología

La composición mineralógica y geoquímica de los sedimentos va a estar afectada por la litología del área, desde la parte alta de la cuenca hasta el sitio de la desembocadura de los ríos. Por lo tanto, con el fin de identificar la posible fuente de las arenas y tener una idea de la litología del área de aporte de las mismas se prosigue a describir la litología según INEGI (1984), Mandujano et al. (1995) y SGM (2003), SGM (2005) y Macías (2005) (Figura 6).

De tal manera, la Geología de la República Mexicana realizada por el INEGI (1984) describe en la parte media de la cuenca Grijalva-Usumacinta una secuencia de rocas calcáreas del Mesozoico y Cenozoico, sobre un basamento cristalino, conformado por rocas ígneas intrusivas y metamórficas del Precámbrico, que conforman la Sierra de Chiapas y Guatemala. Según Mandujano et al. (1995) las rocas ígneas del basamento son granitos y tonalitas del Pérmico-Triásico y el basamento metamórfico son gneisses anfibolíticos del Precámbrico Tardío. Seguido por una secuencia de rocas calcáreas desde el Mesozoico hasta el Paleoceno compuestas principalmente por packstone y wackstone con algunas intercalaciones de lutitas.

En el Eoceno cambia el régimen de sedimentación por la regresión marina, generando cambios en la composición de los sedimentos de biógenos de ambiente marino de plataforma a un ambiente continental, compuesto por areniscas de grano fino a grueso de la Formación El Bosque, y fósiles de tallos y troncos, indicando así un ambiente continental (Mandujano et al., 1995).

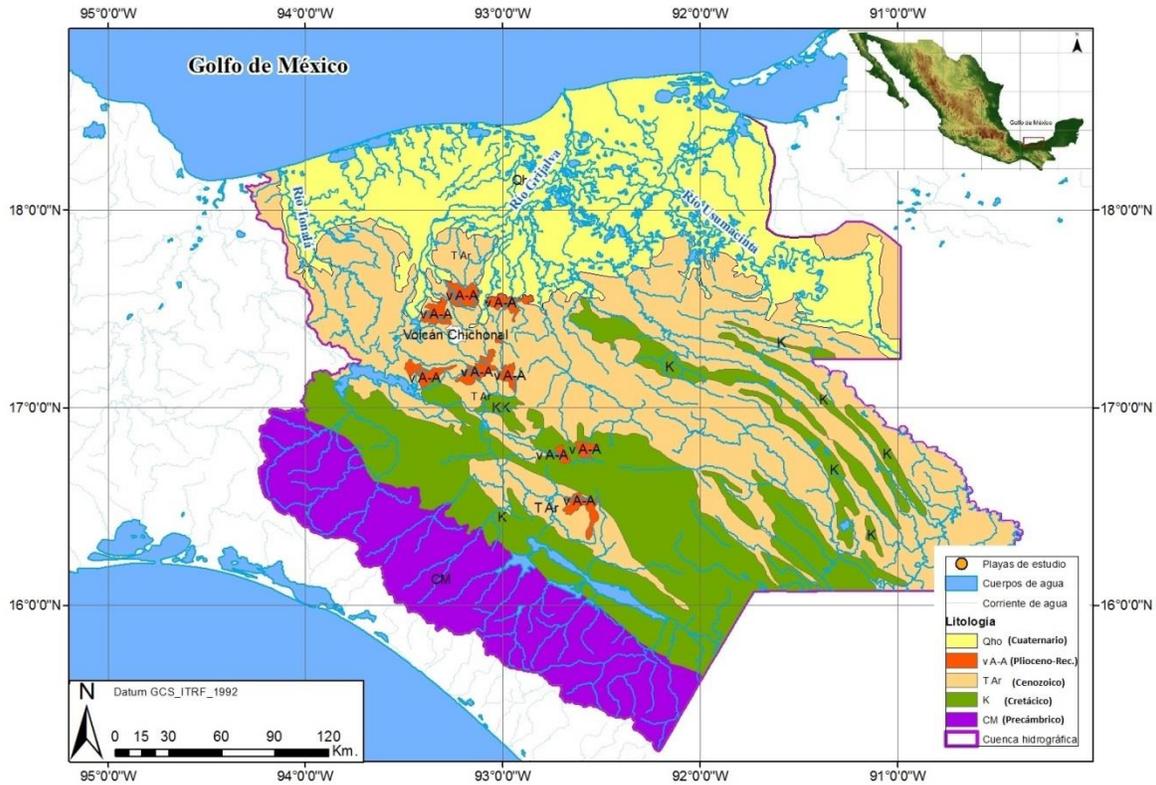


Figura 6. Mapa geológico del área de influencia de los sedimentos de playa, con las unidades litológicas más extensas y la localización del volcán Chichonal (modificado de la Carta Geológica de la República Mexicana, Instituto de Geología-UNAM, 2007). Unidades litológicas: Qho: depósitos recientes, de origen aluvial, eólico, litoral, palustre y lacustre. V A-A: rocas volcánicas de composición andesítica. T Ar: areniscas de grano fino a grueso. K: Rocas calcáreas (packstone y wackstone). CM: Complejo ígneo metamórfico del basamento de la Sierra de Chiapas y Guatemala.

La zona de llanura costera, según la carta geológico-minera de Frontera E-15 (SGM, 2003) describe el relieve sin mayores pendientes con rasgos geomorfológicos como pantanos, lagunas, barras, lomeríos, deltas y planicies aluviales, cubiertas por suelos recientes. Los depósitos están compuestos por unidades recientes clasificadas de la siguiente manera: 1. Qhoal (aluvión): depósitos continentales, de tamaño grava y arena, localizados en los cauces de los ríos; 2. Qhoo (eólico): depósitos cercanos a la línea de costa, sirven como barrera entre la línea de costa y el continente, y consisten principalmente de arena suelta aunque en algunas localidades se registran afloramientos con estratificación cruzada; 3. Qholi (litoral): se encuentran en la línea de costa, compuestos por arena de cuarzo y

minerales máficos; 4. Qhopa (palustre): consiste en lodo en estado de descomposición con mezcla de tallos y hojas de plantas, formados en zonas de agua estancada; 5. Qhola (lacustre): depósito en zonas marginales de los ríos, constituido por lodos (Figura 7) (SGM, 2003).



Figura 7. Geología del litoral del área de estudio. Unidades litológicas: Qhoal (aluvión), Qhoeo (eólico), Qholi (litoral), Qhopa (palustre), Qhola (lacustre). Modificado de carta geológico-minera Frontera E-15 (SGM, 2003). Batimetría de Uchupi (1967). Isóbata: 20 m.

Las rocas volcánicas están asociadas al volcán Chichonal localizado al noroeste del estado de Chiapas y perteneciente al arco volcánico Chiapaneco, que tiene como edad del Plioceno al Reciente. El Chichonal se encuentra sobre evaporitas y calizas del Jurásico-Cretácico Temprano, calizas dolomíticas del Cretácico Temprano a medio y calizas, areniscas y lutitas del Terciario (Macías, 2005). Es un volcán compuesto por un cráter de 1,5x2 Km. de diámetro llamado Somma, con elevación de 1150 msnm, de composición traquiandesítica (Macías et al., 2003) con paredes internas subverticales, y pendientes externas suaves. La mineralogía primordial es de plagioclasa, anfíbol, augita, con magnetita, esfena, pirrotita, biotita y apatita como minerales accesorios (Macías, 2005).

En la carta geológico-minera Tuxtla Gutiérrez se encuentran unidades litológicas de rocas volcánicas asociadas con el evento denominado Arco Volcánico Chiapaneco, durante el Plioceno-Pleistoceno, con depósitos de toba andesítica y lahares (SGM, 2005).

Según análisis geoquímicos de procedencia en zircones en arenas de la playa Brujas (Tapia et al., 2017) cercana a la playas Boquerón (13) y Campechito (14), se da como resultado que las potenciales fuentes de aporte de los sedimentos son los Complejos Masivos de Chaucus, Oaxaca y Chiapas, compuestos por granitoides y rocas metasedimentarias, del Pérmico (~251-286 Ma.) - Triásico (~216-249 Ma.) y Neoproterozoico (~551-996 Ma.), transportados por los ríos Grijalva - Usumacinta.

### 6.3 Factores exógenos

#### 6.3.1 Clima

El área de influencia de la zona de trabajo presenta diferencias de clima según su relieve. La zona montañosa es clima templado-húmedo con temperatura máxima entre 17°C a 20°C, con lluvias frecuentes entre mayo y septiembre. Hacia la zona de tierras bajas, pantanos y costa, el clima se encuentra clasificado como semicálido húmedo con lluvias todo el año; la temperatura media es de 27°C a 31°C y la temporada de lluvias entre junio y septiembre (CONAGUA, 2014).

El mapa de trayectorias de huracanes y tormentas tropicales de NOAA-Historical Hurricane Tracks, desde 1930 hasta la actualidad, muestra su influencia en las zonas costeras de los estados de Tabasco y Campeche, generando cambios en los regímenes de depositación y acumulación de sedimentos en la temporada de huracanes (Castro-Soriano, 2014). Durante el año de la toma de las muestras, en 1981, según datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), no se registraron tormentas tropicales que tuvieran alguna influencia en los estados de Tabasco y Campeche (Figura 8).

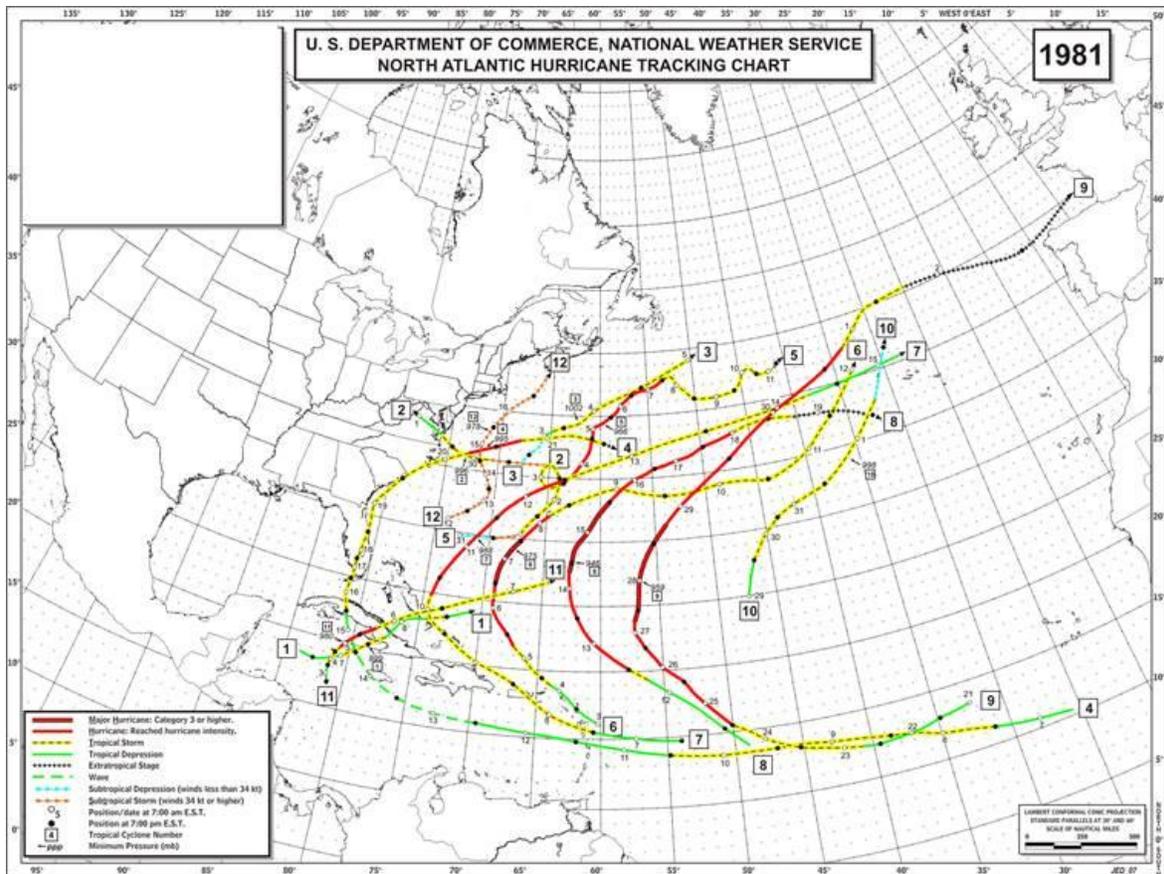


Figura 8. Temporada de huracanes en el año 1981. Tomado de NOAA-Historical Hurricane Tracks.

Aunque en el año anterior, en el informe de Trayectorias ciclónicas 1960 – 1980 (1980) y según el *Historical Hurricane Tracks*, se registró el paso de la tormenta tropical Hermine (Figura 9), la cual llegó a la costa en el estado de Campeche el 23 de septiembre de 1980, con vientos de 110 km. por hora y causando fuertes lluvias e inundaciones (Lawrence, M. 1980).

Los efectos del paso de la tormenta tropical Hermine por el estado de Campeche pudieron aumentar la tasa de erosión en la playa localizada hacia el oriente del área de estudio (Campechito), a causa del aumento de la velocidad del viento y por ende la energía de las olas, lo cual se vería reflejado en valores anómalos en el análisis textural y de composición de las arenas de dicha playa.



Figura 9. Trayectoria de la tormenta tropical Hermine en 1980 y su paso por la costa del estado de Campeche. Tomado de NOAA-Historical Hurricane Tracks

### 6.3.2 Corrientes, oleaje, marea y viento.

Los factores exógenos (corrientes, oleaje, marea y viento) controlan la energía del ambiente de depositación y la dinámica costera, e influyen en el transporte litoral de sedimentos. Marín-Guzmán, et al. (2011) describen el transporte litoral como el proceso mediante el cual el material de la zona litoral es removido a través del tren de oleaje que produce corrientes litorales. El viento es el responsable de producir dichas corrientes dominantes a lo largo de la costa.

En el caso de las playas en estudio el transporte litoral dominante tiene una dirección preferencial hacia el occidente como se determinó con parámetros de campo por el responsable del proyecto Dr. Arturo Carranza-Edwards, tomados durante la campaña de muestreo de arenas del 24 al 29 de mayo de 1981. En las notas de campo realizadas durante

dicha campaña de muestreo se recalca en la playa el Limón la presencia de dos espigones en construcción, que dan evidencia del transporte litoral hacia el occidente generando lugares de depositación hacia el oriente de las escolleras y de erosión al occidente de las mismas (Tabla 2, Figura 10).

Tabla 2.- Parámetros oceanográficos playas de Tabasco y Campeche. (Carranza-Edwards, A. Datos de campo 24 – 29 de mayo de 1981).

| Playa | Nombre          | Día        | Hora        | Velocidad<br>relativa (cm/s) | Corriente<br>al: | Ángulo<br>del oleaje | Viento<br>del: |
|-------|-----------------|------------|-------------|------------------------------|------------------|----------------------|----------------|
| 1     | Tonalá          | 28-05-1981 | 1440 a 1600 | 11.11                        | O                | 10°                  | NNE            |
| 2     | Pailebot        | 28-05-1981 | 1700 a 1900 | 15.33                        | O                | 10°                  | NE             |
| 3     | Santa Ana       | 29-05-1981 | 1700 a 1830 | 24.31                        | O                | 5°                   | NE             |
| 4     | Macayo          | 29-05-1981 | 1430 a 1600 | 4.17                         | O                | 5°                   | NE             |
| 5     | Pajonal         | 27-05-1981 | 1630 a 1745 | 15.69                        | O                | Paralelo             | NNE            |
| 6     | Playa Azul      | 29-05-1981 | 1230 a 1340 | 30.88                        | O                | 10°                  | NO             |
| 7     | El Limón        | 25-05-1981 | 1400 a 1545 | 19.59                        | O                | 10°                  | NNE            |
| 8     | Emiliano Zapata | 25-05-1981 | 1620 a 1820 | 25.66                        | O                | 5° a 10°             | NNE            |
| 9     | Miramar         | 27-05-1981 | 1800 a 1900 | 19.05                        | O                | 5°                   | NNE            |
| 10    | Carrillo Puerto | 27-05-1981 | 1300 a 1500 | 10.86                        | O                | 5°                   | N              |
| 11    | El Bosque       | 26-05-1981 | 1800 a 1900 | 13.16                        | O                | Sin luz              | ENE            |
| 12    | La Estrella     | 26-05-1981 | 1600 a 1720 | 0.00                         | O                | Paralelo             | NNE            |
| 13    | Boquerón        | 26-05-1981 | 1230 a 1500 | 2.44                         | O                | 2° a 5°              | NNO            |
| 14    | Campechito      | 24-05-1981 | 1630 a 1800 | 9.09                         | O                | Paralelo             | N              |

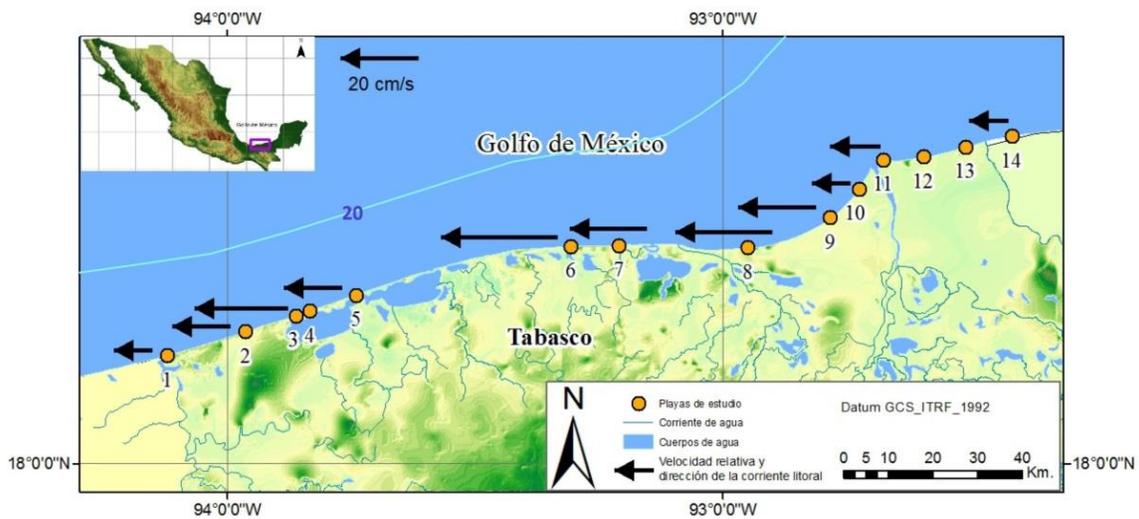


Figura 10. Mapa de velocidad de corrientes litorales en playas de Tabasco y Campeche. Isóbata: 20 m. (Carranza-Edwards, A. Datos de campo 24 – 29 de mayo de 1981).

La marea es el resultado de la suma vectorial de la fuerza gravitacional que ejercen la Luna y el Sol a la Tierra, y la fuerza centrípeta asociada a la rotación terrestre. Se puede clasificar como semidiurna, diurna y mixta, según la cantidad de pleamares o bajamares que ocurran (Ortiz, 2015). La marea en el Golfo de México es mixta con predominancia diurna (Servicio Mareográfico Nacional, 2019), solamente una pleamar y una bajamar tienen lugar en un día lunar (Ortiz, 2015), como es el caso del área de estudio.

Las muestras fueron recolectadas del 24 al 29 de mayo de 1981 y la mayor variación es el 24 de mayo entre un mínimo y un máximo de 30 cm. sobre y bajo el nivel medio del mar (Figura 11). Los días restantes tienen como promedio 10 cm. sobre el nivel medio del mar para el momento de la toma de la muestra y descripción de la playa.

Lo cual indica que las variaciones por las mareas no son un hecho significativo ni de mayor influencia en los análisis de las muestras de sedimentos en este caso en particular, aunque es necesario determinar en qué punto estaba la marea al momento de la toma de los datos, ya que se pueden asociar estructuras primarias sedimentarias en la playa y depósitos según su nivel.

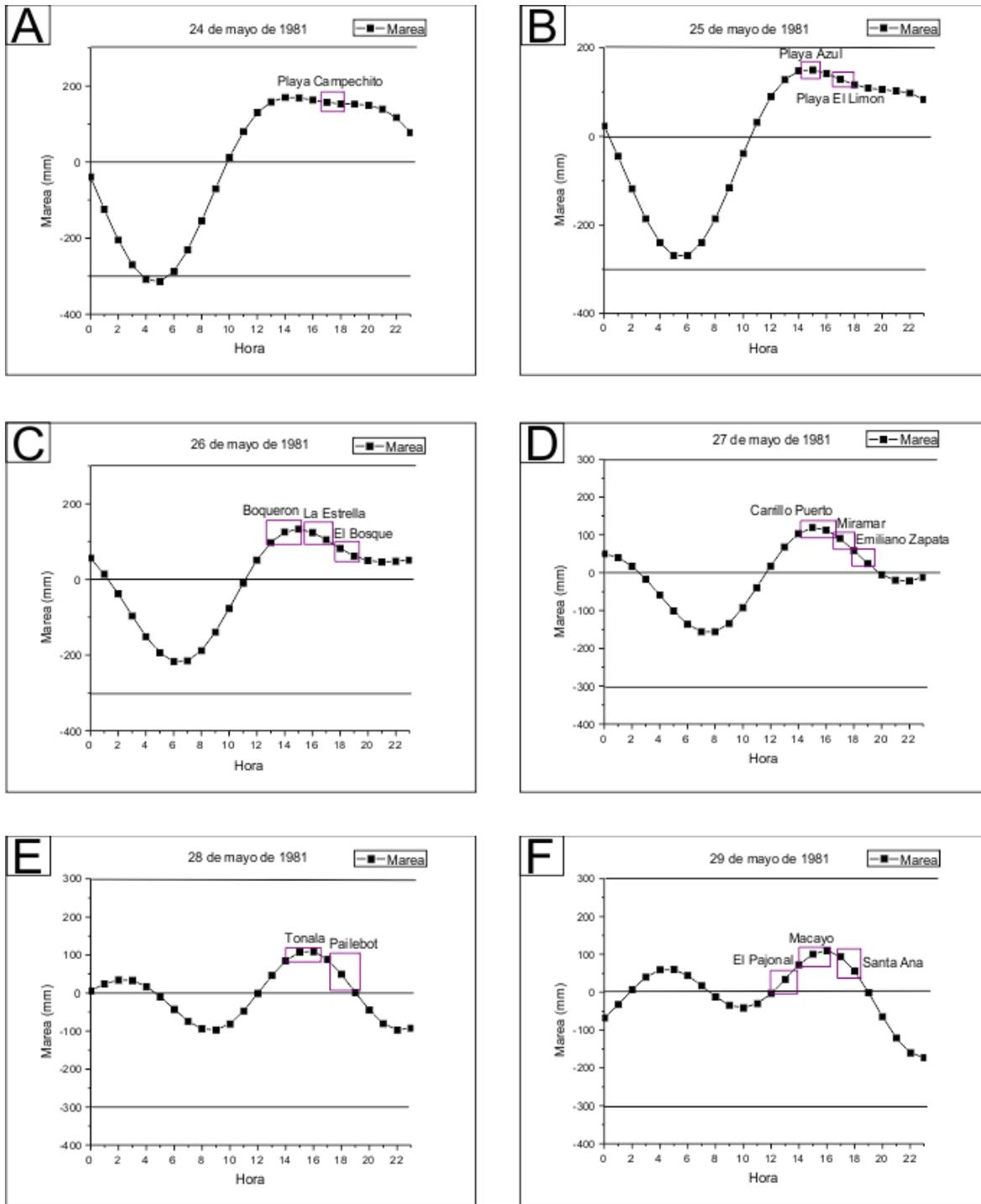


Figura 11 (A-F). Marea diaria del 24 al 29 de mayo de 1981 en las playas de Tabasco y Campeche. Modificado de: Mar V1.0 (Versión 1) “software”. Predicciones de mareas en México. CICESE, 2011.

## 6.4 Factores antrópicos

### 6.4.1 Represamiento de ríos y otras obras de infraestructura

Según datos del informe Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de presas del río Grijalva (Instituto de Ingeniería-UNAM, 2009), la infraestructura hidráulica está compuesta por un sistema de presas que operan en cascada o en serie, e inició su construcción en 1959 con la presa Malpaso (1959 – 1964), La Angostura (1969 – 1975), Chicoasén (1977 – 1983) y Peñitas que finalizó su construcción en 1987 (Figura 12) (Instituto de Ingeniería-UNAM, 2009). De acuerdo con el informe, las tres primeras presas cambiaron de manera drástica el régimen del río, inundaron grandes áreas formando lagos artificiales e hicieron el río menos caudaloso y menos arenoso hacia sus partes bajas. El represamiento de los ríos en la parte alta y media de las cuencas, alejadas de la costa, retendrá los sedimentos más gruesos en la desembocadura de los ríos en dichas presas, permitiendo así que principalmente lleguen a la costa los sedimentos más finos (Carranza-Edwards et al, 2010), cambiando la dinámica costera en el momento en el cual se pierda el aporte de las fracciones más gruesas del sedimento.

Otro tipo de infraestructura que afecta directamente la dinámica costera son las escolleras, construidas como barreras para proteger y resguardar las zonas de puertos. Los espigones, escolleras y muelles son barreras al transporte natural litoral de los sedimentos, ocasionando cambios en la dinámica de erosión y retención, generando ensanchamiento o adelgazamiento de las playas a cada lado de la infraestructura, ocasionando consecuencias y daños a la fauna litoral y a las propias obras (Carranza-Edwards et al., 2010). En el caso de las playas analizadas en el presente trabajo se encuentran dos escolleras, Oeste y Este, en el Puerto Dos Bocas en Paraíso, Tabasco. Su construcción fue entre 1979 y 1982 (Instituto de Ingeniería-UNAM, 2009).



Figura 12. Mapa de localización de las presas en el río Grijalva, las cuales han modificado la dinámica y régimen del río. Compilación de diversas fuentes (INEGI (2013), CONABIO (2001)).

## 7. METODOLOGÍA

### Perfiles de playa

El muestreo se realizó del 24 al 29 de mayo de 1981 recolectando el primer centímetro de sedimento de playa el cual representa las propiedades texturales de los sedimentos litorales a nivel regional (Carranza-Edwards, 2001). De las playas localizadas en el sur del Golfo de México (Figura 2) y (Tabla 1) en el estado de Tabasco y Campeche se obtuvieron tres muestras de arena por playa: una en infraplaya (I), una en mesoplaya (M) y una en supraplaya (S), para un total de 42 muestras de sedimentos en los que se tomaron en consideración las diferentes partes de la playa de acuerdo al esquema de la Figura 13.

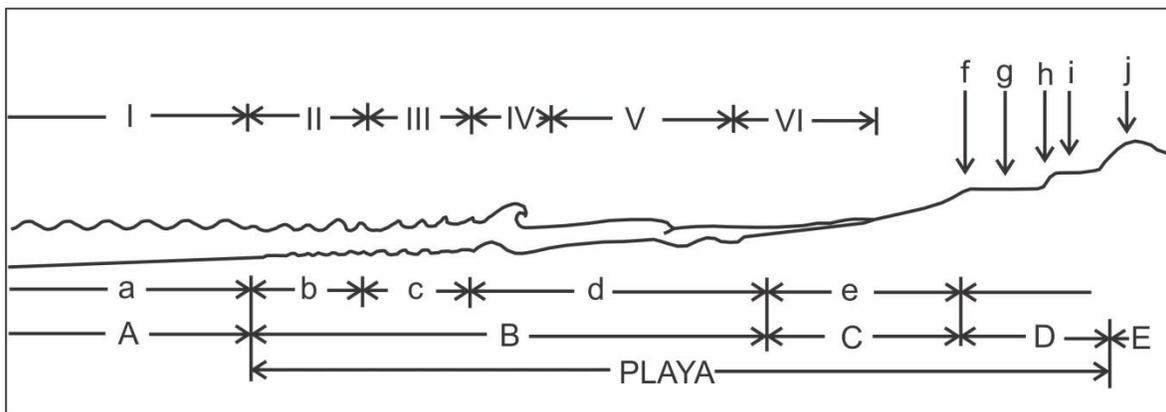


Figura 13. Esquema de perfil de playa. El muestreo de las 13 playas de Tabasco y una Campeche se obtuvo en las zonas denominadas infraplaya, mesoplaya y supraplaya. A: plataforma continental. B: infraplaya. C: mesoplaya. D: supraplaya. E: dominio terrestre. I: olas simétricas sin influencia en el fondo. II: olas simétricas con influencia en el fondo. III: olas asimétricas con influencia en el fondo. IV: zona de rompientes. V: zona de barrido. VI: zona de vaivén. a: piso liso sin rizaduras. b: rizaduras simétricas. c: rizaduras asimétricas. d: barras y canales. e: frente de playa. f: cresta de berma. g: berma. h: escalón de playa. i: berma de tormentas. j: dunas (tomado de Carranza-Edwards, et al., 1994).

Durante el trabajo de campo se realizaron las descripciones y los perfiles de las 14 playas por el método de nivelación diferencial, tomando una lectura atrás (vista al mar) y lectura adelante (vista a tierra) con el estadal y el nivel, y distancias horizontales entre los puntos visados medidas con la cinta métrica. Con las diferencias de las lecturas se determinan el

desnivel, las cotas, la distancia entre puntos y la distancia gráfica, y por último obtener el perfil bidimensional de cada línea. En la reconstrucción de los perfiles se usó una escala vertical 1:250 y horizontal 1:500, para la exageración vertical de 2x.

Las corrientes litorales relativas fueron medidas en campo en 1981 por medio del uso de una pelota de tenis amarilla, la cual se sumergía en el agua lo suficiente para no ser afectada por el efecto del viento y así determinar la dirección y velocidad (Carranza-Edwards et al., 1998).

### **Parámetros texturales**

Cada muestra de sedimento fue secada y dividida para análisis textural, petrográfico y geoquímico. Se recalca la idea de que para cada análisis se utiliza la muestra total para evitar el fraccionamiento de la muestra según tamaño de grano.

Para el análisis granulométrico realizado en el Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, se utilizaron tamices U.S. Standard Soil cada  $\frac{1}{4}$  de  $\phi$  en el tamizador de laboratorio o Ro-Tap®. Los resultados del análisis textural de las muestras de arena se obtuvieron pesando en la balanza electrónica la muestra total, luego fraccionarla en los tamices para volver a pesar cada fracción de tamaño de grano, generar el análisis granulométrico por medio de la gráfica de frecuencia acumulada y determinar los parámetros estadísticos de tamaño de grano (Folk, 1980): 1. Tamaño gráfico promedio ( $Mz\phi$ ), 2. Desviación gráfica inclusiva ( $\sigma_I\phi$ ), 3. Grado de asimetría ( $Sk_I$ ) y 4. Curtosis ( $K_C$ ).

La escala de tamaño de las partículas y usada para determinar los parámetros estadísticos es planteada por Wentwoth en 1922 y modificada por Krumbein en 1934, el cual mantiene los nombres de los tamaños de partículas y convierte los límites de los tamaños de milímetros (mm) a valores phi ( $\phi$ ) por medio de una transformación logarítmica (Selley, 2000):

$$\Phi = -\log_2 d$$

En donde  $d$  es el diámetro de la partícula, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.- Escala de tamaño de partículas de Wentworth.

| Valor $\phi$ | Diámetro de la partícula (mm) | Escala Wentworth (Nomenclatura) |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------|
| -6           | 64                            | Grava                           |
| -2           | 4                             | Guijarro                        |
| -1           | 2                             | Gránulos                        |
| 0            | 1                             | Arena muy gruesa                |
| 1            | 0.5                           | Arena gruesa                    |
| 2            | 0.25                          | Arena media                     |
| 3            | 0.125                         | Arena fina                      |
| 4            | 0.0625                        | Arena muy fina                  |
| 8            | 0.0039                        | Limo                            |
|              |                               | Arcilla                         |

El método para determinar los parámetros estadísticos está basado en la gráfica de la curva acumulativa del peso de la muestra y obteniendo el diámetro del sedimento según el porcentaje acumulado (Folk, 1980).

Se consideran como parámetros texturales básicos los siguientes (Folk, 1980):

#### Medida de tamaño gráfico promedio

El promedio gráfico se determina en la curva acumulativa según los valores de  $\phi_{16}$ ,  $\phi_{50}$  y  $\phi_{84}$ , da como resultado el tamaño promedio de la muestra dividido en secciones desde grava, arena, limo y arcilla.. Promedio gráfico (media):

$$Mz\Phi = \frac{\Phi16 + \Phi50 + \Phi84}{3}$$

### Medida de clasificación

Permite determinar la uniformidad del tamaño de los sedimentos. En partículas más finas la clasificación será mejor en sedimentos terrígenos (el numerador se refiere al porcentaje acumulado y los denominadores a las desviaciones estándar entre cada límite de la curva).

$$\sigma_{I\Phi} = \frac{\Phi84 + \Phi16}{4} + \frac{\Phi95 + \Phi5}{6.6}$$

La clasificación será:  $\leq 0.35$ , Muy bien clasificado. 0.35 a 0.50 Bien clasificado. 0.50 a 0.71 Moderadamente bien clasificado. 0.71 a 1.0 Moderadamente clasificado. 1.0 a 2.0 Mal clasificado. 2.0 a 4.0 Muy mal clasificado.  $\geq 4.0$  Extremadamente mal clasificado.

### Medida de asimetría

$$Sk_I = \frac{\Phi16 + \Phi84 - 2\Phi50}{2(\Phi84 - \Phi16)} + \frac{\Phi5 + \Phi95 - 2\Phi50}{2(\Phi95 - \Phi5)}$$

En función de los valores obtenidos será: 1.0 a 3.0 Muy asimétrico hacia los finos. 0.30 a 0.10 Asimétrico hacia los finos. 0.10 a -0.10 Simétrico. -0.10 a -0.30 Asimétrico hacia los gruesos. -0.30 a -1.00 Muy asimétrico hacia los gruesos.

### Curtosis gráfica

Indica si una muestra tiene muchos tamaños de grano o si su tendencia es hacia uno (el número del denominador “2.44” indica el intervalo entre los límites del diámetro  $\Phi$ ).

$$K_G = \frac{\Phi95 - \Phi5}{2.44(\Phi75 - \Phi25)}$$

En función de los valores obtenidos será:  $\leq 0.67$  Muy platicúrtico. 0.67 a 0.90 Platicúrtico. 0.90 a 1.11 Mesocúrtico. 1.11 a 1.50 Leptocúrtico. 1.50 a 3.00 Muy leptocúrtico.  $\geq 3$  Extremadamente leptocúrtico.

### **Composición de las arenas de playa**

En el análisis petrográfico de la muestra total se siguió el modelo de Franzinelli y Potter (1983) que cuenta una partícula solo una vez sin importar el tamaño de la misma (Carranza et al., 2015), utilizando el microscopio petrográfico Olympus modelo BH-2. El conteo se realizó en tres etapas: 1. Conteo de 100 partículas para diferenciar el origen de los sedimentos en terrígenos y biógenos. 2. Conteo de 300 partículas de sedimentos terrígenos para diferenciar su composición en: Qt (cuarzo total), Feldespato potásico (Fk), Plagioclasa (Fp), Lt (fragmentos líticos totales), Mi (micas) y MP (minerales pesados). 3. Conteo de 100 partículas para diferenciar el origen de los fragmentos líticos: Lv (fragmentos líticos volcánicos), Ls (fragmentos líticos sedimentarios), Lm (fragmentos líticos metamórficos), Lp (fragmentos líticos plutónicos).

En las láminas delgadas se determinaron otros minerales aparte del cuarzo y de los feldespatos, como hornblenda (Hbl), zircón (Zrn), carbonato (Cb), glauconita (Glt) y monazita (Mnz). Las abreviaturas utilizadas están basadas en la lista de los minerales formadores de rocas (Whitney et al., 2010)

Los polígonos de una desviación estándar de Qt, Ft y Lt y de Ls, Lv, Lm+Lp, se realizaron alrededor del valor promedio de cada uno para observar la tendencia de los valores a través de los diferentes polos de los diagramas ternarios (Carranza-Edwards et al., 2019).

### **Geoquímica**

La determinación de los elementos mayores se realizó por espectrometría de fluorescencia de Rayos X (FRX) usando el instrumento Siemens SRS-3000 en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) el 15 de marzo de 2017 siguiendo el procedimiento descrito en Lozano-

Santa Cruz et al., (2005) y los elementos traza y tierras raras, por medio de la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) usando el instrumento Thermo Series XII en el Centro de Geociencias (CGEO) de la UNAM, siguiendo el procedimiento descrito en Mori et al., (2009).

La normalización de los elementos mayores, traza y tierras raras de los sedimentos se realizó según tres conjuntos de datos: 1. Promedio de las playas; 2. Rudnick (2003); 3. Taylor & McLennan (1985).

La composición de la corteza terrestre (UCC, por sus siglas en inglés) ha sido estimada por muchos autores por medio de diferentes métodos: 1. Promedio de un gran número de análisis químicos. 2. Combinando análisis químicos de diferentes tipos de rocas según su abundancia. 3. Analizando los sedimentos que vienen del continente. 4. Combinando la composición félsica y máfica de las rocas en diferentes proporciones y 5. Modelamiento. Los resultados de estos diferentes métodos son muy similares (Faure, 1991). En este caso se realizó la normalización con base en los datos del promedio de playas, para observar el enriquecimiento o empobrecimiento de cada elemento localmente, y con los datos de Rudnick (2003) y Taylor & McLennan (1985) para observar sus variaciones con respecto de los valores de la corteza continental.

Las correlaciones se realizaron por medio del coeficiente de Pearson y su correspondiente análisis de significancia.

### **Mapas y figuras de apoyo**

Los mapas de localización del área de estudio, localización de playas estudiadas, localización de la desembocadura de los ríos Tonalá, Grijalva y San Pedro, y lagunas costeras, hidrología y relieve, geología de la cuenca y del litoral, y velocidad de corrientes litorales son generados en el software de Sistemas de Información Geográfica ArcGis 10.2, por medio de la compilación de información de bases de datos y cartografía existente de INEGI (2013), CONAGUA (2001), Instituto de Geología-UNAM (2007) y Servicio

Geológico Mexicano (2004, 2005). Las isóbatas son de la batimetría del Golfo de México de Uchupi (1967). Las tablas, análisis estadísticos y gráficas se realizan con el software Origin 8.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Perfiles de playa

Los perfiles de playa son el resultado de complejos procesos de transporte y acumulación de sedimentos que indican la dinámica costera (Zetina et al., 2008). Pueden presentar morfologías variadas a lo largo de la costa, aunque mantienen una tendencia general similar, con una mayor pendiente en la zona cercana a la línea de costa y una disminución progresiva hacia mar adentro (Bernabeu et al., 2001).

La morfología de la playa descrita por la pendiente y la longitud de la misma, cambia de acuerdo con la variabilidad granulométrica a lo largo del perfil, ya que según Medina et al. (1995) los diferentes tamaños de sedimento responden de manera diferente ante una misma sollicitación hidrodinámica. A lo cual se puede agregar que también depende de su composición mineralógica, dureza y densidad de las partículas.

Tabla 4.- Pendiente de los perfiles de playa

| Playa | Nombre          | Pendiente ° |
|-------|-----------------|-------------|
| 1     | Tonalá          | 14.34       |
| 2     | Pailebot        | 7.26        |
| 3     | Santa Ana       | 9.77        |
| 4     | Macayo          | 8.74        |
| 5     | Pajonal         | 10.10       |
| 6     | Playa Azul      | 11.42       |
| 7     | El Limón        | 8.35        |
| 8     | Emiliano Zapata | 4.57        |
| 9     | Miramar         | 8.43        |
| 10    | Carrillo Puerto | 7.67        |
| 11    | El Bosque       | 4.27        |
| 12    | La Estrella     | 6.79        |
| 13    | Boquerón        | 6.64        |
| 14    | Campechito      | 9.64        |

Las playas en este caso de estudio tienen pendientes suaves, ya que varían entre  $4.27^\circ$  y  $14.34^\circ$ , El Bosque y Tonalá, respectivamente (Tabla 4). En cuanto a su longitud, son playas generalmente amplias, de más de 20 m.

La variabilidad granulométrica a lo largo del perfil (Figura 14) describe la influencia en menor o mayor grado de las condiciones propias de cada playa como la morfología, el transporte litoral y la cercanía a la desembocadura de los ríos; se describen a continuación de occidente a oriente las condiciones de cada playa durante el momento del recorrido de campo en 1981:

1. Playa Tonalá (Figura 14): la composición textural es de arenas medias y bien clasificadas, aunque hacia la parte alta la arena tiene tendencia a fina, ya que esta zona se encuentra seca y el viento de mar a tierra tiene mayor facilidad de transportar los sedimentos más finos y acumularlos en esta área.
2. Playa Pailebot (Figura 14): la composición textural tiene arena media en infraplaya, y arena fina en meso y supraplaya, desde moderadamente clasificado a bien clasificado. La arena fina en meso y supraplaya, podrían indicar que en esta zona la pendiente es más suave.
3. Playa Santa Ana (Figura 14): amplia zona de supraplaya y texturalmente se determinó arena media en infra y supraplaya, y arena gruesa en mesoplaya. La playa tiene procesos erosivos ya que la escollera en Sánchez Magallanes no permite el transporte litoral de sedimentos hacia el occidente y queda acumulado hacia el oriente de la escollera.
4. Playa Macayo (Figura 14): el frente de playa tiene un ángulo alto de pendiente y la supraplaya no es extensa. La composición textural de las tres zonas es de arena media, aunque en la supraplaya tiene a disminuir en su tamaño, posiblemente a causa del viento que transporta partículas más finas hacia la parte alta de la playa.

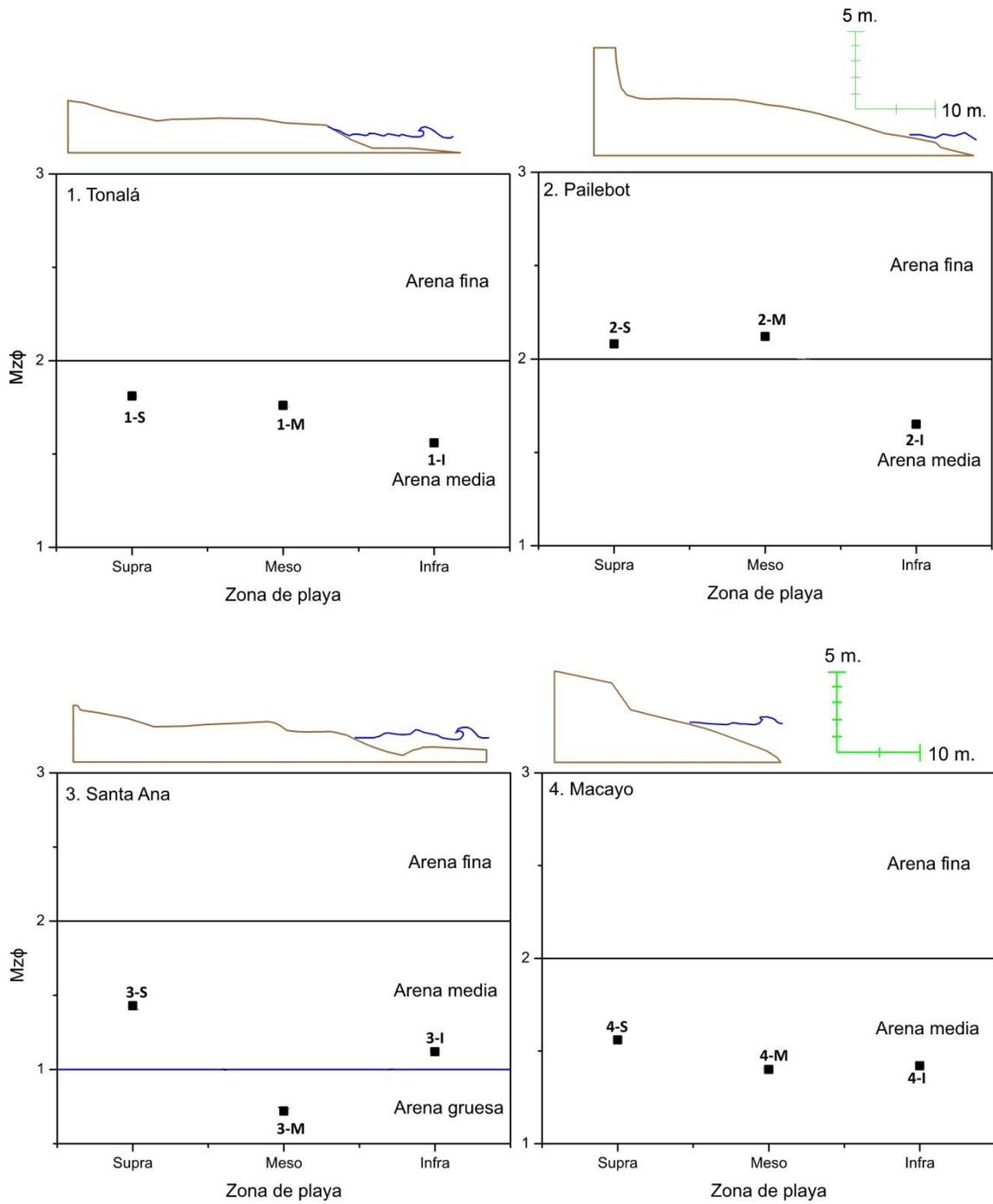


Figura 14. Playas 1 a 4. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

5. Playa Pajonal (Figura 15): la supraplaya es extensa y de baja pendiente, y la textura de las arenas es media con cierta tendencia hacia arena fina. La zona de infraplaya tiene un ángulo de pendiente alto lo cual indica alta energía en el ambiente de depositación.
6. Playa Azul (Figura 15): la geomorfología presenta en supra y mesoplaya una gran extensión de muy baja pendiente de sedimento de tamaño arena media y fina.
7. Playa El Limón (Figura 15): el perfil es extenso e indica una pendiente de ángulo bajo en la zona de supraplaya y mayor en meso e infraplaya, lo cual se refleja en el análisis textural de cada zona, siendo de arena fina en las zonas en donde la topografía es más horizontal que en la zona de infraplaya en donde la pendiente es mayor y el tamaño de grano es de arena media. Es una playa que tiene procesos erosivos debido a las escolleras Este y Oeste, construidas antes del muestreo, que no permiten el transporte continuo de sedimento desde el oriente.
8. Playa Emiliano Zapata (Figura 15): larga extensión y de baja pendiente del perfil en la zona de supraplaya, el análisis textural da como resultado arena fina; en la zona de supra y mesoplaya, en donde la pendiente aumenta, el tamaño de las partículas es de arena media.
9. Playa Miramar (Figura 16): la topografía tiene pendiente muy baja y la meso e infraplaya son muy extensas, el análisis textural da como resultado en las tres zonas arena fina.
10. Playa Carrillo Puerto (Figura 16): el perfil tiene topografía plana y de muy baja pendiente; los sedimentos son arena fina en las tres zonas de playa, indicando baja energía en el ambiente de depositación.

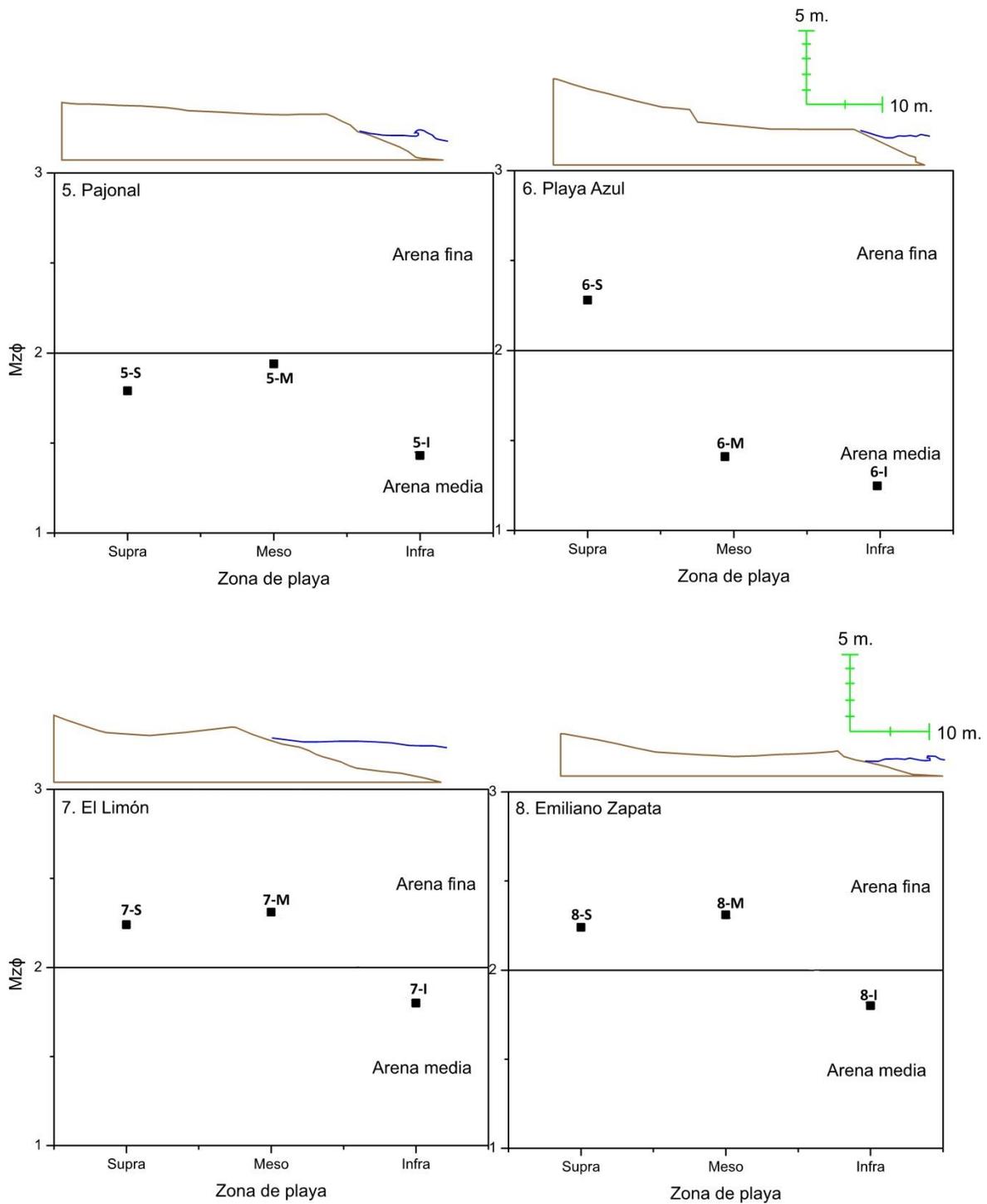


Figura 15. Playas 5 a 8. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya

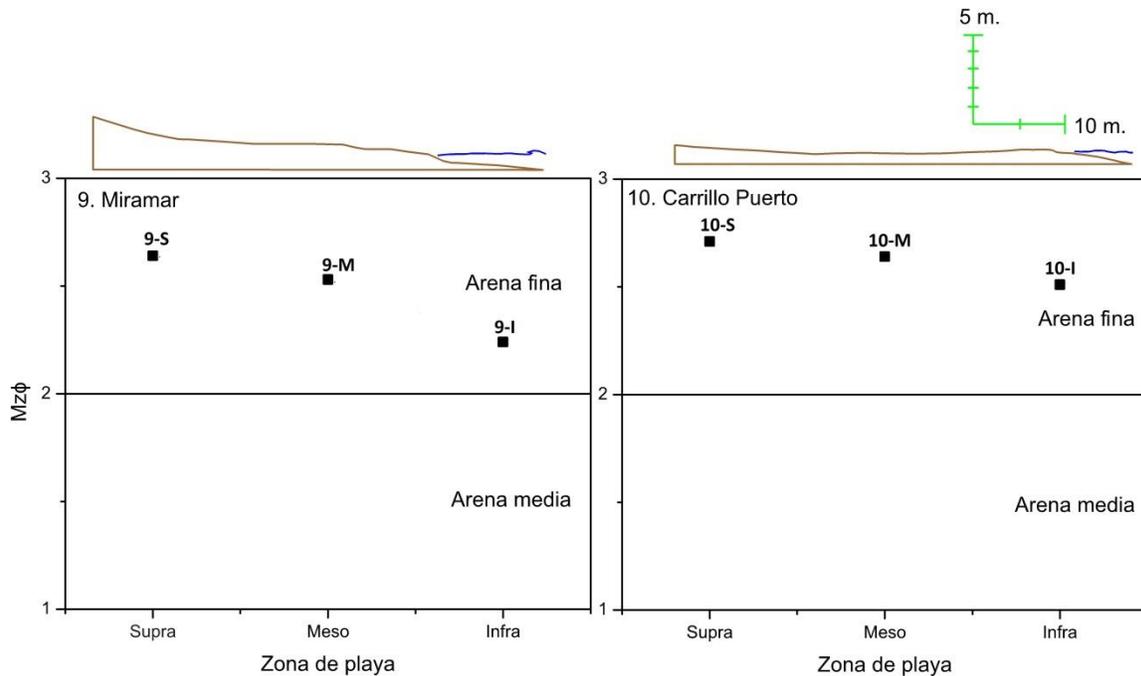


Figura 16. Playas 9 y 10. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

11. Playa El Bosque (Figura 17): el perfil tiene un ángulo de muy baja pendiente y amplia longitud de meso y supra playa, el análisis textural es de arena fina ya que tiene la influencia del río Grijalva que transporta sedimentos finos, que al ser mezclados con las partículas de la playa hace que su fracción arenosa disminuya en tamaño. Según las notas de campo realizadas al momento del muestreo se observaron arenas negras.
12. Playa La Estrella (Figura 17): la pendiente es de bajo ángulo y extensa mesoplaya y supraplaya; la granulometría es de arenas finas. El transporte litoral de sedimentos al ser hacia el occidente indica que tiene influencia del río San Pedro lo cual puede estar relacionado con el tamaño de partícula de la playa ya que los sedimentos que transporta el río son más finos debido, precisamente, a su transporte.

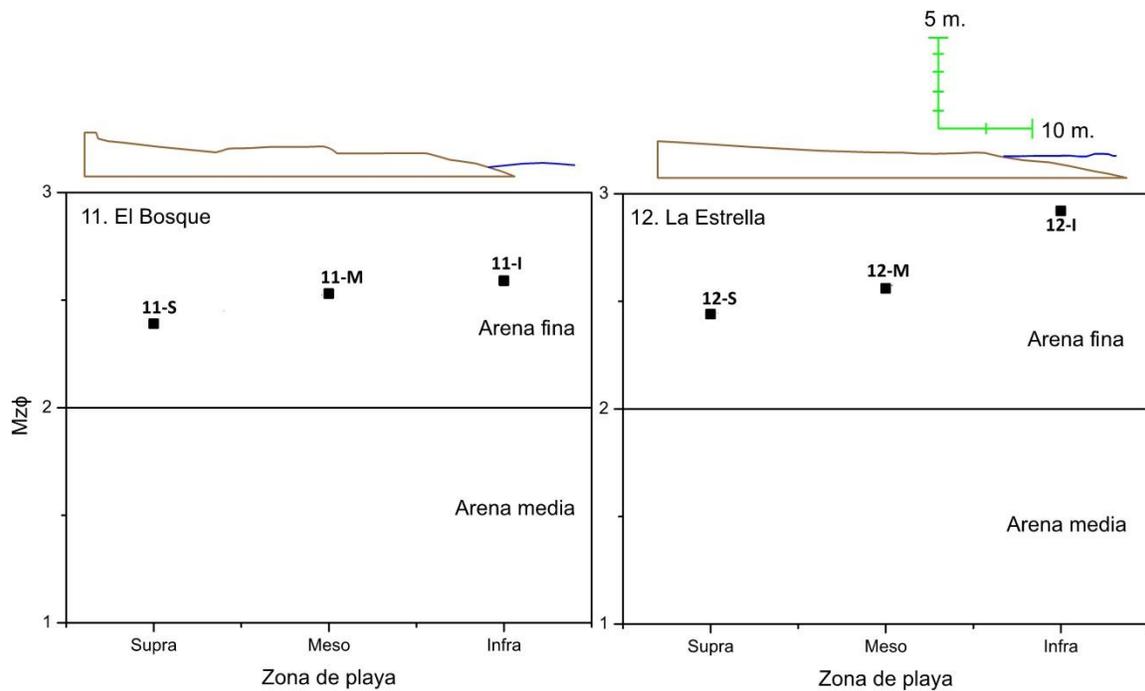


Figura 17. Playas 11 y 12. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

13. Playa Boquerón (Figura 18): el perfil tiene un ángulo de pendiente muy bajo, canales y barras en infraplaya lo cual genera la rompiente del oleaje; en cuanto al análisis textural es de arena fina en supraplaya indicando el transporte de los sedimentos más finos por el viento.
14. Playa Campechito (Figura 18): el perfil topográfico tiene un ángulo muy bajo en la zona de supraplaya y mesoplaya y aumenta hacia la infraplaya; la composición textural de las tres zonas es de arena fina.

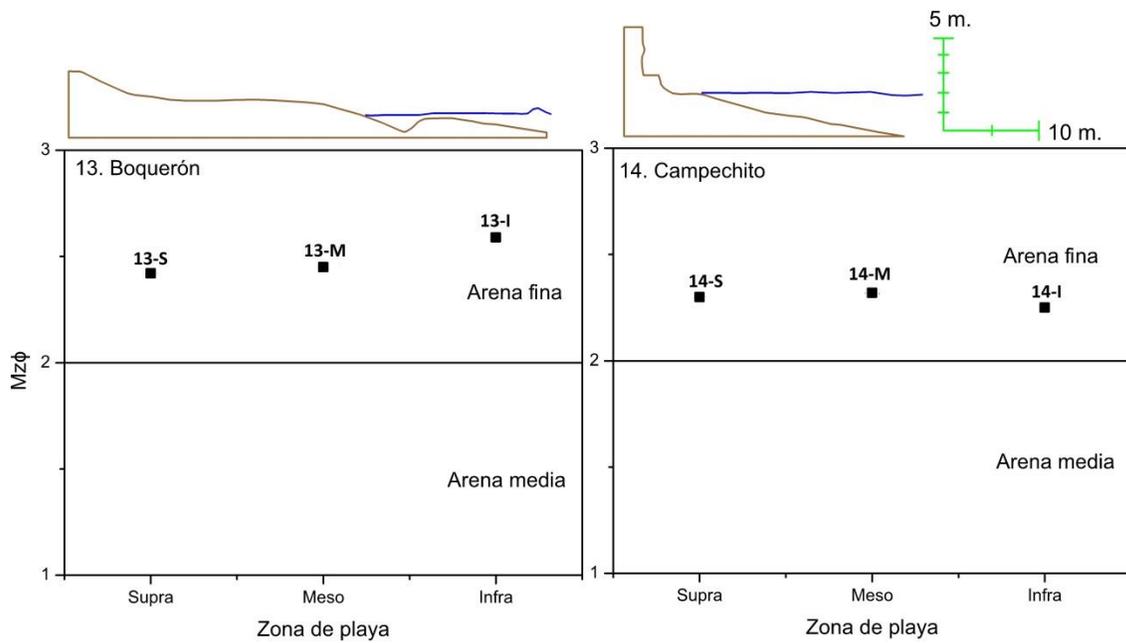


Figura 18. Playas 13 y 14. Perfiles de playa y variabilidad granulométrica en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

## 8.2 Parámetros texturales

El tamaño de las partículas en general varía desde arena fina a arena gruesa (Tabla 5), particularmente siendo esta última la muestra de mesoplaya de la playa Santa Ana. Lugar en donde se encuentra la zona urbana Sánchez Magallanes y está localizada, según notas de campo del momento del muestreo, una escollera que restringe la dinámica litoral de los sedimentos hacia el occidente, generando de esta manera zonas más propensas a la erosión al lado occidental de la escollera ya que se restringe el paso de sedimento en esa dirección.

En las playas 1 y 2, Tonalá y Pailebot, las partículas tienden a ser de tamaño fino a medio (Figura 19). Desde la playa 3 hasta la 8, playas Emiliano Zapata hasta Santa Ana, respectivamente, tienen texturas desde arena fina hasta arena gruesa, con tendencia a aumentar el tamaño de grano hacia el occidente. Debido a la dirección de la playa que es perpendicular a la llegada del oleaje y son más vulnerables a la acción de los factores exógenos como las corrientes litorales, el viento y el oleaje y las mareas en menor grado

haciendo que la energía de esta zona sea elevada y la remoción y transporte de granos más finos sea más eficiente dejando los sedimentos de arena media y gruesa.

La muestra de sedimento más fino es de infraplaya de la playa La Estrella, localizada en la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta. En esta zona desde la playa 9 hasta la 14, desde Miramar hasta Campechito, respectivamente, se puede diferenciar un sector de playas de arenas finas en infra, meso y supraplaya, debido a su cercanía con la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, el cual a causa de su extensión, cauce y represamiento, tiene un transporte mayoritariamente de sedimentos finos que se depositan en las playas adyacentes (Figura 19).

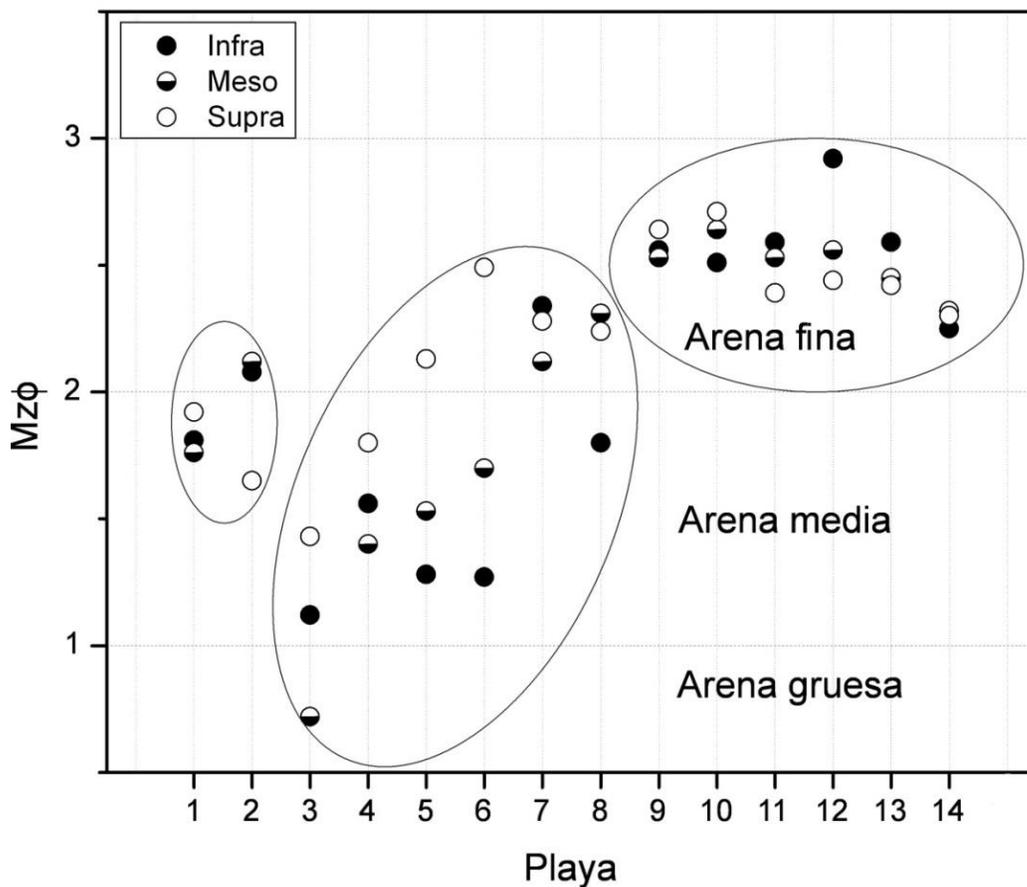


Figura 19. Tamaño de partículas (Mzφ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

La desviación media gráfica inclusiva ( $\sigma_{I\phi}$ ) indica que los sedimentos están, en su mayoría, entre moderadamente bien y bien clasificados (Figura 20), lo que indica que tan similares son los tamaños de las partículas del sedimento. Las playas 2 y 3, que presentan moderadamente y mala clasificación en la zona de infraplaya, pueden indicar una mayor energía (corrientes y oleaje) lo cual genera una mezcla de tamaños de sedimentos.

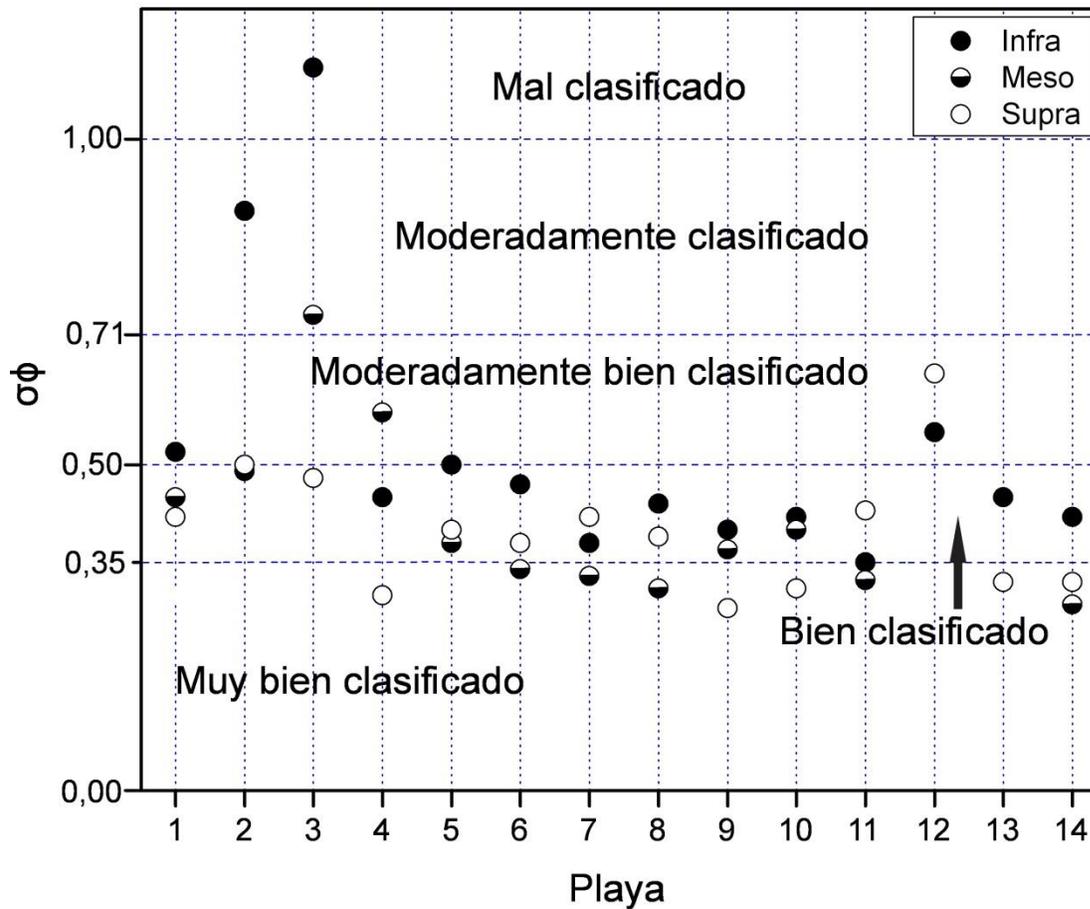


Figura 20. Desviación media gráfica inclusiva ( $\sigma_{I\phi}$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

Tabla 5.- Parámetros texturales de los sedimentos en infraplaya (I), mesoplaya (M) y supraplaya (S) de 14 playas de los estados de Tabasco y Campeche.  $Mz\phi$ : tamaño de partícula.  $\sigma_1\phi$ : desviación media gráfica inclusiva.  $Ski$ : Asimetría.  $K_G$ : Curtosis. M.A: Muy asimétrico. A: Asimétrico.

| Muestras | $Mz\phi$ | $\sigma_1\phi$ (clasificada)* | $Ski$        | $K_G$            |
|----------|----------|-------------------------------|--------------|------------------|
| 1-I      | Media    | Moderadamente bien*           | Simétrico    | Platicúrtico     |
| 1-M      | Media    | Bien*                         | Simétrico    | Platicúrtico     |
| 1-S      | Media    | Bien                          | Simétrico    | Platicúrtico     |
| 2-I      | Fina     | Moderadamente*                | M.A. Gruesos | Leptocúrtico     |
| 2-M      | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Platicúrtico     |
| 2-S      | Media    | Moderadamente bien            | A.Finos      | Mesocúrtico      |
| 3-I      | Media    | Mal                           | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 3-M      | Gruesa   | Moderadamente                 | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 3-S      | Media    | Bien                          | A.Finos      | Muy leptocúrtico |
| 4-I      | Media    | Bien                          | Simétrico    | Leptocúrtico     |
| 4-M      | Media    | Moderadamente bien            | M.A. Gruesos | Muy leptocúrtico |
| 4-S      | Media    | Muy bien*                     | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 5-I      | Media    | Moderadamente bien            | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 5-M      | Media    | Bien                          | Simétrico    | Leptocúrtico     |
| 5-S      | Fina     | Bien                          | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 6-I      | Media    | Bien                          | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 6-M      | Media    | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 6-S      | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Muy leptocúrtico |
| 7-I      | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 7-M      | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 7-S      | Fina     | Bien                          | Simétrico    | Leptocúrtico     |
| 8-I      | Media    | Bien                          | A.Finos      | Mesocúrtico      |
| 8-M      | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 8-S      | Fina     | Bien                          | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 9-I      | Fina     | Bien                          | M.A. Gruesos | Leptocúrtico     |
| 9-M      | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 9-S      | Fina     | Muy bien                      | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 10-I     | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 10-M     | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 10-S     | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Leptocúrtico     |
| 11-I     | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 11-M     | Fina     | Muy bien                      | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 11-S     | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 12-I     | Fina     | Moderadamente bien            | M.A. Gruesos | Leptocúrtico     |
| 12-M     | Fina     | Moderadamente bien            | A. Gruesos   | Leptocúrtico     |
| 12-S     | Fina     | Moderadamente bien            | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 13-I     | Fina     | Bien                          | Simétrico    | Leptocúrtico     |
| 13-M     | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 13-S     | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |
| 14-I     | Fina     | Bien                          | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 14-M     | Fina     | Muy bien                      | A. Gruesos   | Mesocúrtico      |
| 14-S     | Fina     | Muy bien                      | Simétrico    | Mesocúrtico      |

Asimetría ( $SK_i$ ), indica el exceso, carencia o buena distribución de las partículas, de un determinado tamaño en el sedimento, puede ser exceso de partículas finas o gruesas (Arias-Madrid et al., 2012). Se presenta desde muy asimétrico hacia los gruesos hasta asimétrico hacia los finos, estando en mayor proporción los datos distribuidos en casi simétrico y asimétrico hacia los gruesos (Figura 21).

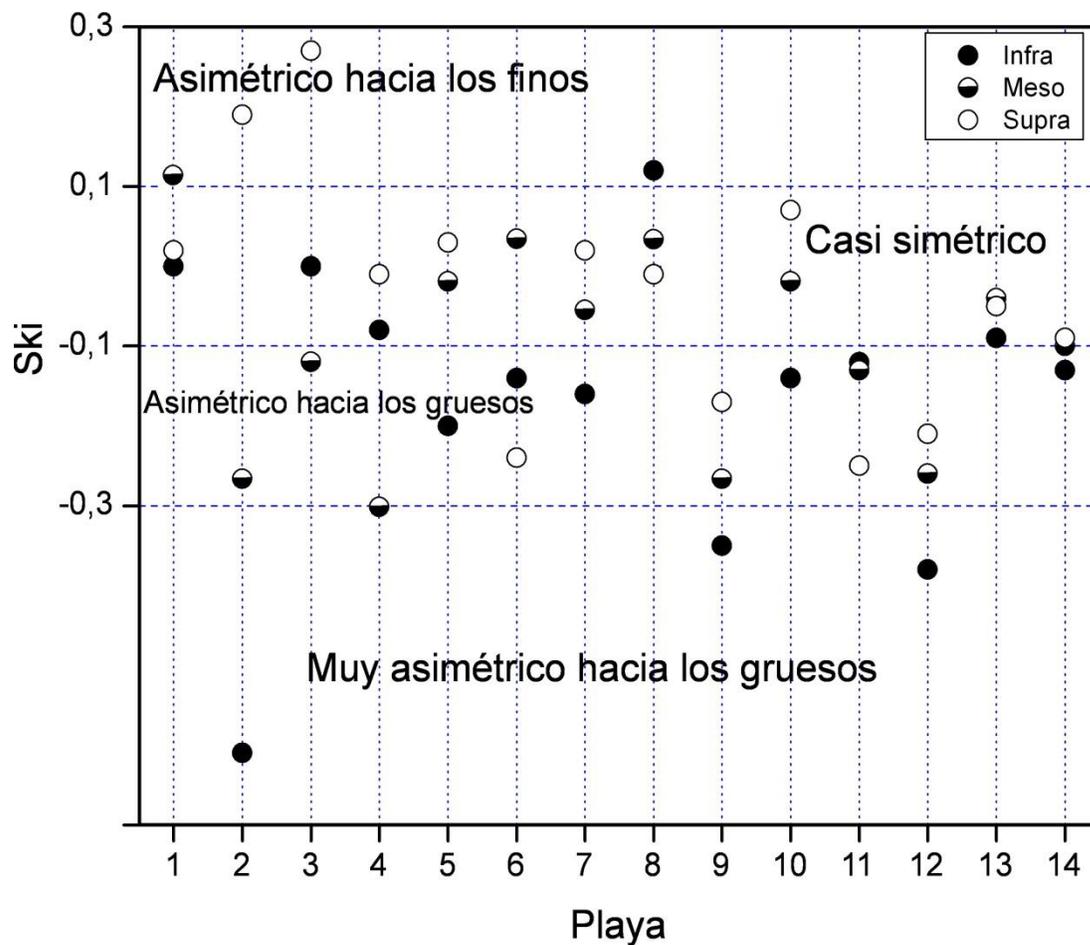


Figura 21. Asimetría ( $SK_i$ ) de arenas de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

Las 2 playas con tendencia más marcada hacia asimetría de los sedimentos finos, Pailebot y Santa Ana, son las muestras de supraplaya indicando una carencia de sedimentos finos en la muestras; caso contrario en la zona de infraplaya de Pailebot, Miramar y la Estrella en

donde las arenas son de asimetría pronunciada hacia los gruesos indicando la carencia de partículas de tamaño grueso y comparando con los resultados de tamaño de partícula, en dichas playas en infraplaya es de tamaño arena fina.

La curtosis ( $K_G$ ) indica la concentración y distribución de los tamaños de grano con respecto a la media. Está entre muy leptocúrtica, en los sedimentos de supraplaya de Playa Azul, posiblemente por el tamaño fino que predomina en la zona, y platicúrtica, pero en mayores proporciones las muestras se encuentran en mesocúrtica (Figura 22).

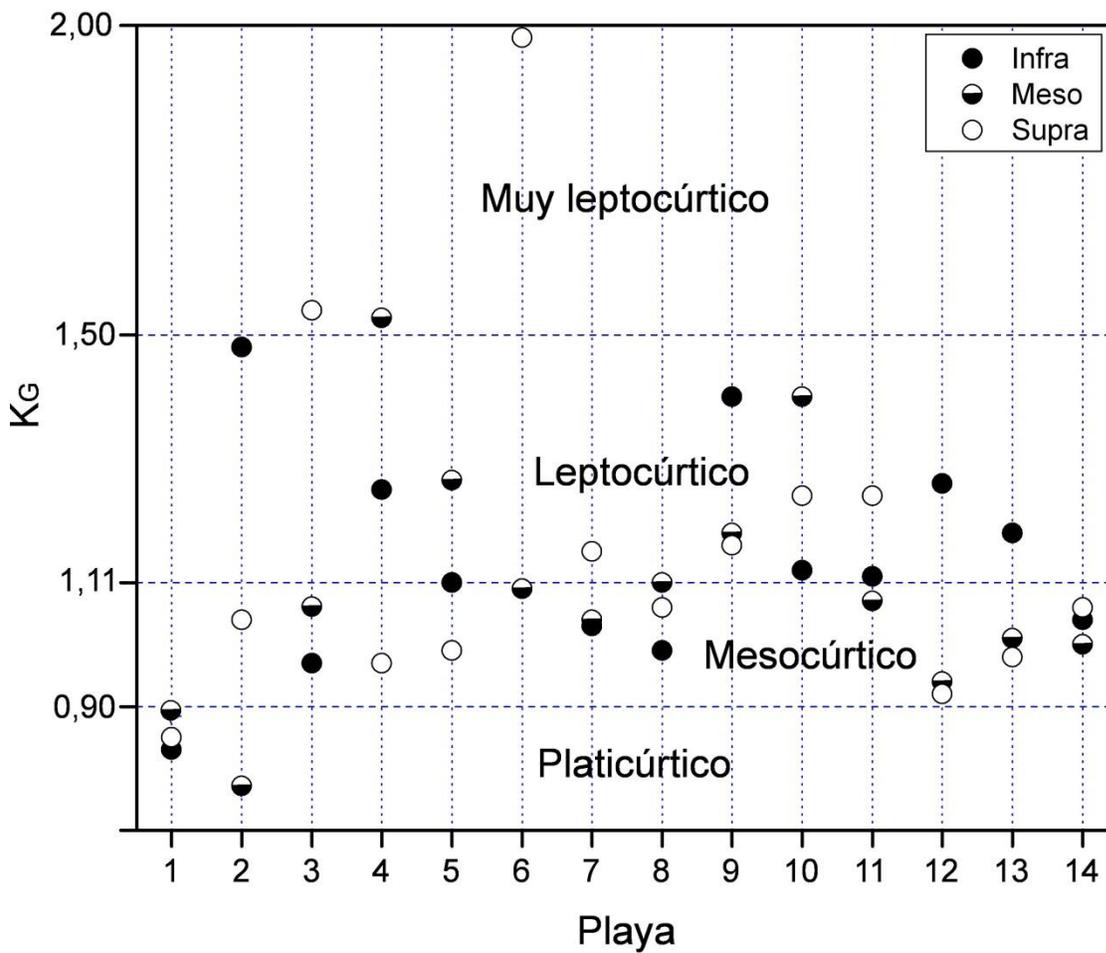


Figura 22. Curtosis ( $K_G$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

Las playas 2, 3 y 4 tienen valores distantes en la curtosis en sus zonas de playa desde platicúrtico a muy leptocúrtico, indicando que tienen variabilidad en el tamaño de las partículas y en la distribución de los sedimentos a lo largo del perfil de la playa. Caso contrario a la playa 14, en donde en todo el perfil se tiene una distribución normal de los tamaños de partículas con una leve tendencia hacia un tamaño de grano y comparando este resultado con el tamaño de sedimento de dicha playa, el tamaño es de arena fina.

### 8.3 Composición de las arenas de playa

Los componentes de las arenas se clasificaron en terrígenos y biógenos (Tabla 6), luego en la fracción terrígena se registraron 9 campos mineralógicos: Qt (cuarzo total), Fk (feldespato potásico), Fp (plagioclasa), Lv (fragmentos líticos volcánicos), Ls (fragmentos líticos sedimentarios), Lm (fragmentos líticos metamórficos), Lp (fragmentos líticos plutónicos), Mi (micas) y MP (minerales pesados) (Tabla 7).

Tabla 6.- Porcentaje de sedimentos terrígenos y biógenos.

| Muestra | Terrígenos | Biógenos |
|---------|------------|----------|
| 1-I     | 100        | 0        |
| 1-M     | 100        | 0        |
| 1-S     | 100        | 0        |
| 2-I     | 98         | 2        |
| 2-M     | 100        | 0        |
| 2-S     | 100        | 0        |
| 3-I     | 100        | 0        |
| 3-M     | 97         | 3        |
| 3-S     | 100        | 0        |
| 4-I     | 100        | 0        |
| 4-M     | 100        | 0        |
| 4-S     | 98         | 2        |
| 5-I     | 98         | 2        |
| 5-M     | 100        | 0        |
| 5-S     | 98         | 2        |
| 6-I     | 100        | 0        |

| Muestra | Terrígenos | Biógenos |
|---------|------------|----------|
| 6-M     | 99         | 1        |
| 6-S     | 97         | 3        |
| 7-I     | 96         | 4        |
| 7-M     | 97         | 3        |
| 7-S     | 99         | 1        |
| 8-I     | 100        | 0        |
| 8-M     | 100        | 0        |
| 8-S     | 100        | 0        |
| 9-I     | 95         | 5        |
| 9-M     | 96         | 4        |
| 9-S     | 97         | 3        |
| 10-I    | 94         | 6        |
| 10-M    | 90         | 10       |
| 10-S    | 92         | 8        |
| 11-I    | 92         | 8        |
| 11-M    | 93         | 7        |
| 11-S    | 95         | 5        |
| 12-I    | 86         | 14       |
| 12-M    | 89         | 11       |
| 12-S    | 86         | 14       |
| 13-I    | 82         | 18       |
| 13-M    | 99         | 1        |
| 13-S    | 99         | 1        |
| 14-I    | 86         | 14       |
| 14-M    | 83         | 17       |
| 14-S    | 98         | 2        |

\*Cont. Tabla 6. I: Infraplaya. M: Mesoplaya. S: Supraplaya.

Tabla 7.-Composición de las arenas de playa.

Los porcentajes son relativos al análisis modal. Porcentaje: Qt+Ft+Lt+Mi+MP=100%. Qt: cuarzo total; Fk: feldespatos potásicos; Fp: feldespato plagioclasa; Ft: feldespatos totales; Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lm: fragmentos líticos metamórficos; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Mi: micas; MP: minerales pesados.

| Muestra | Qt | Fk | Fp | Ft | Lv | Ls | Lm | Lp | Lt | Mi | MP |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1-I     | 51 | 8  | 4  | 12 | 7  | 20 | 6  | 1  | 34 | 0  | 3  |
| 1-M     | 39 | 9  | 4  | 13 | 8  | 28 | 11 | 0  | 47 | 0  | 1  |
| 1-S     | 50 | 12 | 3  | 15 | 2  | 19 | 12 | 0  | 33 | 1  | 1  |
| 2-I     | 43 | 3  | 3  | 6  | 7  | 11 | 27 | 3  | 48 | 2  | 1  |
| 2-M     | 51 | 2  | 4  | 6  | 5  | 13 | 23 | 0  | 41 | 1  | 1  |
| 2-S     | 48 | 5  | 4  | 9  | 5  | 4  | 32 | 0  | 41 | 0  | 2  |
| 3-I     | 54 | 6  | 3  | 9  | 0  | 24 | 7  | 2  | 33 | 0  | 4  |
| 3-M     | 54 | 1  | 5  | 6  | 0  | 30 | 6  | 3  | 39 | 1  | 0  |
| 3-S     | 63 | 1  | 7  | 8  | 0  | 19 | 5  | 3  | 27 | 0  | 2  |
| 4-I     | 35 | 14 | 3  | 17 | 2  | 13 | 18 | 0  | 33 | 10 | 5  |
| 4-M     | 52 | 7  | 4  | 11 | 0  | 24 | 4  | 1  | 29 | 4  | 4  |
| 4-S     | 32 | 9  | 4  | 13 | 0  | 3  | 18 | 2  | 23 | 18 | 14 |
| 5-I     | 54 | 4  | 8  | 12 | 2  | 7  | 20 | 1  | 30 | 3  | 1  |
| 5-M     | 60 | 3  | 4  | 7  | 1  | 1  | 16 | 2  | 20 | 8  | 5  |
| 5-S     | 51 | 5  | 7  | 12 | 9  | 2  | 24 | 1  | 36 | 0  | 1  |
| 6-I     | 27 | 16 | 5  | 21 | 7  | 16 | 25 | 1  | 49 | 2  | 1  |
| 6-M     | 48 | 9  | 5  | 14 | 4  | 11 | 18 | 1  | 34 | 1  | 3  |
| 6-S     | 55 | 1  | 5  | 6  | 14 | 0  | 20 | 2  | 36 | 3  | 0  |
| 7-I     | 54 | 0  | 4  | 4  | 20 | 9  | 9  | 1  | 39 | 1  | 2  |
| 7-M     | 58 | 2  | 7  | 9  | 15 | 9  | 6  | 1  | 31 | 1  | 1  |
| 7-S     | 57 | 2  | 1  | 3  | 13 | 6  | 10 | 2  | 31 | 7  | 2  |
| 8-I     | 44 | 4  | 4  | 8  | 5  | 33 | 8  | 1  | 47 | 1  | 0  |
| 8-M     | 54 | 1  | 2  | 3  | 10 | 19 | 8  | 1  | 38 | 4  | 1  |
| 8-S     | 57 | 5  | 2  | 7  | 6  | 15 | 9  | 1  | 31 | 5  | 0  |
| 9-I     | 58 | 1  | 2  | 3  | 10 | 14 | 10 | 2  | 36 | 2  | 1  |
| 9-M     | 41 | 6  | 4  | 10 | 9  | 15 | 18 | 4  | 46 | 0  | 3  |
| 9-S     | 44 | 4  | 4  | 8  | 8  | 24 | 11 | 4  | 47 | 0  | 1  |
| 10-I    | 51 | 6  | 3  | 9  | 8  | 5  | 20 | 1  | 34 | 2  | 4  |
| 10-M    | 56 | 1  | 4  | 5  | 5  | 0  | 4  | 2  | 11 | 9  | 19 |
| 10-S    | 51 | 7  | 3  | 10 | 11 | 2  | 12 | 4  | 29 | 2  | 8  |
| 11-I    | 56 | 4  | 4  | 8  | 1  | 30 | 2  | 1  | 34 | 2  | 0  |
| 11-M    | 52 | 6  | 4  | 10 | 0  | 33 | 2  | 3  | 38 | 0  | 0  |
| 11-S    | 71 | 12 | 1  | 13 | 8  | 1  | 1  | 2  | 12 | 1  | 3  |
| 12-I    | 29 | 0  | 1  | 1  | 2  | 56 | 6  | 0  | 64 | 5  | 1  |

| Muestra | Qt | Fk | Fp | Ft | Lv | Ls | Lm | Lp | Lt | Mi | MP |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 12-M    | 48 | 1  | 3  | 4  | 0  | 37 | 6  | 3  | 46 | 2  | 0  |
| 12-S    | 52 | 1  | 2  | 3  | 0  | 40 | 2  | 1  | 43 | 2  | 0  |
| 13-I    | 32 | 11 | 2  | 13 | 15 | 14 | 22 | 1  | 52 | 0  | 3  |
| 13-M    | 30 | 11 | 2  | 13 | 8  | 33 | 14 | 1  | 56 | 1  | 0  |
| 13-S    | 28 | 13 | 1  | 14 | 12 | 26 | 15 | 1  | 54 | 2  | 2  |
| 14-I    | 43 | 16 | 4  | 20 | 0  | 17 | 11 | 2  | 30 | 2  | 5  |
| 14-M    | 50 | 5  | 5  | 10 | 0  | 17 | 11 | 1  | 29 | 5  | 6  |
| 14-S    | 1  | 1  | 1  | 2  | 0  | 1  | 1  | 1  | 3  | 1  | 93 |

\*Cont. Tabla 7.

La observación de los minerales bajo el microscopio ayuda a determinar la composición de los sedimentos de las playas, como ejemplo de las arenas descritas en lámina delgada se tienen las siguientes:

Playa Campechito (14-S) (Figura 23, A-B) en supraplaya compuesta por minerales pesados (MP) los cuales son opacos, subangulares, posiblemente son magnetitas y cromitas; hornblenda (Hbl) de color castaño, con hábito prismático, extinción de 20°, relieve alto y birrefringencia moderada; zircón (Zrn) incoloro, relieve muy alto y birrefringencia muy fuerte, y monazita (Mnz)? incolora, relieve muy alto y birrefringencia muy fuerte.

En los sedimentos de Playa Azul (6-I) (Figura 23, C-D) en infraplaya se encuentran cuarzos (Qz) posiblemente recristalizados por metamorfismo, con contornos fuertes entre los granos y suturados, y extinción ondulante, y cuarzos monocristalinos de bajo relieve y débil birrefringencia; feldespato potásico (Fsp) microclina, de bajo relieve, birrefringencia débil y maclado en dos direcciones formando un ángulo de 90°; fragmentos de líticos sedimentarios (Ls) de areniscas cuarzosas de granos redondeados en matriz, y otros fragmentos sedimentarios que presentan cierto grado de oxidación.

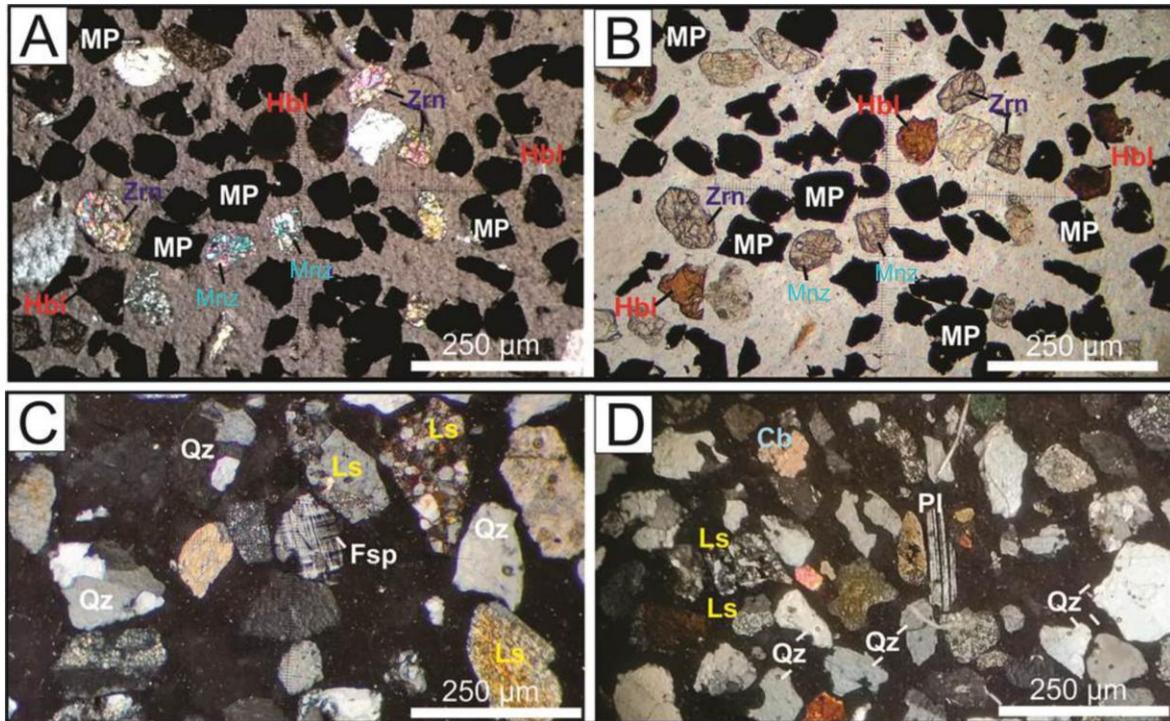


Figura 23. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A: playa Campechito (14-S) (LPP). B: playa Campechito (14-S) (XPL). C: playa El Limón (6-I) (XPL). D: playa El Limón (6-I) (LPP). MP: minerales pesados. Hbl: Hornblenda. Zrn: Zircón. Qz: cuarzo. Mnz: Monazita. Fsp: feldespato potásico. Cb: carbonato. Pl: plagioclasa. Ls: fragmento lítico sedimentario. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados.

En la lámina D (Figura 23, D) se observa también en las arenas de la playa El Limón presencia de carbonatos (Cb) de forma anhédrica, exfoliación perfecta romboédrica y de birrefringencia extrema; y, por último, la plagioclasa (Pl) de bajo relieve, birrefringencia débil y macla polisintética.

En la playa Pailebot (2-S) (Figura 24, A-B) en supraplaya se encontraron en los sedimentos fragmentos líticos sedimentarios (Ls) de limolitas mal clasificadas y de areniscas cuarzosas, cuarzos mono y policristalinos, de bajo relieve y débil birrefringencia con extinción suavemente ondulante, lo cual puede indicar cierto grado de metamorfismo.

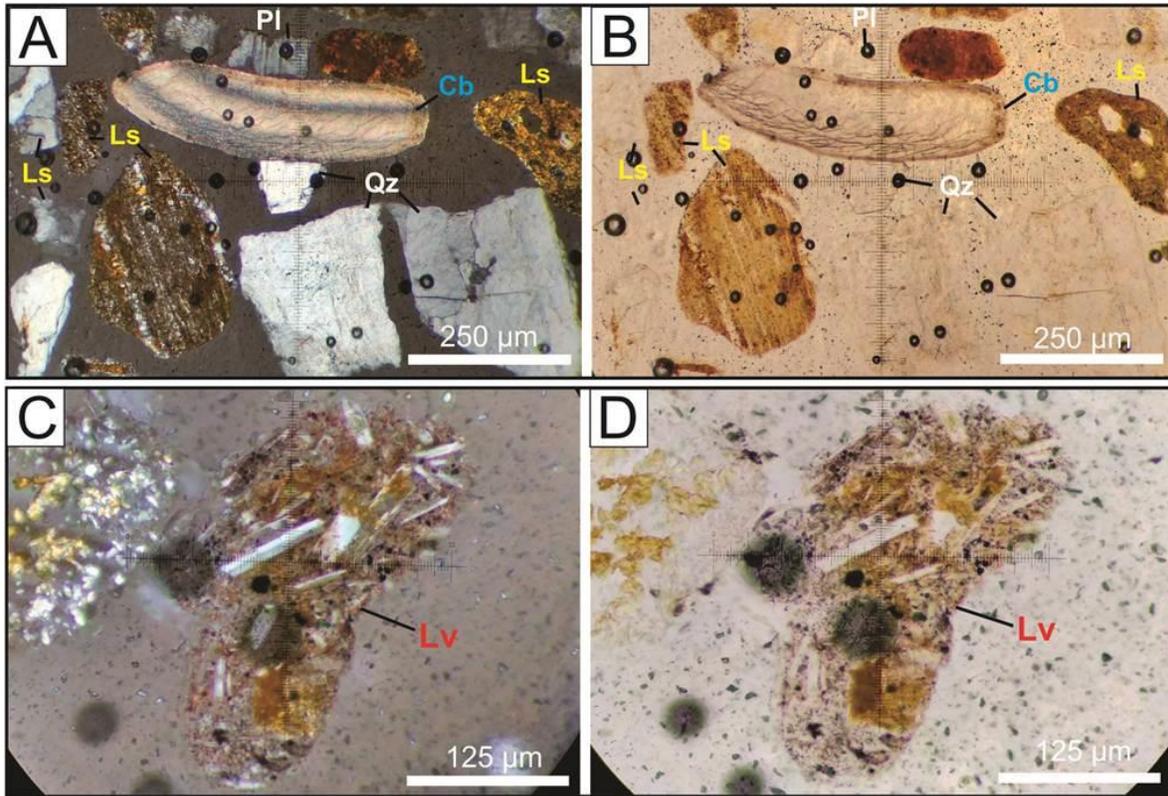


Figura 24. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A, C: playa Pailebot (6-I) (XPL). B, D: playa Pailebot (6-I) (LPP). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Pl: plagioclasa. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lv: fragmento lítico volcánico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados.

También se encontró plagioclasa (Pl) con poca alteración y macla polisintética, y carbonato (Cb) con forma elongada, birrefringencia extrema, posiblemente el resto de una concha, y un fragmento lítico volcánico (Lv) (Figura 24, C-D) de tamaño arena fina, redondeado, elongado, con cristales de plagioclasas y minerales opacos en matriz microcristalina.

Los sedimentos de la playa Tonalá (1-S) (Figura 25, A-B) están compuestos por cuarzo (Qz) monocristalino, subredondeado y cuarzo policristalino con suturas en los contornos de los cristales a causa de metamorfismo, fragmentos líticos sedimentarios (Ls) de areniscas cuarzosas mal clasificadas y fragmentos líticos metamórficos (Lm) de pizarras, en las que se observan los minerales orientados como cuarzos y micas. En la playa El Bosque (11-I) (Figura 25, C-D) en infraplaya se determinaron restos vegetales de colores castaño, pardo,

amarillo y algunos traslúcidos, con estructuras amorfas de origen orgánico. También se observaron carbonatos (Cb) de restos de conchas y otros materiales orgánicos no identificados.

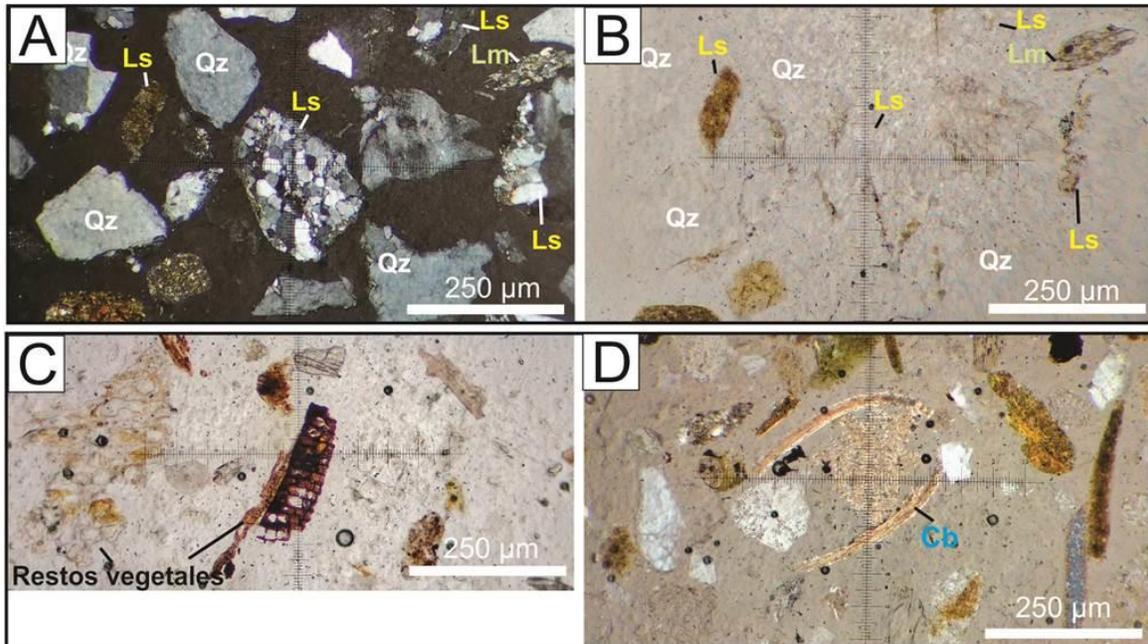


Figura 25. Láminas delgadas de arenas de playa. A: playa Tonalá (1-S) (XPL). B: playa Tonalá (1-S) (LPP). C: playa El Bosque (11-I) (LPP). D: playa El Bosque (11-I) (XPL). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lm: fragmento lítico metamórfico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados.

En los sedimentos de la playa La Estrella (12-M) (Figura 26, A-B) se encontraron carbonatos (Cb) de forma anhédrica, exfoliación perfecta romboédrica y de birrefringencia extrema, cuarzos (Qz) monocristalinos, subredondeados, feldespatos potásicos (Fsp) que presentan la evidencia de la influencia de rocas ígneas plutónicas, fragmentos líticos sedimentarios (Ls) de areniscas cuarzosas con parcial oxidación y fragmentos líticos metamórficos (Lm) de pizarras con cristales orientados de cuarzo y micas. En la playa Boquerón (13-M) se encontró glauconita (Glt) (Figura 26, C) de color verde-amarillento, de relieve moderado, birrefringencia de moderada a fuerte, se presenta generalmente en sedimentos con influencia marina ya que es un silicato hidratado de hierro y potasio, y en infraplaya (Figura 26, D) se registraron cuarzos (Qz) monocristalinos, fragmentos líticos

metamórficos (Lm) de pizarras, fragmentos líticos sedimentarios (Ls) de areniscas cuarcíferas y fragmento de lítico volcánico (Lv).

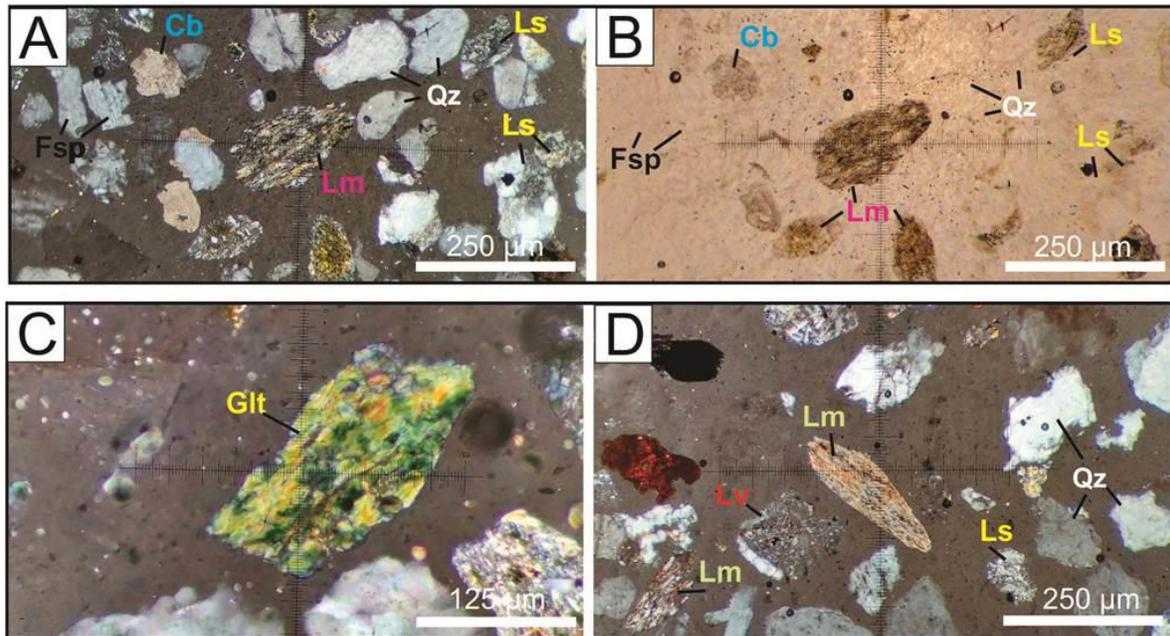


Figura 26. Láminas delgadas de muestras de arenas de playa. A: playa La Estrella (12-M) (XPL). B: La Estrella (12-M) (LPP). C: playa Boquerón (13-M) (XPL). D: playa Boquerón (13-I) (XPL). Qz: cuarzo. Cb: carbonato. Fsp: feldespato potásico. Glt: Glauconita. Ls: fragmento lítico sedimentario. Lm: fragmento lítico metamórfico. LPP: Luz plano polarizada. XPL: nicoles cruzados.

#### 8.4 Geoquímica de elementos mayores

El resultado de la concentración de elementos mayores tiene diferencias en infraplaya y mesoplaya y supraplaya, y la localización de la playa a lo largo del litoral. En la Tabla 8 queda registrada la concentración de los elementos mayores de las arenas. Valores altos de PPC (pérdida por calcinación) reflejan la presencia de materia orgánica en la muestra de sedimento.

Tabla 8.- Concentración de elementos mayores en peso % de las arenas de playas en Tabasco y Campeche. SUMAT = sumatoria total, PPC = pérdida por calcinación.

| Muestra | %SiO <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %TiO <sub>2</sub> | %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %MnO | %MgO | %CaO | %Na <sub>2</sub> O | %K <sub>2</sub> O | %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SUMAT  | %PPC |
|---------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------|------|
| 1-I     | 79.23             | 8.36                            | 0.24              | 2.42                            | 0.04 | 0.78 | 1.06 | 0.84               | 2.24              | 0.44                           | 98.04  | 2.39 |
| 1-M     | 81.73             | 8.01                            | 0.25              | 2.52                            | 0.04 | 0.76 | 1.06 | 0.85               | 2.11              | 0.44                           | 99.47  | 1.69 |
| 1-S     | 83.21             | 7.52                            | 0.22              | 2.23                            | 0.03 | 0.65 | 1.15 | 0.92               | 1.82              | 0.44                           | 99.76  | 1.56 |
| 2-I     | 76.35             | 9.51                            | 0.32              | 2.72                            | 0.03 | 1.06 | 2.17 | 1.53               | 2.31              | 0.44                           | 99.62  | 3.16 |
| 2-M     | 77.74             | 9.27                            | 0.26              | 2.62                            | 0.03 | 1.01 | 1.38 | 1.22               | 2.03              | 0.44                           | 98.76  | 2.76 |
| 2-S     | 76.10             | 9.47                            | 0.21              | 2.14                            | 0.02 | 0.86 | 1.36 | 2.15               | 2.63              | 0.43                           | 99.22  | 3.85 |
| 3-I     | 79.92             | 8.41                            | 0.19              | 1.49                            | 0.03 | 0.74 | 2.64 | 1.03               | 2.66              | 0.43                           | 100.61 | 3.08 |
| 3-M     | 77.41             | 10.09                           | 0.40              | 2.78                            | 0.05 | 1.18 | 2.70 | 1.60               | 2.01              | 0.44                           | 100.33 | 2.24 |
| 3-S     | 86.20             | 7.76                            | 0.12              | 0.97                            | 0.01 | 0.25 | 1.25 | 0.82               | 2.29              | 0.44                           | 101.14 | 1.02 |
| 4-I     | 78.09             | 8.33                            | 0.50              | 3.27                            | 0.08 | 1.49 | 2.89 | 1.26               | 1.77              | 0.44                           | 99.56  | 1.46 |
| 4-M     | 79.15             | 8.24                            | 0.33              | 2.46                            | 0.06 | 1.17 | 2.81 | 0.80               | 2.12              | 0.44                           | 99.39  | 1.82 |
| 4-S     | 68.93             | 8.86                            | 1.17              | 6.59                            | 0.16 | 3.14 | 5.79 | 1.04               | 1.26              | 0.44                           | 98.79  | 1.42 |
| 5-I     | 81.52             | 8.23                            | 0.21              | 1.37                            | 0.04 | 0.67 | 2.31 | 1.19               | 2.25              | 0.44                           | 100.16 | 1.93 |
| 5-M     | 75.49             | 8.81                            | 0.85              | 4.36                            | 0.10 | 3.87 | 1.94 | 1.30               | 1.60              | 0.44                           | 99.88  | 1.12 |
| 5-S     | 80.88             | 8.58                            | 0.18              | 1.62                            | 0.03 | 0.71 | 1.83 | 0.71               | 1.27              | 2.20                           | 98.94  | 1.20 |
| 6-I     | 77.50             | 9.92                            | 0.26              | 1.93                            | 0.04 | 0.96 | 2.28 | 1.48               | 2.54              | 0.44                           | 99.48  | 2.15 |
| 6-M     | 78.77             | 9.36                            | 0.26              | 1.92                            | 0.04 | 0.94 | 2.50 | 1.35               | 1.96              | 0.44                           | 99.38  | 1.85 |
| 6-S     | 75.58             | 9.62                            | 0.57              | 3.18                            | 0.07 | 2.94 | 1.54 | 1.15               | 1.94              | 0.45                           | 98.53  | 1.48 |
| 7-I     | 76.13             | 10.25                           | 0.38              | 2.61                            | 0.04 | 1.29 | 2.20 | 1.56               | 2.19              | 0.44                           | 99.46  | 2.37 |
| 7-M     | 75.74             | 11.36                           | 0.14              | 1.42                            | 0.03 | 0.65 | 1.94 | 1.78               | 3.23              | 0.44                           | 98.80  | 2.08 |
| 7-S     | 77.41             | 10.09                           | 0.40              | 2.78                            | 0.05 | 1.18 | 2.70 | 1.60               | 2.01              | 0.44                           | 100.33 | 1.66 |
| 8-I     | 75.83             | 11.05                           | 0.24              | 1.75                            | 0.03 | 2.23 | 0.75 | 1.83               | 2.57              | 0.44                           | 98.69  | 1.98 |
| 8-M     | 74.59             | 10.63                           | 0.47              | 3.24                            | 0.06 | 1.55 | 2.80 | 1.61               | 1.92              | 0.44                           | 99.57  | 2.27 |
| 8-S     | 74.28             | 10.71                           | 0.44              | 3.24                            | 0.06 | 1.70 | 3.18 | 1.40               | 1.93              | 0.44                           | 99.47  | 2.08 |

| Muestra | %SiO <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %TiO <sub>2</sub> | %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %MnO | %MgO | %CaO | %Na <sub>2</sub> O | %K <sub>2</sub> O | %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SUMAT  | %PPC |
|---------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------|------|
| 9-I     | 68.46             | 12.12                           | 0.33              | 2.96                            | 0.05 | 1.39 | 3.07 | 2.10               | 2.72              | 0.43                           | 98.12  | 4.46 |
| 9-M     | 70.46             | 12.35                           | 0.26              | 2.86                            | 0.05 | 1.30 | 2.52 | 2.23               | 2.93              | 0.43                           | 99.50  | 4.10 |
| 9-S     | 72.13             | 11.69                           | 0.42              | 3.49                            | 0.05 | 1.61 | 2.63 | 1.18               | 2.50              | 0.43                           | 99.32  | 3.18 |
| 10-I    | 71.08             | 10.67                           | 0.49              | 3.22                            | 0.04 | 3.50 | 2.11 | 1.32               | 2.29              | 0.44                           | 99.46  | 4.31 |
| 10-M    | 49.75             | 9.06                            | 3.17              | 13.19                           | 0.27 | 5.39 | 9.04 | 0.86               | 0.92              | 1.37                           | 98.72  | 5.71 |
| 10-S    | 64.31             | 9.79                            | 1.18              | 5.39                            | 0.10 | 3.31 | 5.62 | 1.38               | 1.74              | 0.57                           | 99.47  | 5.59 |
| 11-I    | 66.76             | 11.03                           | 0.32              | 2.79                            | 0.03 | 2.06 | 3.65 | 1.79               | 2.68              | 0.41                           | 99.67  | 8.16 |
| 11-M    | 72.44             | 10.33                           | 0.26              | 2.12                            | 0.03 | 1.93 | 3.49 | 1.52               | 2.46              | 0.43                           | 99.61  | 4.59 |
| 11-S    | 68.73             | 9.23                            | 0.82              | 3.85                            | 0.07 | 2.79 | 5.06 | 1.40               | 1.74              | 0.43                           | 99.68  | 5.58 |
| 12-I    | 63.76             | 11.46                           | 0.39              | 3.34                            | 0.04 | 2.52 | 4.88 | 1.73               | 2.68              | 0.42                           | 99.37  | 8.14 |
| 12-M    | 64.93             | 11.24                           | 0.35              | 3.23                            | 0.04 | 2.46 | 4.78 | 1.70               | 2.75              | 0.42                           | 99.53  | 7.65 |
| 12-S    | 62.43             | 11.97                           | 0.34              | 3.59                            | 0.05 | 2.15 | 4.64 | 1.79               | 2.98              | 0.41                           | 98.92  | 8.57 |
| 13-I    | 71.23             | 8.86                            | 0.49              | 2.58                            | 0.04 | 2.50 | 4.25 | 1.10               | 2.11              | 0.42                           | 99.36  | 5.77 |
| 13-M    | 74.09             | 8.97                            | 0.23              | 1.92                            | 0.02 | 2.00 | 3.22 | 1.34               | 2.23              | 0.43                           | 99.37  | 4.92 |
| 13-S    | 75.34             | 8.73                            | 0.24              | 1.80                            | 0.02 | 1.70 | 2.81 | 1.34               | 2.31              | 0.43                           | 99.27  | 4.55 |
| 14-I    | 70.70             | 8.54                            | 0.60              | 2.78                            | 0.06 | 2.85 | 4.95 | 1.49               | 1.99              | 0.42                           | 100.67 | 6.30 |
| 14-M    | 70.62             | 8.13                            | 0.93              | 3.10                            | 0.07 | 3.09 | 4.88 | 1.20               | 1.65              | 0.42                           | 100.21 | 6.12 |
| 14-S    | 14.86             | 8.07                            | 17.80             | 38.95                           | 1.49 | 4.40 | 2.23 | 0.43               | 0.24              | 9.41                           | 98.04  | 0.00 |

\*Cont. Tabla 8.

La normalización de los elementos mayores se realizó para los sedimentos de cada playa, según tres conjuntos de datos para la corteza superior continental (UCC, por sus siglas en inglés), los cuales se encuentran en la metodología: 1. Promedio de las playas; 2. Rudnick (2003); 3. Taylor & McLennan (1985). Se realizó el conjunto de datos de normalización para comparar la composición de las playas localmente (Promedio de las playas), los datos de Rudnick (2003) con el fin de utilizar información más actualizada de la corteza

continental y Taylor & McLennan (1985) para tener como referente de información que se usa tradicionalmente.

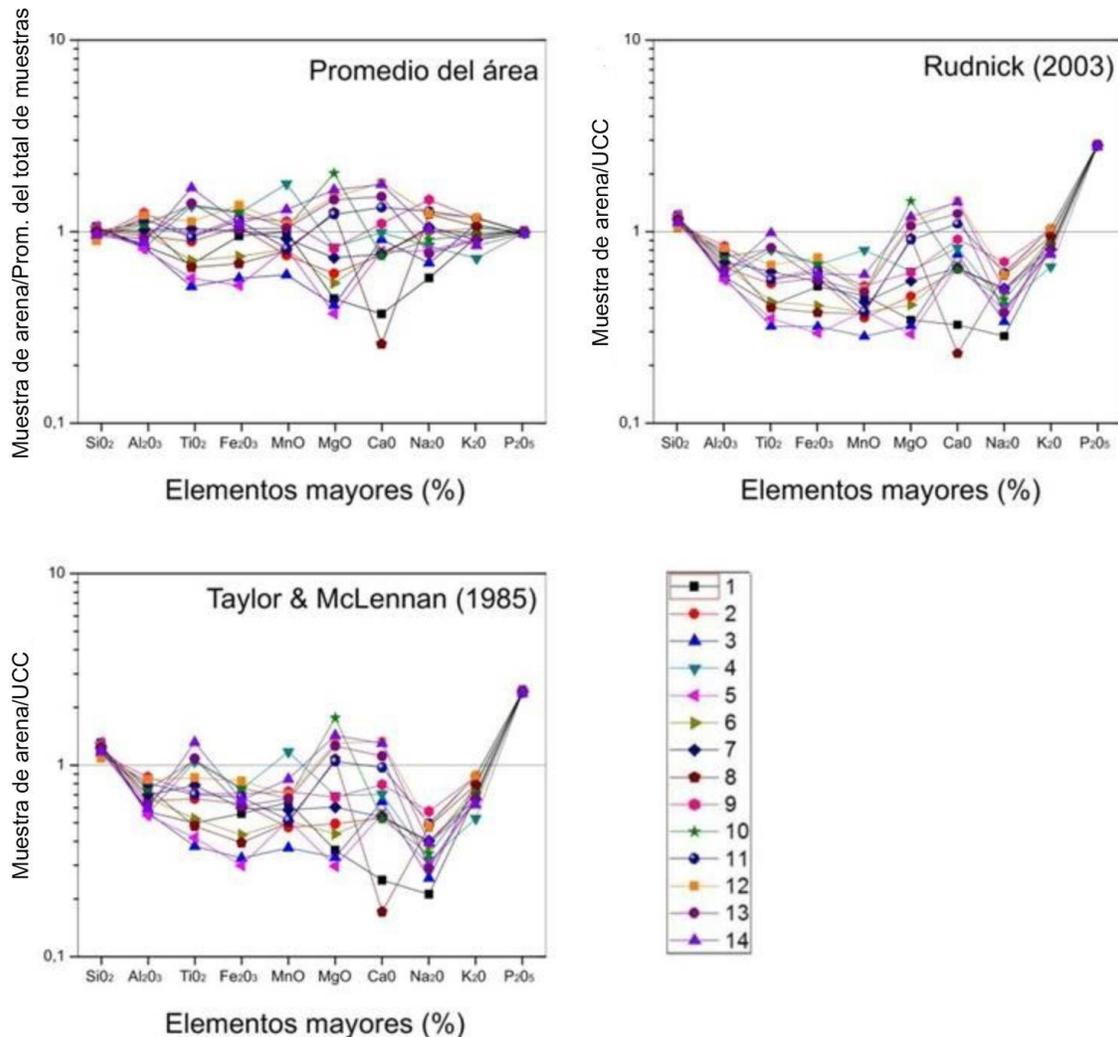


Figura 27. Normalización de elementos mayores de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

En infraplaya (Figura 27), el promedio de SiO<sub>2</sub> en comparación con la concentración propia de la zona no encuentra variaciones, ni tampoco el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; caso contrario sucede con los elementos como el Fe, Ti, MnO y MgO que sí tienen un enriquecimiento de las playas hacia el oriente, en la desembocadura del río Grijalva y también se puede evidenciar en la

normalización con los datos de la corteza continental superior. Lo cual sugiere que se están llevando a cabo diferentes procesos o que los factores como la fuente de los sedimentos es diferente en las playas hacia el oriente.

En el caso de mesoplaya (Figura 28), la playa Carrillo Puerto muestra valores más elevados de Fe, Ti, MnO y MgO, y todas continúan con el promedio para SiO<sub>2</sub> y valores altos para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

En supraplaya (Figura 29), igualmente que en mesoplaya, la tendencia de la concentración de los diferentes elementos según cada conjunto de datos normalizados sigue un mismo patrón. En este caso, en la playa Campechito, localizada en el extremo este del área de estudio, al mismo tiempo que decae su concentración de SiO<sub>2</sub> aumenta su contenido de Fe, Ti, MnO y MgO notoriamente. Igualmente, las playas desde la 10 a la 14, con influencia directa de la desembocadura del río Grijalva, presentan cierto enriquecimiento de dichos elementos. En este caso particular de Campechito (14), la concentración de dichos elementos puede ser a causa de algún tipo de factor que aumentó la energía de erosión en el área, como el paso de la tormenta Hermine.

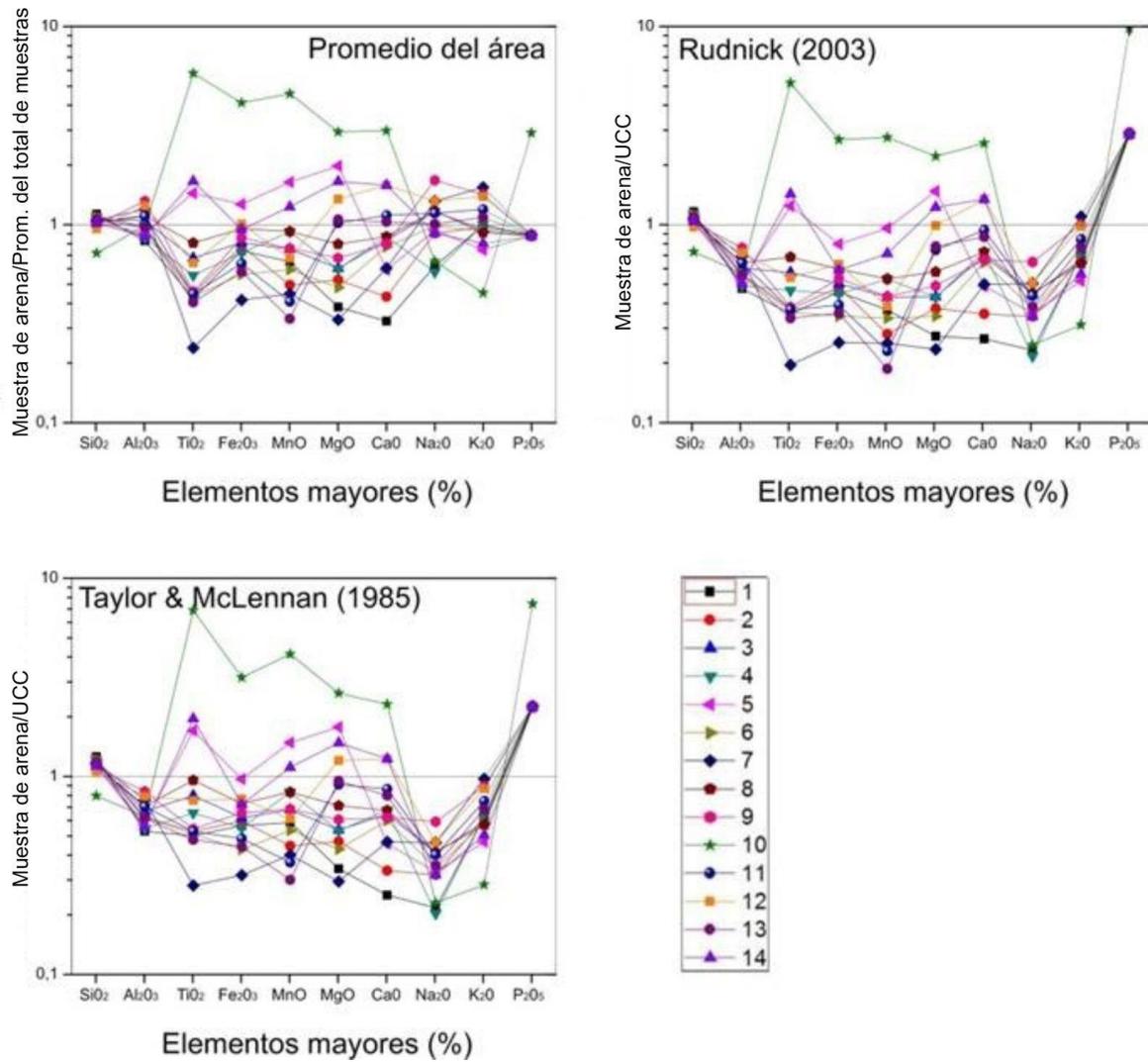


Figura 28. Normalización de elementos mayores de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

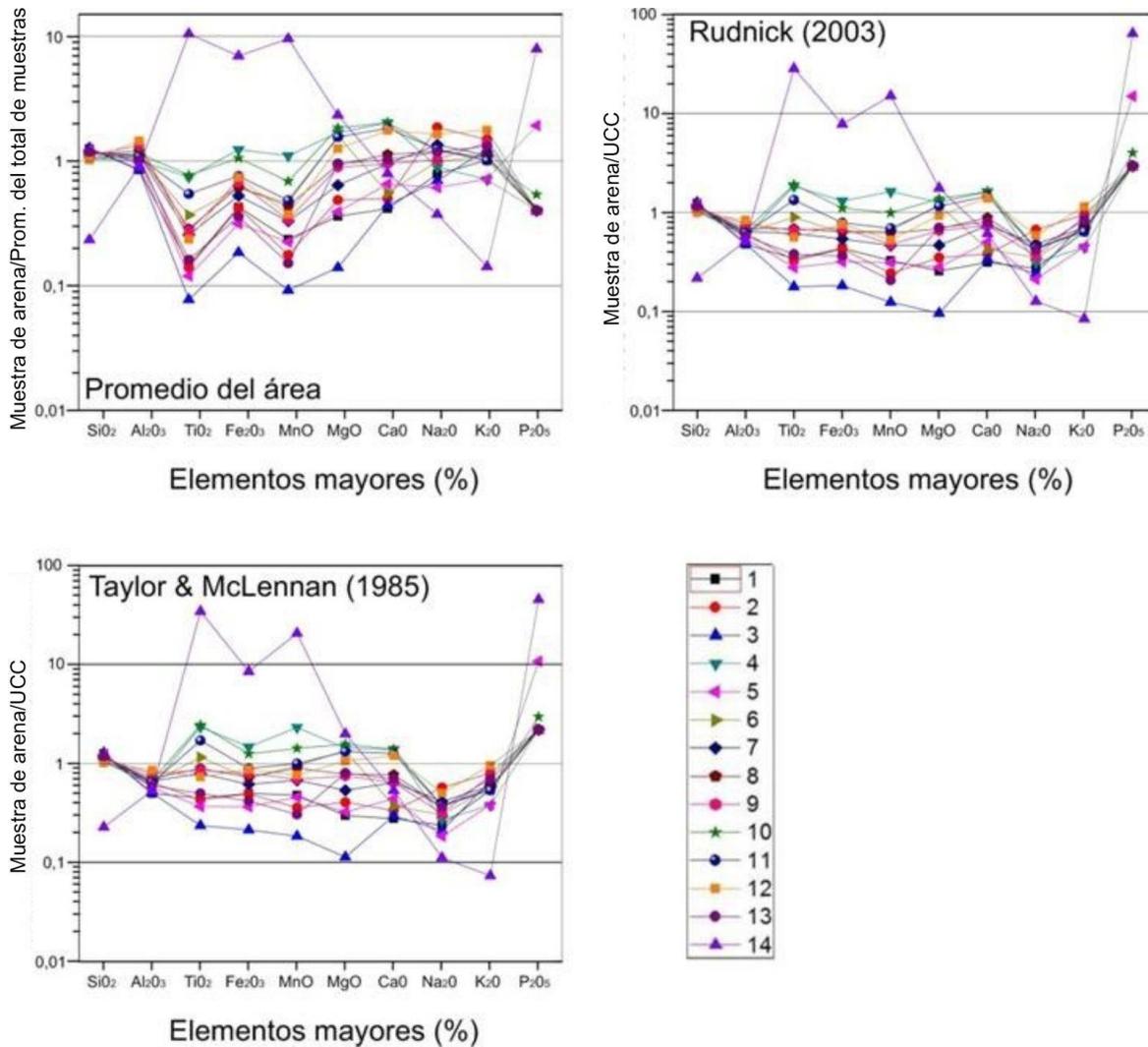


Figura 29. Normalización de elementos mayores de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

### 8.5 Geoquímica de elementos traza

La concentración de elementos traza (Tabla 9), tiene anomalías positivas para Cr, Ni, Zr, Y, Nb, Ba, Th y U, y se presentan con picos más altos hacia mesoplaya y supraplaya, lo cual puede estar asociado con la presencia de minerales pesados como cromita, ilmenita, magnetita y zircón.

Tabla 9.- Concentración de elementos traza en partes por millón (ppm) de arenas en las playas de Tabasco y Campeche.

| Muestra | Sc | V   | Cr  | Co | Ni | Rb | Sr  | Y  | Zr  | Nb | Cs | Ba  | Pb | Th | U |
|---------|----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|----|----|-----|----|----|---|
| 1-I     | 1  | 32  | 22  | 7  | 9  | 52 | 169 | 8  | 53  | 5  | 1  | 638 | 9  | 3  | 1 |
| 1-M     | 1  | 32  | 28  | 7  | 11 | 49 | 175 | 9  | 77  | 5  | 1  | 639 | 10 | 3  | 1 |
| 1-S     | 3  | 32  | 27  | 6  | 10 | 44 | 168 | 8  | 64  | 5  | 1  | 568 | 9  | 3  | 1 |
| 2-I     | 2  | 37  | 30  | 8  | 13 | 57 | 220 | 10 | 99  | 7  | 1  | 641 | 11 | 4  | 1 |
| 2-M     | 2  | 37  | 27  | 8  | 13 | 55 | 197 | 11 | 80  | 6  | 1  | 601 | 13 | 4  | 1 |
| 2-S     | 1  | 29  | 22  | 6  | 11 | 60 | 215 | 9  | 55  | 5  | 1  | 762 | 12 | 3  | 1 |
| 3-I     | -  | 21  | 17  | 5  | 8  | 58 | 233 | 7  | 46  | 4  | 1  | 792 | 11 | 3  | 1 |
| 3-M     | -  | 14  | 11  | 3  | 5  | 52 | 190 | 4  | 46  | 3  | 1  | 725 | 9  | 2  | 1 |
| 3-S     | -  | 18  | 12  | 3  | 6  | 47 | 187 | 4  | 43  | 3  | 1  | 644 | 12 | 2  | 0 |
| 4-I     | 5  | 64  | 63  | 7  | 12 | 39 | 266 | 17 | 47  | 11 | 1  | 547 | 10 | 4  | 1 |
| 4-M     | 3  | 46  | 36  | 6  | 11 | 43 | 259 | 13 | 52  | 8  | 1  | 604 | 11 | 3  | 1 |
| 4-S     | 16 | 141 | 143 | 14 | 21 | 28 | 355 | 39 | 76  | 25 | 1  | 354 | 13 | 7  | 1 |
| 5-I     | 0  | 25  | 24  | 4  | 9  | 48 | 257 | 7  | 49  | 5  | 1  | 703 | 10 | 2  | 1 |
| 5-M     | 9  | 92  | 139 | 9  | 13 | 31 | 305 | 31 | 102 | 20 | 1  | 423 | 22 | 8  | 1 |
| 5-S     | 1  | 29  | 28  | 5  | 10 | 49 | 246 | 9  | 63  | 5  | 1  | 696 | 11 | 3  | 1 |
| 6-I     | 2  | 30  | 45  | 5  | 14 | 52 | 290 | 9  | 75  | 5  | 1  | 732 | 9  | 3  | 1 |
| 6-M     | 1  | 35  | 49  | 6  | 16 | 46 | 312 | 10 | 86  | 6  | 1  | 629 | 8  | 3  | 1 |
| 6-S     | 5  | 62  | 108 | 8  | 18 | 44 | 316 | 18 | 96  | 12 | 1  | 593 | 10 | 4  | 1 |
| 7-I     | 3  | 45  | 60  | 8  | 17 | 58 | 275 | 11 | 77  | 8  | 1  | 676 | 10 | 4  | 1 |
| 7-M     | -  | 21  | 20  | 5  | 14 | 72 | 308 | 6  | 74  | 4  | 1  | 985 | 11 | 3  | 1 |

| Muestra | Sc | V   | Cr    | Co  | Ni  | Rb  | Sr  | Y   | Zr    | Nb  | Cs | Ba  | Pb | Th  | U  |
|---------|----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|----|-----|----|-----|----|
| 7-S     | 4  | 49  | 59    | 8   | 20  | 46  | 308 | 14  | 84    | 9   | 1  | 584 | 9  | 4   | 1  |
| 8-I     | 2  | 28  | 47    | 5   | 17  | 59  | 314 | 8   | 79    | 5   | 1  | 786 | 9  | 3   | 1  |
| 8-M     | 5  | 57  | 97    | 9   | 26  | 49  | 325 | 16  | 103   | 10  | 1  | 600 | 10 | 5   | 1  |
| 8-S     | 6  | 58  | 88    | 9   | 26  | 48  | 341 | 17  | 89    | 10  | 1  | 587 | 9  | 4   | 1  |
| 9-I     | 3  | 43  | 58    | 11  | 36  | 77  | 296 | 13  | 87    | 8   | 2  | 761 | 12 | 5   | 1  |
| 9-M     | 3  | 40  | 46    | 10  | 32  | 76  | 293 | 12  | 76    | 7   | 2  | 790 | 12 | 5   | 1  |
| 9-S     | 5  | 54  | 88    | 11  | 34  | 68  | 288 | 14  | 113   | 9   | 2  | 727 | 12 | 5   | 1  |
| 10-I    | 4  | 54  | 421   | 12  | 64  | 68  | 248 | 19  | 252   | 11  | 2  | 609 | 12 | 6   | 2  |
| 10-M    | 22 | 300 | 4447  | 32  | 89  | 29  | 392 | 83  | 769   | 62  | 1  | 226 | 16 | 23  | 5  |
| 10-S    | 8  | 119 | 1351  | 17  | 72  | 52  | 268 | 34  | 731   | 22  | 1  | 421 | 13 | 10  | 3  |
| 11-I    | 5  | 36  | 113   | 12  | 89  | 84  | 201 | 13  | 80    | 7   | 2  | 630 | 13 | 5   | 2  |
| 11-M    | 2  | 31  | 96    | 9   | 62  | 72  | 202 | 11  | 57    | 6   | 1  | 584 | 11 | 4   | 1  |
| 11-S    | 5  | 74  | 981   | 13  | 63  | 54  | 234 | 25  | 353   | 16  | 1  | 420 | 11 | 11  | 2  |
| 12-I    | 4  | 44  | 212   | 13  | 98  | 89  | 205 | 16  | 133   | 9   | 3  | 612 | 14 | 6   | 2  |
| 12-M    | 6  | 40  | 161   | 13  | 97  | 89  | 202 | 13  | 87    | 8   | 3  | 615 | 15 | 5   | 2  |
| 12-S    | 5  | 41  | 122   | 14  | 107 | 103 | 205 | 14  | 75    | 8   | 4  | 677 | 16 | 7   | 2  |
| 13-I    | 4  | 45  | 674   | 11  | 73  | 71  | 158 | 17  | 217   | 11  | 1  | 458 | 11 | 7   | 2  |
| 13-M    | 1  | 32  | 128   | 10  | 75  | 79  | 138 | 11  | 86    | 6   | 1  | 517 | 11 | 5   | 1  |
| 13-S    | 2  | 34  | 108   | 11  | 65  | 80  | 131 | 11  | 104   | 7   | 1  | 495 | 11 | 5   | 1  |
| 14-I    | 4  | 48  | 1687  | 10  | 54  | 57  | 165 | 21  | 898   | 13  | 1  | 406 | 10 | 7   | 2  |
| 14-M    | 5  | 57  | 1780  | 13  | 66  | 52  | 163 | 22  | 669   | 17  | 1  | 345 | 10 | 9   | 2  |
| 14-S    | 50 | 847 | 50532 | 116 | 192 | 5   | 73  | 220 | 44499 | 205 | 0  | 38  | 24 | 124 | 42 |

La normalización de los elementos traza se realizó para los sedimentos, según tres conjuntos de datos para la corteza superior continental (UCC, por sus siglas en inglés), los cuales se encuentran en la metodología: 1. Promedio de las playas; 2. Rudnick (2003); 3. Taylor & McLennan (1985).

En infraplaya (Figura 30) las anomalías positivas registradas son para Cr, Ni y Zr, en las playas de la región de la desembocadura del río Grijalva, desde la 10 hasta el extremo oriente en la playa Campechito. Para el resto de elementos son anomalías negativas. El cromo y níquel tienen un importante enriquecimiento en el área de la desembocadura del río, lo cual está asociado con los sedimentos transportados por el río.

En mesoplaya (Figura 31) es importante observar la relación de elementos como Cr, Ni, Y, Zr, Nb, Th, U con el promedio de la concentración de las playas de estudio, ya que estos elementos registran anomalías positivas en las playas de la desembocadura pero especialmente en las playas Carrillo Puerto (10) de la desembocadura del río Grijalva y en la playa Campechito (14), desembocadura del río San Pedro, lo cual indica que la presencia de minerales como cromita, ilmenita, magnetita, zircón, rutilo y monazita, probablemente procedentes de rocas metamórficas de la Sierra Madre de Chiapas. Los patrones de los elementos en las normalizaciones con Rudnick (2003) y Taylor & McLennan (1985), tienen los mismos valores y siguen la misma tendencia.

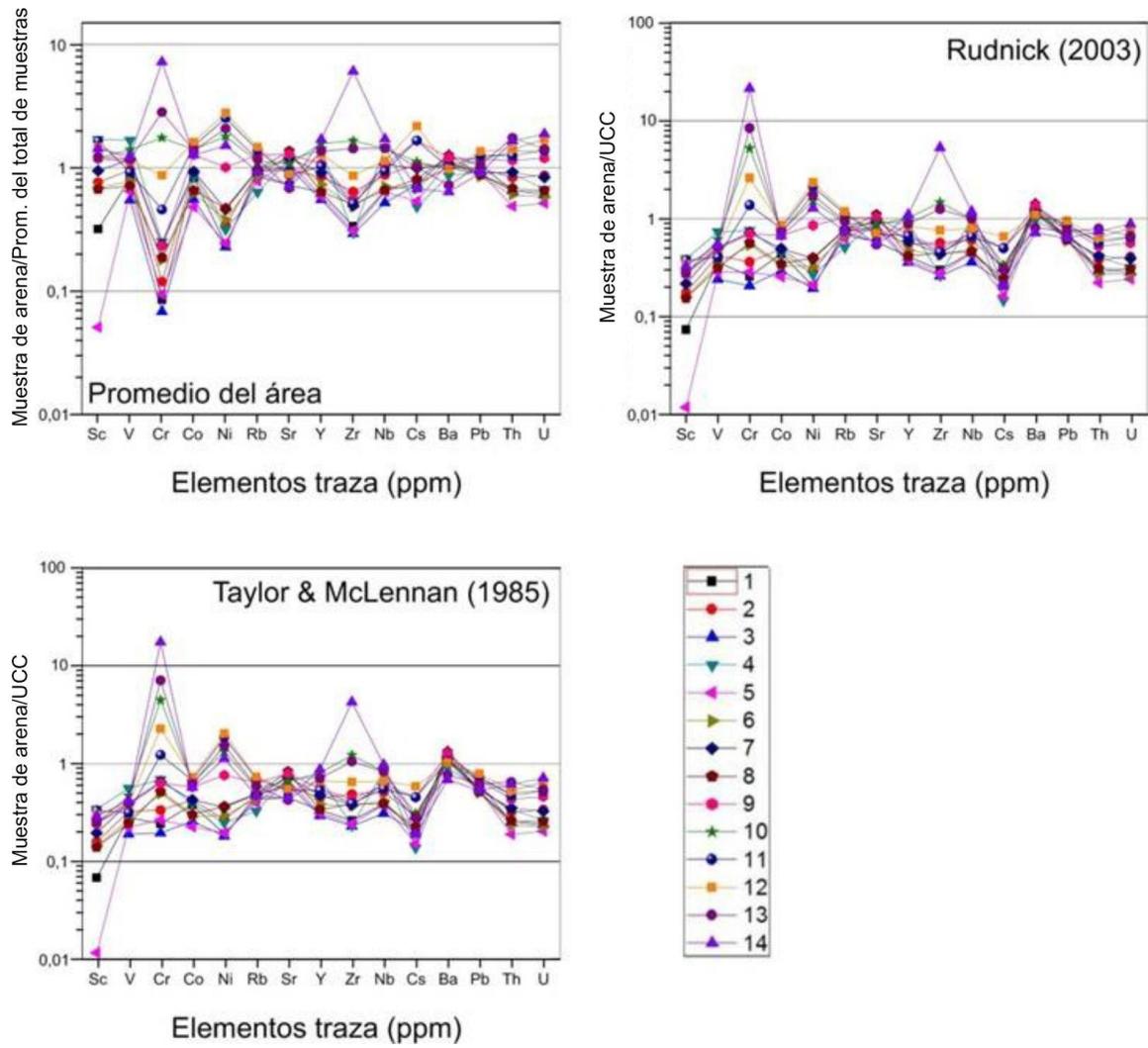


Figura 30. Normalización de elementos traza de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

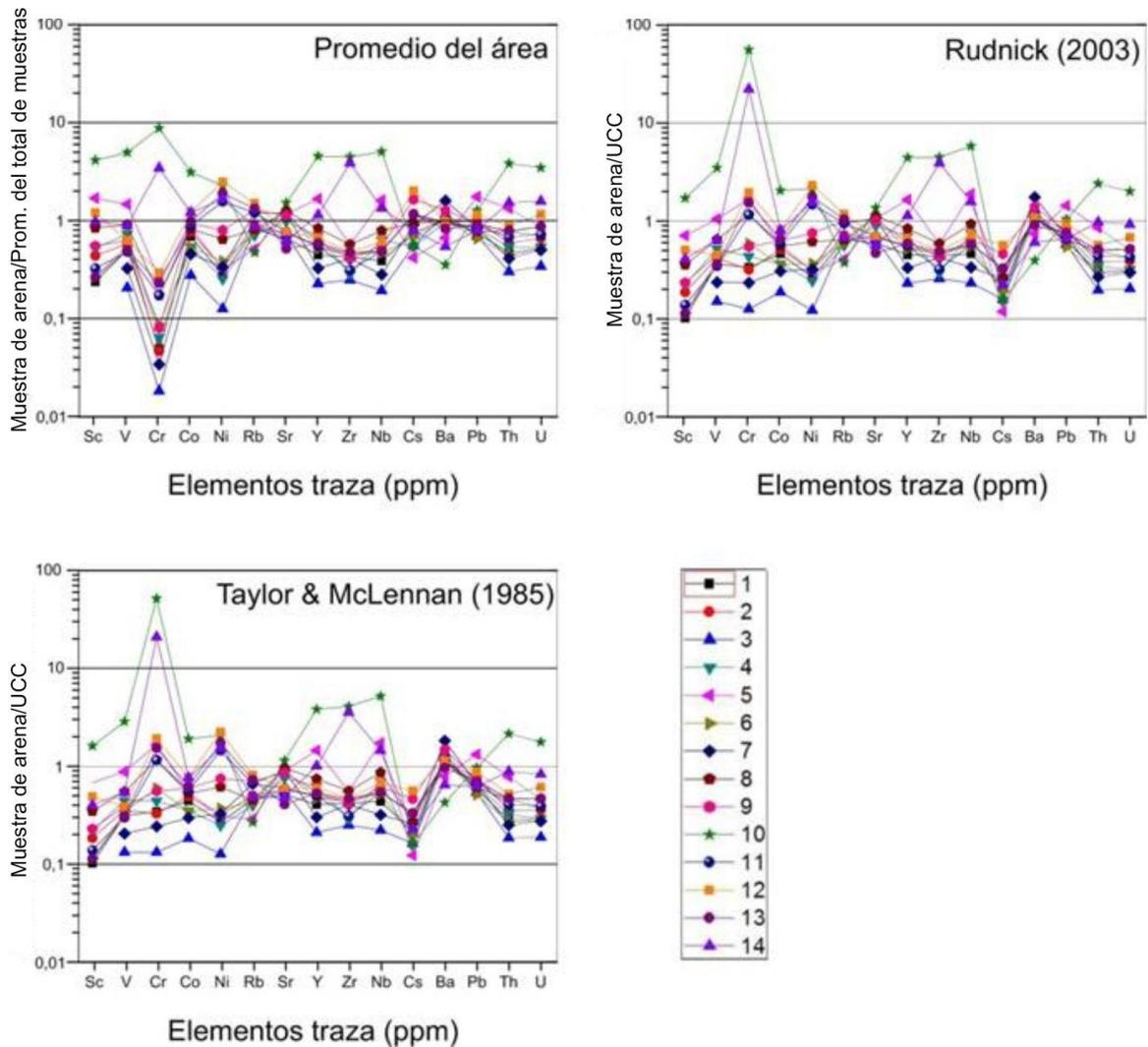


Figura 31. Normalización de elementos traza de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

En supraplaya (Figura 32) las playas localizadas hacia el occidente del área de estudio desde Tonalá (1) hasta la Miramar (9), tienen concentración de elementos como el Cr, Ni y Zr anomalías significativamente negativas y anomalías positivas en Rb, Cs y Ba. Al contrario ocurre en la playa Campechito (14) en donde ésta marcada tendencia es de anomalías positivas para Cr, Ni y Zr, y negativas para Rb, Cs y Ba, lo cual también ocurre en las playas 10 a la 13, pero con menor relevancia.

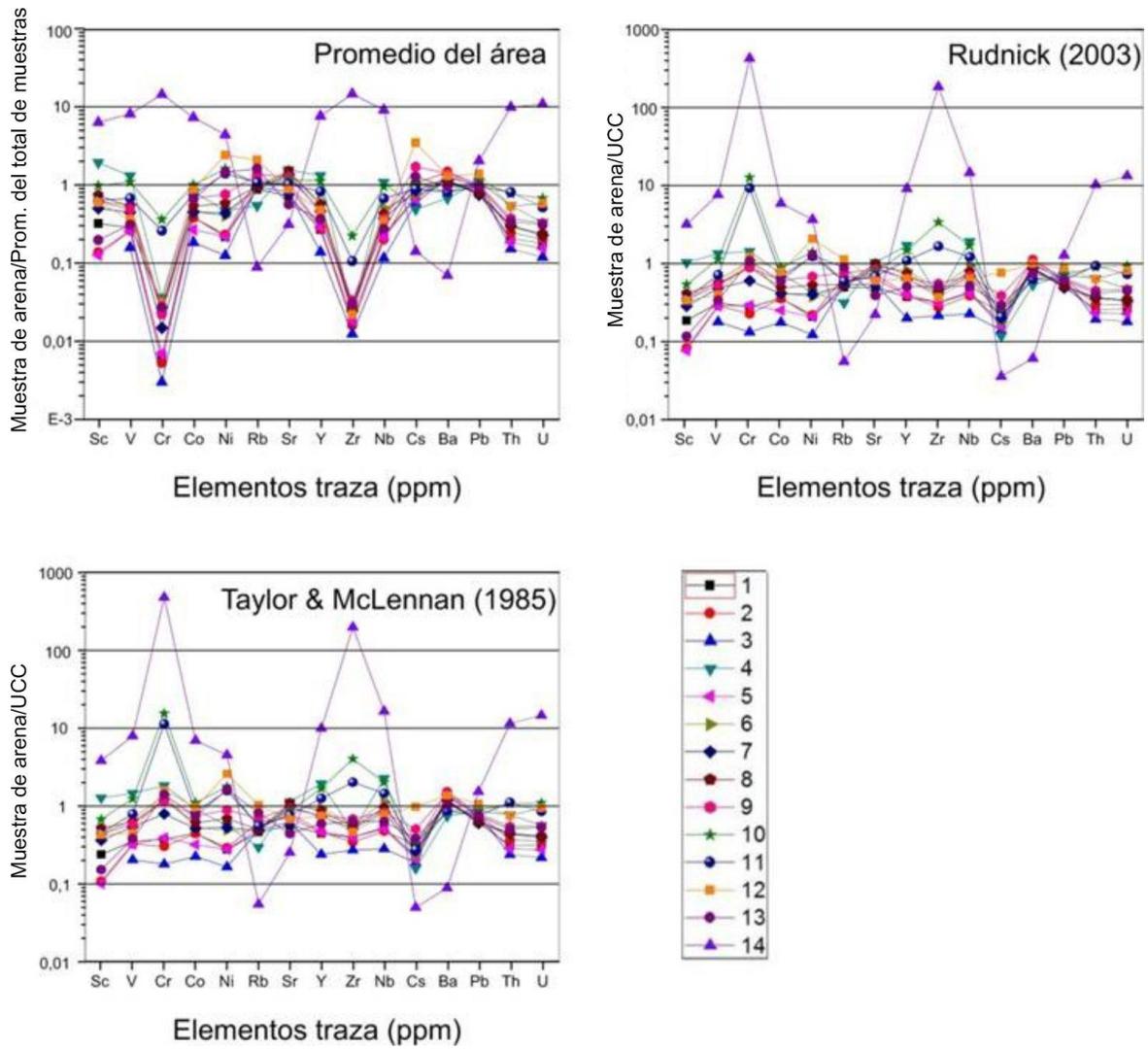


Figura 32. Normalización de elementos traza de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

### 8.6 Geoquímica de tierras raras

La concentración de tierras raras en las arenas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya presenta dispersión de los elementos en cada caso (

Tabla 10). En infraplaya las anomalías siguen patrones similares, caso contrario para mesoplaya y supraplaya se observa que para las playas 4, 5, 10 y 14 existen anomalías positivas en referencia al promedio del área, al UCC y la condrita para todos los elementos.

Tabla 10.- Concentración de elementos de tierras raras en partes por millón (ppm) de arenas en las playas de Tabasco y Campeche.

| Muestra | La     | Ce     | Pr    | Nd     | Sm    | Eu   | Gd    | Tb   | Dy    | Ho   | Er   | Yb   | Lu   |
|---------|--------|--------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| 1-I     | 12.89  | 24.81  | 3.06  | 11.79  | 2.26  | 0.75 | 2.04  | 0.29 | 1.68  | 0.34 | 0.94 | 0.93 | 0.14 |
| 1-M     | 13.94  | 26.88  | 3.30  | 12.64  | 2.44  | 0.77 | 2.20  | 0.32 | 1.83  | 0.37 | 1.01 | 1.00 | 0.15 |
| 1-S     | 24.70  | 51.08  | 6.51  | 24.88  | 4.86  | 1.23 | 4.25  | 0.62 | 3.47  | 0.68 | 1.87 | 1.76 | 0.26 |
| 2-I     | 16.51  | 32.31  | 3.99  | 15.17  | 2.95  | 0.92 | 2.63  | 0.38 | 2.15  | 0.43 | 1.16 | 1.12 | 0.17 |
| 2-M     | 10.12  | 18.80  | 2.26  | 8.69   | 1.64  | 0.72 | 1.50  | 0.21 | 1.19  | 0.25 | 0.65 | 0.66 | 0.10 |
| 2-S     | 19.07  | 39.12  | 4.95  | 19.10  | 3.76  | 1.02 | 3.29  | 0.47 | 2.66  | 0.52 | 1.43 | 1.37 | 0.20 |
| 3-I     | 27.31  | 53.95  | 6.54  | 23.74  | 4.44  | 0.89 | 3.78  | 0.55 | 3.06  | 0.61 | 1.71 | 1.69 | 0.26 |
| 3-M     | 16.50  | 32.86  | 3.99  | 14.91  | 2.89  | 0.68 | 2.52  | 0.36 | 2.04  | 0.41 | 1.13 | 1.13 | 0.17 |
| 3-S     | 15.86  | 30.94  | 3.77  | 14.13  | 2.70  | 0.67 | 2.36  | 0.35 | 2.01  | 0.41 | 1.14 | 1.13 | 0.17 |
| 4-I     | 19.27  | 38.12  | 4.70  | 17.58  | 3.46  | 0.83 | 3.09  | 0.47 | 2.72  | 0.55 | 1.56 | 1.60 | 0.24 |
| 4-M     | 16.98  | 33.29  | 4.11  | 15.37  | 3.01  | 0.77 | 2.67  | 0.40 | 2.28  | 0.46 | 1.29 | 1.30 | 0.20 |
| 4-S     | 18.80  | 36.44  | 4.51  | 16.72  | 3.26  | 0.79 | 2.93  | 0.44 | 2.51  | 0.50 | 1.41 | 1.42 | 0.21 |
| 5-I     | 16.32  | 32.28  | 3.96  | 14.90  | 2.94  | 0.78 | 2.63  | 0.40 | 2.30  | 0.46 | 1.28 | 1.26 | 0.19 |
| 5-M     | 15.98  | 30.62  | 3.73  | 14.07  | 2.68  | 0.74 | 2.36  | 0.35 | 1.94  | 0.39 | 1.07 | 1.05 | 0.15 |
| 5-S     | 36.37  | 72.87  | 8.95  | 32.92  | 6.24  | 1.25 | 5.36  | 0.80 | 4.53  | 0.89 | 2.53 | 2.45 | 0.37 |
| 6-I     | 24.36  | 49.18  | 6.07  | 22.70  | 4.39  | 1.04 | 3.87  | 0.58 | 3.39  | 0.68 | 1.96 | 1.96 | 0.29 |
| 6-M     | 121.55 | 249.20 | 30.28 | 110.55 | 21.26 | 3.71 | 17.88 | 2.65 | 14.92 | 2.87 | 8.23 | 7.78 | 1.13 |
| 6-S     | 47.76  | 95.73  | 11.73 | 43.02  | 8.17  | 1.59 | 7.06  | 1.05 | 5.99  | 1.19 | 3.44 | 3.47 | 0.53 |
| 7-I     | 12.24  | 22.72  | 2.84  | 10.86  | 2.07  | 0.75 | 1.86  | 0.26 | 1.48  | 0.30 | 0.81 | 0.81 | 0.12 |
| 7-M     | 21.71  | 44.00  | 5.56  | 21.27  | 4.19  | 1.07 | 3.68  | 0.54 | 3.03  | 0.59 | 1.62 | 1.55 | 0.23 |
| 7-S     | 21.97  | 44.41  | 5.60  | 21.44  | 4.20  | 1.10 | 3.69  | 0.54 | 3.08  | 0.61 | 1.69 | 1.63 | 0.24 |

| Muestra | La     | Ce     | Pr    | Nd     | Sm    | Eu   | Gd    | Tb   | Dy    | Ho   | Er    | Yb    | Lu   |
|---------|--------|--------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|
| 8-I     | 17.30  | 33.34  | 4.09  | 15.51  | 3.08  | 0.93 | 2.79  | 0.41 | 2.39  | 0.48 | 1.31  | 1.29  | 0.19 |
| 8-M     | 16.37  | 30.85  | 3.75  | 14.23  | 2.81  | 0.89 | 2.56  | 0.38 | 2.17  | 0.43 | 1.19  | 1.17  | 0.18 |
| 8-S     | 18.69  | 36.40  | 4.57  | 17.50  | 3.54  | 1.02 | 3.17  | 0.47 | 2.67  | 0.53 | 1.46  | 1.45  | 0.22 |
| 9-I     | 11.14  | 21.26  | 2.61  | 10.16  | 2.00  | 0.71 | 1.84  | 0.27 | 1.53  | 0.31 | 0.83  | 0.82  | 0.12 |
| 9-M     | 12.14  | 23.21  | 2.86  | 11.05  | 2.17  | 0.69 | 1.99  | 0.29 | 1.64  | 0.33 | 0.89  | 0.90  | 0.14 |
| 9-S     | 11.88  | 22.58  | 2.79  | 10.77  | 2.10  | 0.67 | 1.92  | 0.28 | 1.58  | 0.32 | 0.85  | 0.83  | 0.13 |
| 10-I    | 14.00  | 25.98  | 3.24  | 12.43  | 2.46  | 0.82 | 2.26  | 0.34 | 1.94  | 0.39 | 1.08  | 1.08  | 0.16 |
| 10-M    | 13.61  | 25.53  | 3.23  | 12.44  | 2.48  | 0.81 | 2.27  | 0.34 | 1.97  | 0.40 | 1.10  | 1.09  | 0.16 |
| 10-S    | 12.36  | 22.97  | 2.84  | 10.93  | 2.17  | 0.76 | 1.96  | 0.28 | 1.62  | 0.33 | 0.88  | 0.86  | 0.13 |
| 11-I    | 11.00  | 21.45  | 2.63  | 10.18  | 1.94  | 0.67 | 1.74  | 0.25 | 1.37  | 0.28 | 0.74  | 0.73  | 0.11 |
| 11-M    | 60.80  | 118.87 | 14.33 | 51.63  | 9.19  | 1.95 | 7.62  | 1.10 | 5.90  | 1.12 | 3.16  | 2.90  | 0.41 |
| 11-S    | 12.39  | 24.63  | 3.12  | 12.11  | 2.36  | 0.75 | 2.09  | 0.30 | 1.68  | 0.34 | 0.91  | 0.88  | 0.13 |
| 12-I    | 24.61  | 51.22  | 6.49  | 24.77  | 4.75  | 1.15 | 4.06  | 0.58 | 3.25  | 0.63 | 1.74  | 1.61  | 0.23 |
| 12-M    | 16.93  | 35.30  | 4.58  | 17.81  | 3.52  | 0.96 | 3.11  | 0.45 | 2.52  | 0.49 | 1.34  | 1.26  | 0.18 |
| 12-S    | 57.28  | 118.57 | 14.85 | 56.54  | 10.77 | 2.27 | 9.11  | 1.32 | 7.35  | 1.40 | 3.94  | 3.58  | 0.51 |
| 13-I    | 10.63  | 19.91  | 2.45  | 9.43   | 1.81  | 0.65 | 1.64  | 0.23 | 1.31  | 0.26 | 0.69  | 0.67  | 0.10 |
| 13-M    | 7.90   | 14.69  | 1.70  | 6.57   | 1.21  | 0.51 | 1.11  | 0.15 | 0.84  | 0.18 | 0.45  | 0.46  | 0.07 |
| 13-S    | 8.27   | 15.56  | 1.82  | 7.04   | 1.28  | 0.52 | 1.15  | 0.16 | 0.87  | 0.18 | 0.46  | 0.47  | 0.07 |
| 14-I    | 27.95  | 54.95  | 6.41  | 23.58  | 4.34  | 0.86 | 3.63  | 0.57 | 3.32  | 0.69 | 2.06  | 2.28  | 0.37 |
| 14-M    | 34.68  | 68.22  | 8.07  | 29.40  | 5.42  | 0.98 | 4.42  | 0.68 | 3.74  | 0.75 | 2.16  | 2.25  | 0.36 |
| 14-S    | 371.84 | 699.26 | 74.92 | 256.86 | 43.62 | 3.91 | 32.36 | 4.96 | 28.03 | 6.38 | 23.28 | 35.25 | 6.83 |

\*Cont. Tabla 10.

Los elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) son insolubles y se presentan en muy bajas concentraciones en el agua de mar y en aguas continentales, por lo tanto la información que se obtiene se usa para determinar la procedencia en los sedimentos. Se clasifican: 1. LREE (Low Rare Earth Elements), número atómico y de masa inferior, desde

el La al Sm. 2. HREE (High Rare Earth Elements), con número atómico y de masa superior, desde el Gd al Lu (Henderson, 1984).

Según Rollinson (1993) la presencia de cuarzo y carbonatos tienen efecto de dilución en la concentración de REE. La concentración de minerales pesados, particularmente de zircón y monacita, puede tener significativo pero errático efecto sobre el patrón de REE.

Según el promedio de concentración de los elementos de tierras raras de las playas de la zona estudiada hacia el occidente en infraplaya (Figura 33), tienen un ligero enriquecimiento con respecto a las playas 10 a la 14, situadas hacia el oriente del área con mayor influencia de la desembocadura de los ríos principales. Con respecto a la normalización de la corteza continental superior, en los dos casos Rudnick (2003) y Taylor & McLennan (1985), los valores se encuentran por debajo de la línea de normalización pero con anomalía positiva de Eu.

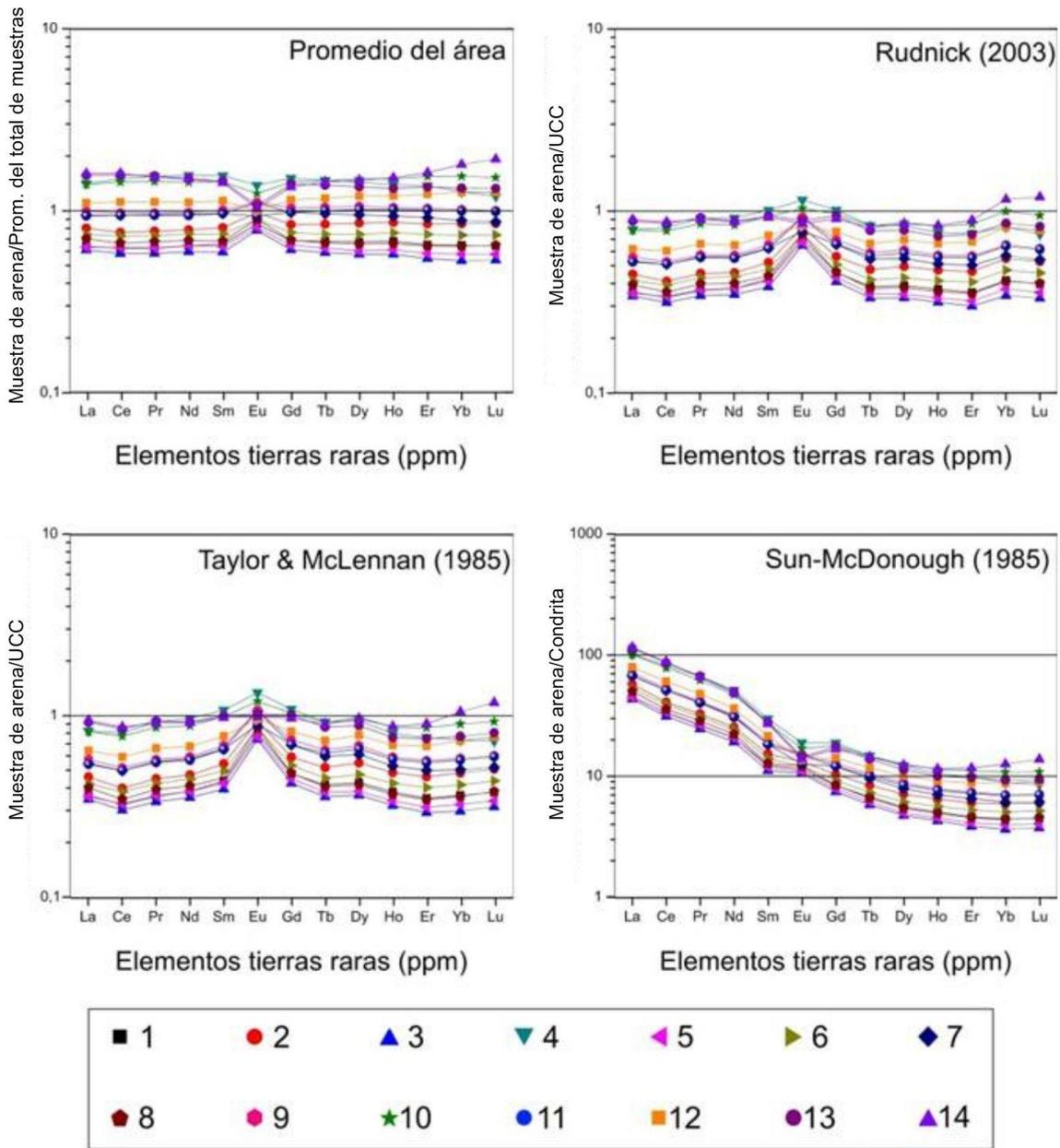


Figura 33. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en infraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

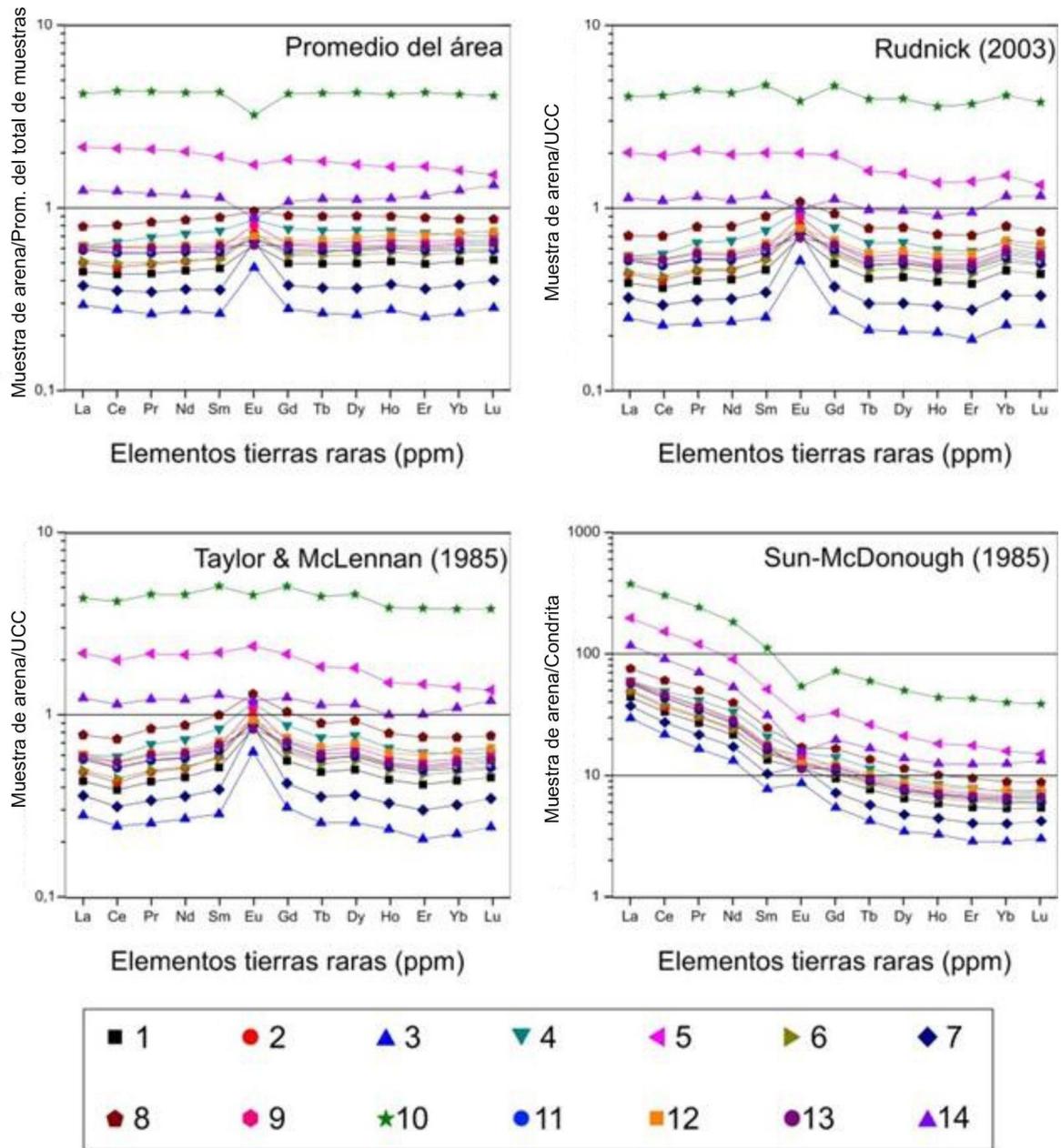


Figura 34. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en mesoplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

En mesoplaya (Figura 34) el registro de la concentración de tierras raras en todos los casos de normalización, incluida la condrita, da como resultado el enriquecimiento y sus valores están sobre el valor de normalización en las playas 5, 10 y 14, y con anomalía negativa de

Eu. En el caso de las playas restantes los valores se encuentran por debajo de la línea de normalización con anomalías positivas de Eu, lo cual puede indicar la presencia de diferentes factores que están contribuyendo tanto en el transporte litoral de los sedimentos como en su acumulación; de igual, forma la diferente procedencia de los sedimentos.

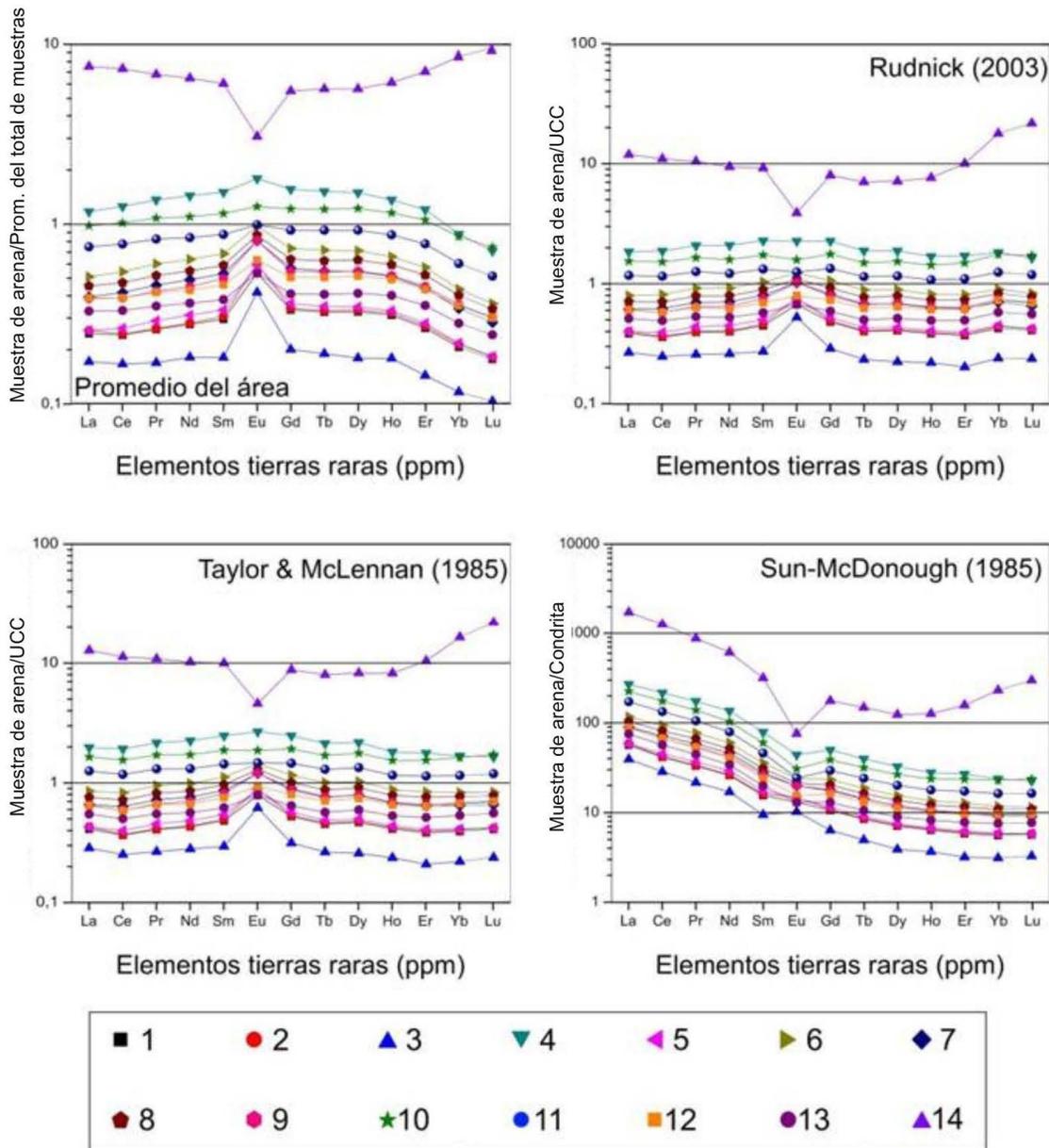


Figura 35. Normalización de elementos de tierras raras de sedimentos en supraplaya: A. Promedio de las playas de estudio. B. Rudnick (2003). C. Taylor & McLennan (1985). D. Sun-McDonough (1985). UCC: Corteza continental superior, por sus siglas en inglés.

En supraplaya (Figura 35) las arenas tienen un notable enriquecimiento de tierras raras en la playa Campechito (14) asociado con la presencia de minerales pesados; las playas 4, 10 y 11 también presentan un leve incremento en la concentración y una tenue anomalía negativa de Eu. Las playas restantes se encuentran por debajo del valor de normalización, siendo característicos los datos para la playa Santa Ana (3), hacia el occidente del área.

## 9. DISCUSIÓN GENERAL

### 9.1 Perfiles de playa

Se pueden apreciar dos grupos de playas según la morfología del perfil y el análisis textural de los sedimentos de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. El primer grupo va desde la playa Tonalá (1) hasta la playa El Limón (7), las pendiente de las playas es alto, el tamaño de grano generalmente es medio, están cercanas al Sistema Lagunar y las cuencas hidrográficas son pequeñas (Figura 3). El segundo grupo está conformado por las playas Emiliano Zapata (8) hasta Campechito (14), la pendiente es baja, el tamaño de grano generalmente es fino y están altamente afectadas por la desembocadura de los ríos Grijalva-Usumacinta (Figura 4).

En cuanto a la variabilidad granulométrica a lo largo del perfil, se puede determinar que en los casos en donde la longitud de la playa es extensa, cercana a los 20 m., el tamaño del grano varía entre arena fina a muy fina y está ubicada en los sectores de la desembocadura de los ríos Grijalva-Usumacinta, lo cual indica que los ríos transportan sedimentos finos que se depositan en las playas próximas a su desembocadura, como se puede ver en las playas desde Emiliano Zapata (8) hasta Boquerón (13).

La precipitación pluvial puede tener un efecto en la extensión de las playas, ya que a mayor pluviosidad corresponderá una mayor carga de sedimentos procedentes del continente por vía fluvial (Carranza, 2015), por lo cual afecta las playas del segundo grupo, más cercanas a la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, el cual pertenece a una cuenca hidrográfica en donde el clima de la zona montañosa es templado húmedo con lluvias frecuentes entre mayo y septiembre.

Los fenómenos hidrometeorológicos que resultan más importantes a evaluar son los inmediatamente anteriores a la fecha de construcción del perfil de playa, dado el cambio de las condiciones de erosión y depositación en el litoral durante las tormentas relacionadas con dichos eventos (Carranza-Edward et al, 2015). Durante el año de toma de las muestras

y construcción de los perfiles no se registraron eventos que afectaran las costas de Tabasco y Campeche, aunque en el año anterior, el 23 de septiembre de 1980, se registró el paso de la tormenta tropical Hermione (Figura 9), que llegó a la costa en el estado de Campeche, con vientos de 110 km. por hora con fuertes lluvias e inundaciones (Lawrence, M. 1980).



Figura 36. Fotografía de trinchera excavada en la playa Campechito (14), cerca de la supraplaya se observa el horizonte de arenas negras en el que hay minerales pesados. Se aprecia el efecto erosivo que deja ver el horizonte oscuro. Fotografía tomada por Arturo Carranza Edwards.

Por lo anterior cabe evaluar el perfil de la playa Campechito (14), el cual tiene  $9.64^\circ$  de inclinación del perfil, mayor que las playas contiguas, y el tamaño de grano sigue siendo fino; por lo tanto pudo ser afectado por el paso de la tormenta tropical y modificar su morfología descubriendo arenas ricas en minerales pesados y oscuros hacia la parte alta de la playa por causa de los vientos generados por la tormenta. (Figura 36). La erosión causada por el viento del paso de la tormenta exhibió materiales anteriores compuestos por depósitos sedimentarios fluviales posiblemente derivados de la antigua desembocadura del Usumacinta.

En las playa Santa Ana (3) y en la playa El Limón (7), se presentan problemas erosivos y cambios en el transporte litoral de sedimentos puesto que la actividad antrópica en dichas localidades es más fuerte debido a la construcción de la escollera en Sánchez Magallanes

(3) y a las escolleras Este y Oeste, y el inicio de la construcción en 1981 del puerto Dos Bocas, lo cual causa retención de sedimentos al oriente de las escolleras y del puerto, como también por la deforestación y cambio en la dinámica y transporte de sedimentos por el río Seco el cual limita con la nueva construcción de la refinería Dos Bocas (Figura 10).

## 9.2 Parámetros texturales

El tamaño de las partículas varía de arena fina a arena gruesa, disminuyendo de tamaño de occidente a oriente, las partículas más finas, en todo el perfil de playa, se encuentran en las que están afectadas directamente por las desembocaduras de los ríos Tonalá y Grijalva-Usumacinta, caso contrario sucede con las playas más cercanas al Sistema Lagunar, con tamaños de partículas media a gruesa, ya que el cierre o apertura de las bocas de las lagunas genera la mezcla de los tamaños de los sedimentos y disminuye la clasificación desde moderadamente bien clasificado a mal clasificado, como ocurre desde las playas Santa Ana (3) hasta Playa Azul (6).

La asimetría en las playas desde la 10 a la 14, con influencia del río Grijalva-Usumacinta, indica la carencia de partículas gruesas y buena distribución de los tamaños en los sedimentos de la mayoría de las muestras, ya que se encuentran en el rango de tamaño fino a medio. Las muestras de supraplaya de las playas Pailebot (2) y Santa Ana (3) son asimétricas hacia los finos, posiblemente a causa del cambio en el transporte litoral ejercido por la escollera.

La curtosis indica que la distribución de los sedimentos a lo largo de todos los perfiles de playa tiene característica leptocúrtica y mesocúrtica, lo cual denota una buena concentración en los tamaños de los sedimentos.

La relación entre el tamaño de grano y la clasificación de las partículas se describe como el sedimento arena gruesa está moderadamente clasificado, al reducir su tamaño a arena media está generalmente moderadamente bien y bien, y al ser de arena fina está bien y muy bien clasificado (Figura 37). Lo anterior demuestra la correlación negativa ( $r = -0.5$ ), en

donde las muestras que no corresponden con la relación son de infraplaya, por lo cual se puede inferir que tienen algún factor ambiental que está afectando la clasificación, en ese caso como están en la parte inferior de la playa (infraplaya) la corriente y el oleaje influyen en la depositación de los sedimentos.

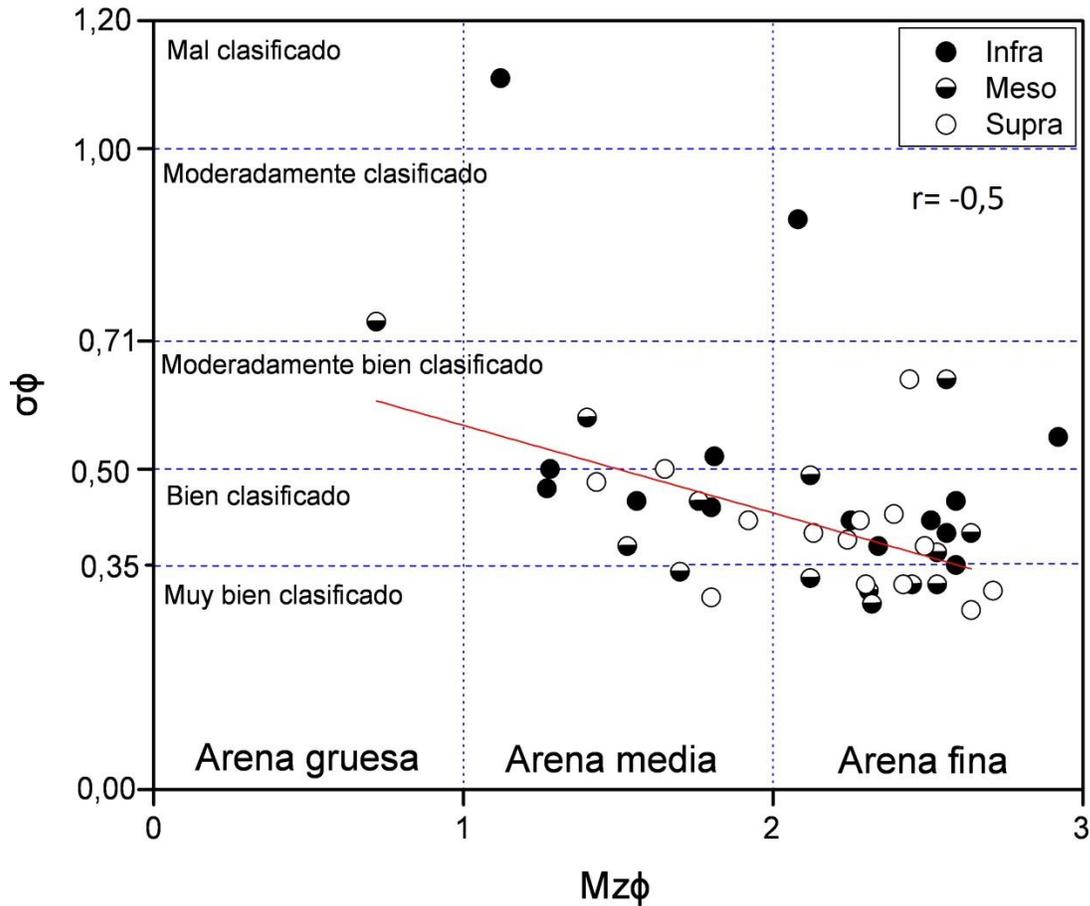


Figura 37. Desviación media gráfica inclusiva ( $\sigma_I\phi$ ) y tamaño de partículas ( $Mz\phi$ ) de sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

### 9.3 Composición de las arenas de playa

La proporción de los sedimentos biógenos va en aumento hacia las playas del oriente desde Miramar (9) hasta Campechito (14), con porcentajes desde 10% hasta 18%, los cuales están compuestos por restos de conchas y bivalvos; este aumento sucede simultáneamente en

todo el perfil de playa (Figura 38). Los sedimentos biógenos pertenecen a la Plataforma de Yucatán compuesta por carbonatos y se distribuyen hacia el occidente en dirección con las corrientes (Carranza-Edwards et al., 2015). Según Carranza-Edwards et al. (2015) la distribución de los carbonatos se detiene en parte en la boca de la Laguna de Términos que sirve como barrera para el transporte litoral de estos sedimentos por lo tanto decrece su depositación en las playas hacia el occidente.

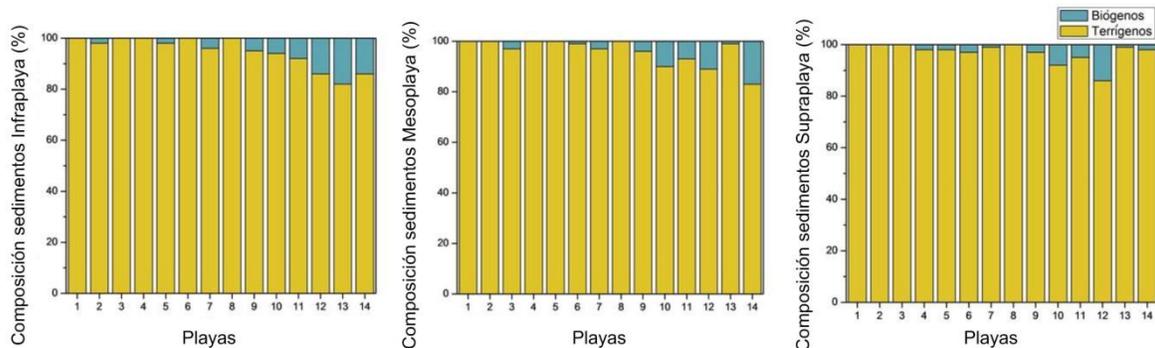


Figura 38. Porcentaje de sedimentos terrígenos y biógenos de los sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya.

La composición de los sedimentos en cuanto al cuarzo, los feldespatos totales y los fragmentos líticos totales, se encuentra distribuida hacia cuarzo total y fragmentos líticos, transportados por los ríos que tienen su desembocadura en el área de estudio (Figura 39-A).

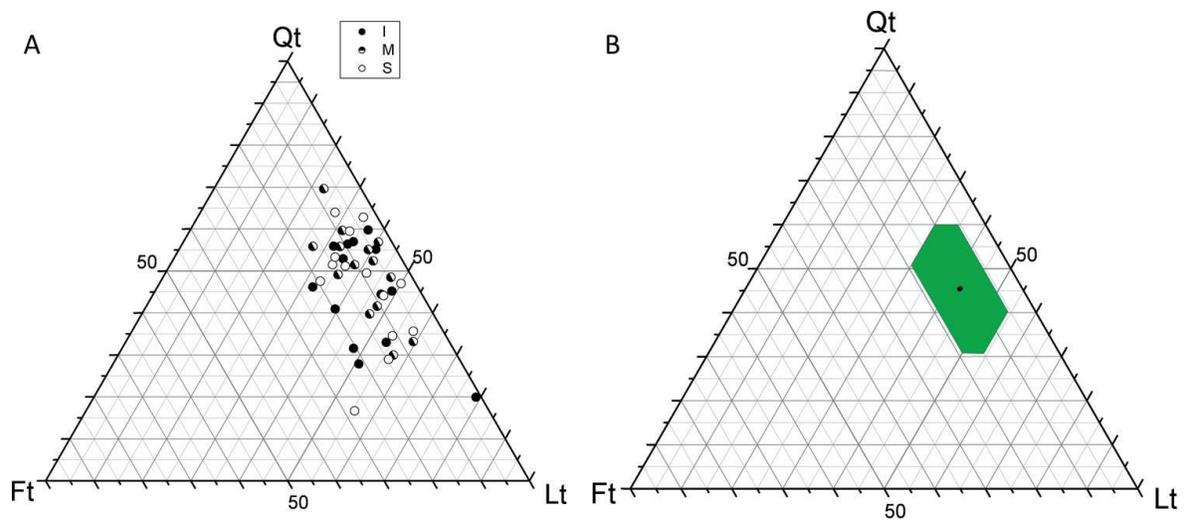


Figura 39. A- Diagrama Qt-Ft-Lt de los sedimentos de las 14 playas en estudio en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. B- Diagrama Qt-Ft-Lt del promedio y la desviación estándar de las 42 muestras de sedimentos. Qt: cuarzo total; Ft: feldespatos totales; Lt: fragmentos líticos totales; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya.

Según el diagrama del promedio y la desviación estándar, la dispersión es mayor en el eje del cuarzo y los fragmentos líticos, ya que 6 de las playas en estudio, de la playa 9 a la 14, tienen influencia directa de la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, que es el sistema fluvial con mayor caudal en México y de gran longitud (Figura 40).

En infraplaya, mesoplaya y supraplaya, se registra un comportamiento y distribución diferente de los sedimentos en cuanto a su composición, ya que en cada una de ellas los factores como la corriente, la marea y el viento tienen mayor o menor relevancia. En general en supraplaya, los cuarzos tienen mayor presencia debido a su fino tamaño como se determinó en la variación granulométrica a lo largo de los perfiles de playa y son fácilmente transportados y acumulados por el viento en la parte alta de la playa. En mesoplaya, la distribución es homogénea hacia el cuarzo y los fragmentos líticos. Y en infraplaya, se presentan en mayor proporción los fragmentos líticos, los cuales en las playas que tienen influencia del río Grijalva-Usumacinta son de tamaño arena fina pero en las playas hacia el occidente son de arena media, en donde la energía de las olas es mayor y pueden transportar ese tipo de sedimentos que tienen una densidad más alta que el cuarzo o los feldespatos (Figura 40).

La composición de los fragmentos líticos tiene gran dispersión en sus tres ejes, principalmente hacia los fragmentos sedimentarios y plutónicos-metamórficos, lo cual se explica por el transporte de los sedimentos a través de las cuencas hidrográficas que erosionan rocas terciarias compuestas por areniscas; de ahí, los fragmentos líticos sedimentarios y los fragmentos líticos plutónicos-metamórficos son principalmente esquistos y rocas con metamorfismo de bajo grado como pizarras y metareniscas (Figura 41).

Los fragmentos volcánicos líticos tienen mayor presencia en la playa El Limón, y disminuye su contenido hacia las playas del oriente, las cuales tienen mayor cantidad de fragmentos líticos sedimentarios compuestos por areniscas. En supraplaya, las playas Pajonal, Playa Azul, Carrillo Puerto y El Bosque, tienen en mayor proporción fragmentos líticos plutónicos y metamórficos transportados, en el caso de las playas 10 y 11, por el río Grijalva-Usumacinta, erosionados probablemente del complejo ígneo metamórfico de la Sierra de Chiapas (Figura 42).

Los minerales pesados se encuentran en ambientes de alta energía, resistentes a la erosión costera y pueden ser depositados en condiciones de tormentas (Carranza-Edwards et al., 2015). Los minerales pesados están relacionados directamente con la litología de la cuenca hidrográfica a la cual pertenece la zona de muestreo, de acuerdo con Faure (1991), “todos los tipos de rocas contienen minerales accesorios que se resisten a la meteorización química y física; estos minerales son liberados de fuentes litológicas asociadas y pueden ser transportados en partículas de tamaños finos. Como resultado del transporte a causa de la acción del agua o del viento, las partículas de los minerales accesorios son concentrados con base en el tamaño, la gravedad específica, y forma en los depósitos de arena y grava. Los minerales más resistentes tienen mayor densidad que el cuarzo, los feldespatos y la calcita; y son agrupados bajo el nombre de minerales pesados (MP), los cuales tienen la densidad mayor que  $2,90 \text{ g/cm}^3$ ” y al tener mayor densidad que los otros componentes, como el cuarzo y los feldespatos, el transporte es más difícil.

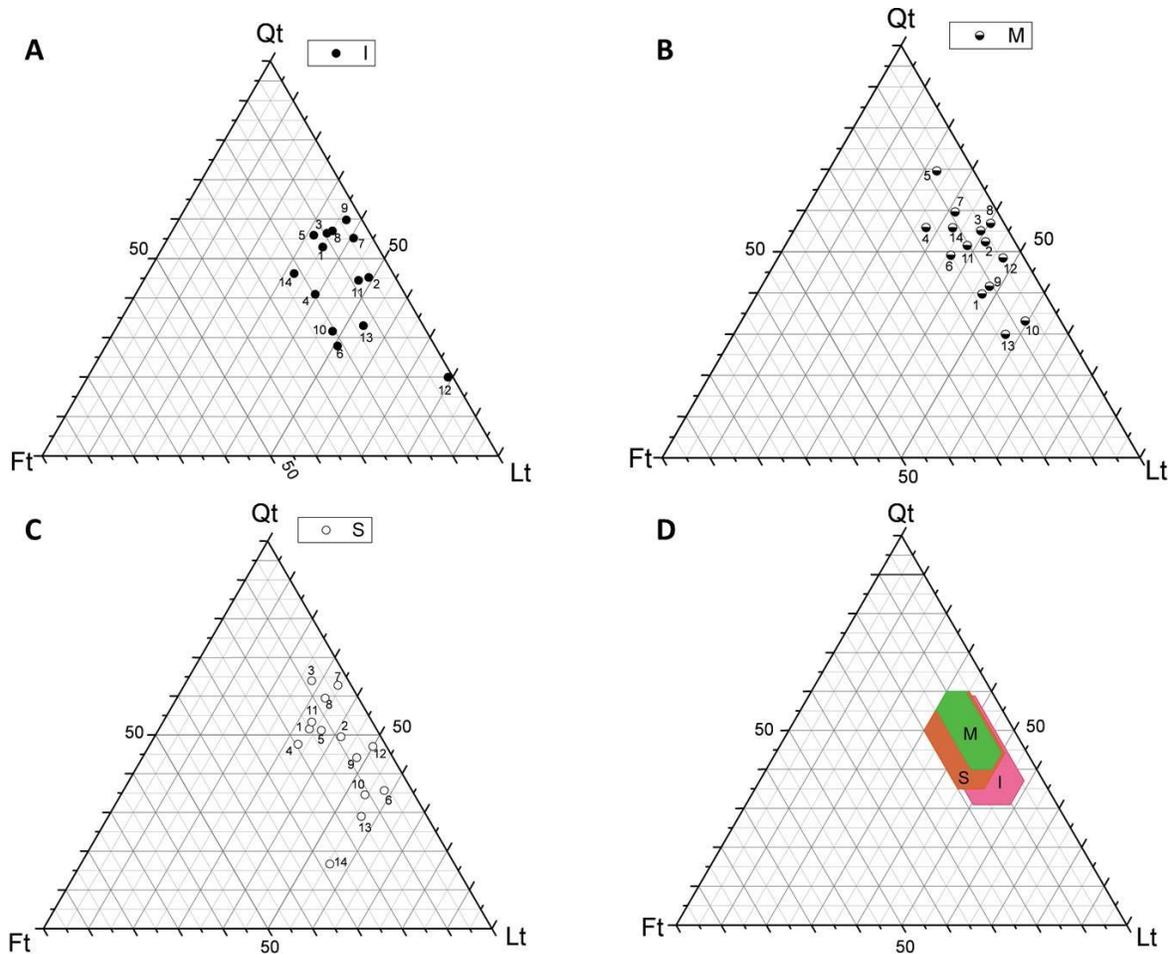


Figura 40. A- Diagrama Qt-Ft-Lt de infraplaya. B- Diagrama Qt-Ft-Lt de mesoplaya. C- Diagrama Qt-Ft-Lt de supraplaya. D- Diagrama Qt-Ft-Lt del promedio y la desviación estándar de infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Qt: cuarzo total; Ft: feldspatos totales; Lt: fragmentos líticos totales; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya; 1. Tonalá; 2. Pailebot; 3. Santa Ana; 4. Macayo; 5. Pajonal; 6. Playa Azul; 7. El Limón; 8. Emiliano Zapata; 9. Miramar; 10. Carrillo Puerto; 11. El Bosque; 12. La Estrella; 13. Boquerón; 14. Campechito.

Los minerales pesados (MP) también tienen una presencia muy importante dentro de la composición de las arenas, ya que indican la procedencia de las partículas (Carranza-Edwards, 2001), ya que la litología representa un importante parámetro siendo la fuente de rocas y minerales transportados por el sistema fluvial a las costas (Carranza-Edwards et al., 2002); como también la energía en el ambiente de depositación y la dinámica del transporte litoral de las arenas.

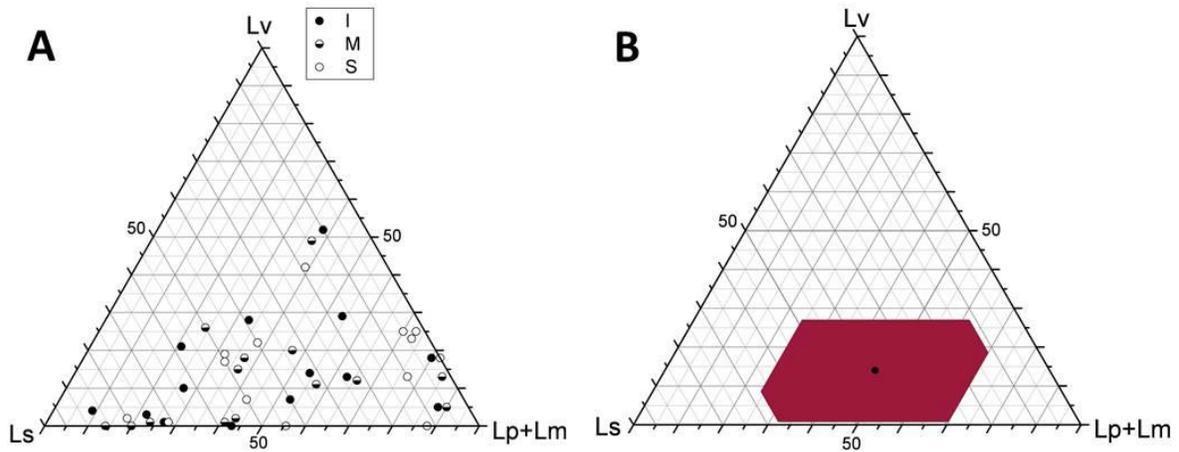


Figura 41. A- Diagrama Lv,Ls,Lm-Lp de los sedimentos de las 14 playas de estudio en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. B- Diagrama Lv,Ls,Lm-Lp del promedio y la desviación estándar de las 42 muestras de sedimentos. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya. Los Lp son escasos pues se les observa principalmente en arenas gruesas o muy gruesas.

En el área se tiene registro de zircón ( $ZrSiO_4$ ), magnetita ( $FeO.Fe_2O_3$ ), ilmenita ( $FeO.TiO_2$ ) y cromita ( $FeO.Cr_2O_3$ ) y monacita ((La, Ce, Pr, Nd, Th)  $PO_4$ ); en tamaño de arena fina y muy fina (Castellanos, 1993). En el artículo de Castellanos (1993), las localidades en donde se obtuvo presencia de los minerales anteriormente nombrados fueron: Barra de Chiltepec, Punta Buey, Boquerón y Uvita, correspondiendo con las playas: El Limón (7), Carrillo Puerto (10), El Bosque (11), La Estrella (12), Boquerón (13) y Campechito (14).

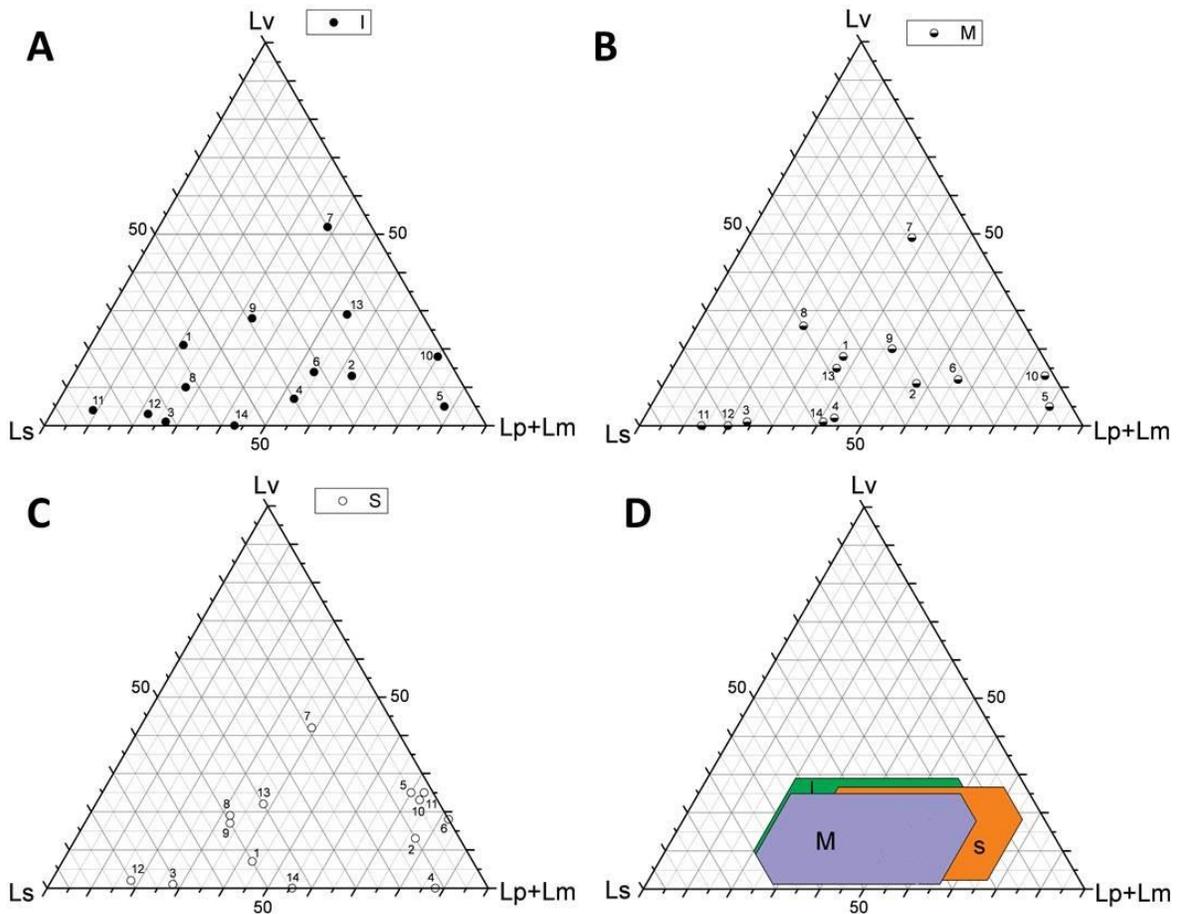


Figura 42. A- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en infraplaya. B- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en mesoplaya. C- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos en supraplaya. D- Diagrama Lv,Ls,Lm+Lp de sedimentos del promedio y la desviación estándar en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos; I: infraplaya; M: mesoplaya; S: supraplaya; 1. Tonalá; 2. Pailebot; 3. Santa Ana; 4. Macayo; 5. Pajonal; 6. Playa Azul; 7. El Limón; 8. Emiliano Zapata; 9. Miramar; 10. Carrillo Puerto; 11. El Bosque; 12. La Estrella; 13. Boquerón; 14. Campechito.

En la distribución de los minerales pesados en infraplaya, se tiene registro en todas las playas menos en Emiliano Zapata (8) y en El Bosque (11), su transporte es debido a la corriente con dirección hacia el occidente (Figura 43).

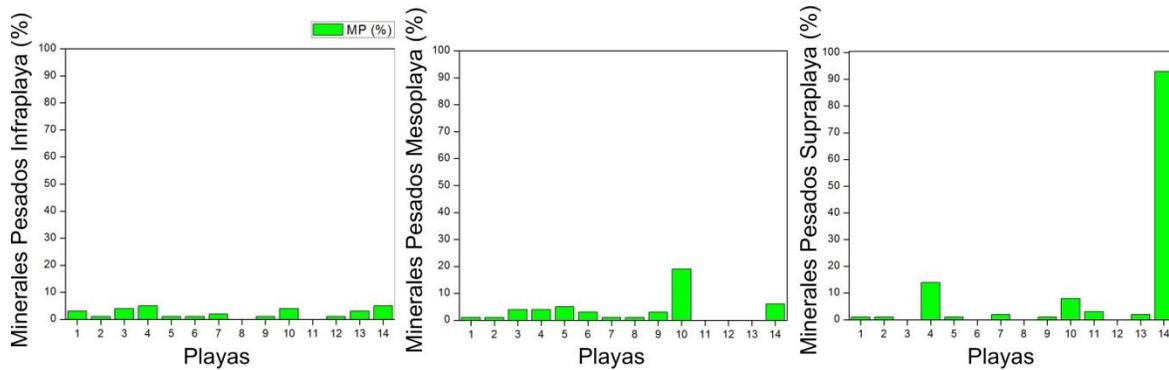


Figura 43. Porcentaje de minerales pesados en los sedimentos de las 14 playas en infraplaya, mesoplaya y supraplaya, valores relacionados con la Tabla 7.

En mesoplaya se observa un registro más elevado especialmente en la playa Carrillo Puerto (10) afectada directamente por la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, el cual transporta los sedimentos depositados en esta localidad (Figura 43).

En supraplaya el incremento en la acumulación de minerales pesados es notorio en la playa Macayo (4) y Campechito (14) (Figura 43), debido probablemente a condiciones de tormenta, en esta última parece ser que la erosión permitió el afloramiento de horizontes oscuros posiblemente originados por depósitos fluviales de la antigua desembocadura del río Usumacinta.

La distribución de los componentes principales de las playas (Qt-Ft-Lt), permite describir el comportamiento de los componentes a lo largo del litoral. Las particularidades de cada playa van a influir directamente con la distribución y variación de dichos componentes, ya que los factores exógenos y endógenos pueden tomar mayor relevancia dependiendo de la zona (Figura 44).

Según la distribución de los componentes principales, el cuarzo tiende a disminuir su concentración hacia las playas del oriente a partir de la playa Carrillo (10) y aumenta la cantidad de fragmentos líticos y feldespatos, siendo siempre en mayor proporción la cantidad de fragmentos líticos.

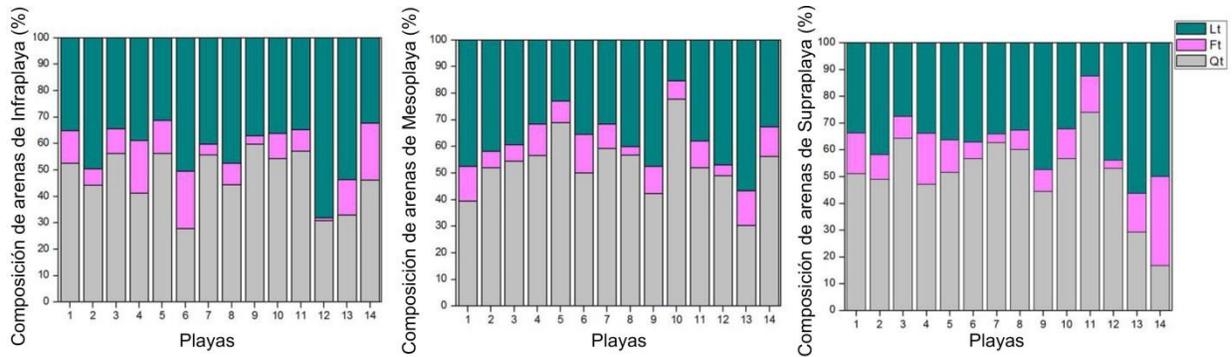


Figura 44. Distribución de Qt-Ft-Lt en el litoral del área estudiada en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Qt: cuarzo total; Ft: feldespatos totales; Lt: fragmentos líticos totales.

Lo cual puede estar asociado al transporte de sedimentos a través del río Grijalva, y la concentración más alta de cuarzo hacia las playas del occidente puede estar asociada a los factores de corrientes y vientos que tienen esa dirección facilitando el transporte litoral de los sedimentos y favoreciendo la acumulación y depósito de minerales resistentes como el cuarzo, teniendo correlación con el mayor tamaño de grano y mayor madurez composicional.

La distribución de los componentes de los fragmentos líticos, procedentes de rocas sedimentarias, rocas volcánicas, metamórficas (Lv,Ls,Lm+Lp), brinda la oportunidad de inferir el origen o procedencia de los sedimentos del área estudiada y en cuáles zonas la acumulación y depositación está controlada en parte por la litología del área fuente (Figura 45).

Las arenas de playa presentaron en su composición lítica principalmente fragmentos de rocas sedimentarias y de rocas metamórficas (siendo los líticos plutónicos muy escasos) y en menor proporción de rocas volcánicas.

Los fragmentos de rocas metamórficas son esquistos que aumentan su presencia en las playas hacia el oriente desde la playa 10 a la 14. En cuanto a los fragmentos de rocas volcánicas su mayor acumulación está entre las playas 5 a 9, Los líticos sedimentarios

proceden posiblemente de las areniscas de las formaciones terciarias que son erosionadas por los cauces que desembocan en la zona..

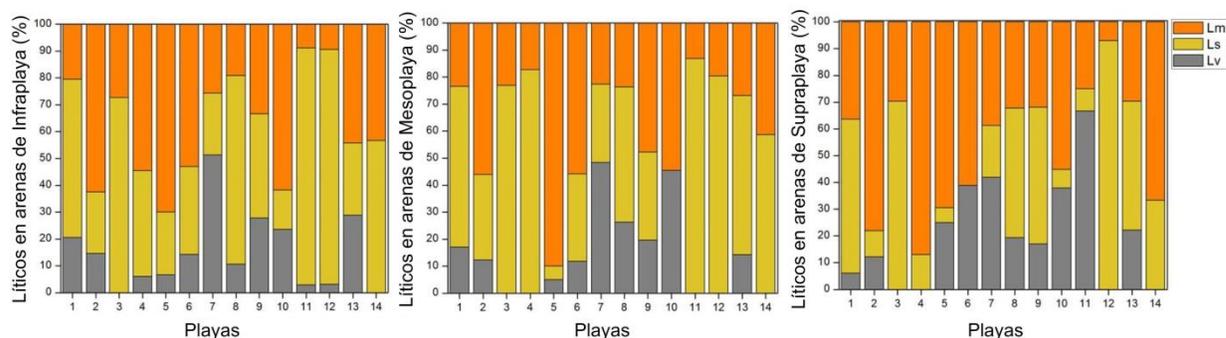


Figura 45. Distribución de Lv,Ls,Lm-Lp en el litoral del área estudiada en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Lv: fragmentos líticos volcánicos; Ls: fragmentos líticos sedimentarios; Lp: fragmentos líticos plutónicos; Lm: fragmentos líticos metamórficos.

#### 9.4 Geoquímica de elementos mayores

La concentración de SiO<sub>2</sub> en infraplaya, mesoplaya y supraplaya, varía entre 77% y 73%, se debe principalmente a la presencia de cuarzo generado por la erosión y transporte a través de los ríos de la zona, pero no es la única fuente de este elemento, todos los silicatos sirven de aporte de SiO<sub>2</sub>. En la mesoplaya de la playa Carrillo Puerto existe un empobrecimiento de hasta 53%, y en la supraplaya de la playa Campechito igualmente hasta 15%. En los dos casos hay concentración elevada de elementos mayores como Ti (3%), Fe (13%) y Mn (0.3%) para Carrillo Puerto y TiO<sub>2</sub> (18%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (39%) y MnO (1%) para Campechito, lo cual indica condiciones de baja energía en el lugar de depositación puesto que estos óxidos provienen de minerales que no son resistentes al oleaje y a la corriente, y también indican que en el área fuente de los sedimentos, cuenca río Grijalva-Usumacinta, existe la presencia de rocas de composición básica.

El mayor contenido de SiO<sub>2</sub> se encuentra en la playa Santa Ana (3) con 86.10%, debido a la retención de sedimentos generado por la escollera en Sánchez Magallanes. En contraste, el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>2</sub>O y MgO, no supera el 1%; como lo indica la correlación negativa

entre el cuarzo y dichos óxidos (Anexo 1). Lo cual indica que las condiciones de depositación hacia el occidente del área de estudio son diferentes que hacia la parte de la desembocadura del río Grijalva Usumacinta. Al occidente del área de estudio se tienen elementos y óxidos que hacen parte de minerales más resistentes al transporte, oleaje y corrientes, como es el caso del cuarzo, y al encontrarse con una barrera artificial como la escollera en Sánchez Magallanes se retiene ese sedimento.

De acuerdo con las concentraciones de  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$  y  $MgO$ , se pueden diferenciar dos áreas: 1. Influencia directa de la desembocadura del río Grijalva, 2. Hacia el occidente de la desembocadura, sin influencia directa del río.

Las playas Carrillo Puerto (10) hasta Campechito (14), en infraplaya, presentan arenas enriquecidas en  $MgO$ ,  $CaO$  y  $P_2O_5$ . El  $Ca$  procede de restos de conchas y bivalvos que se registraron en la petrografía (Figura 43); el  $MgO$  y el  $P_2O_5$  derivan de minerales como micas (muscovitas) y hornblendas y minerales pesados como monazita, como se encuentra registrado en el trabajo de Castellanos (1993).

En infraplaya, Pajonal (5), Carrillo Puerto (10) y Campechito (14), los sedimentos tienen enriquecimiento en todos los minerales provenientes de minerales pesados como ilmenita, magnetita, zircón y cromita ( $Zr$  y  $Cr$ , elementos traza en Figura 30).

La playa Carrillo Puerto (10), tiene arenas enriquecidas en elementos derivados de minerales pesados y de los líticos, y están empobrecidas en  $SiO_2$ , aunque también presentan valores altos en  $Ca$ , que según la petrografía proceden de biógenos carbonatados (Figura 43).

Debido a los bajos valores de  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $Na_2O$ , se puede inferir que la presencia de feldespatos es escasa como se observa en la petrografía (Figura 40).

La playa Pajonal (5) tiene valores anómalos altos de  $TiO_2$  (0.85%),  $MnO$  (0.10%) y  $MgO$  (3.87%), difiriendo de las playas contiguas, posiblemente por un evento oceánico extraordinario y aumento de la energía en el ambiente de depositación, ya que estos valores

solamente se registran en mesoplaya también se podría inferir que están asociados con la presencia de hornblenda que procede de líticos volcánicos.

En la supraplaya de Macayo (4), Carrillo Puerto (10) y Campechito (14), los elementos como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_3$  están enriquecidos y especialmente en Campechito (14), que probablemente está relacionado con alguna condición de tormenta como el paso de la tormenta tropical Hermine (Figura 9) que pudo exhibir sedimentos de anteriores depósitos fluviales (Figura 36). En las otras playas se registra un leve empobrecimiento en dichos elementos o están en el promedio de UCC (Corteza continental superior, por sus siglas en inglés). Mientras que en la playa La Estrella (12) debido a la presencia de carbonatos en su registro (Figura 38) tiene enriquecimiento en  $\text{CaO}$ .

Por otra parte, la madurez composicional de las arenas se determina según la proporción de  $\text{SiO}_2$  frente a  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ , ya que los minerales como el cuarzo son más resistentes a la erosión como al transporte, en tanto que los feldespatos tienden a ser más vulnerables a la erosión (Figura 46).

La mayoría de las muestras presentan un contenido alto en  $\text{SiO}_2$ , demostrando su madurez composicional como está registrado también en la petrografía por el contenido de cuarzo (Figura 40), las muestras de supraplaya de Campechito (14) y mesoplaya de Carrillo Puerto (10), presentan baja madurez composicional de acuerdo con el bajo contenido de  $\text{SiO}_2$ .

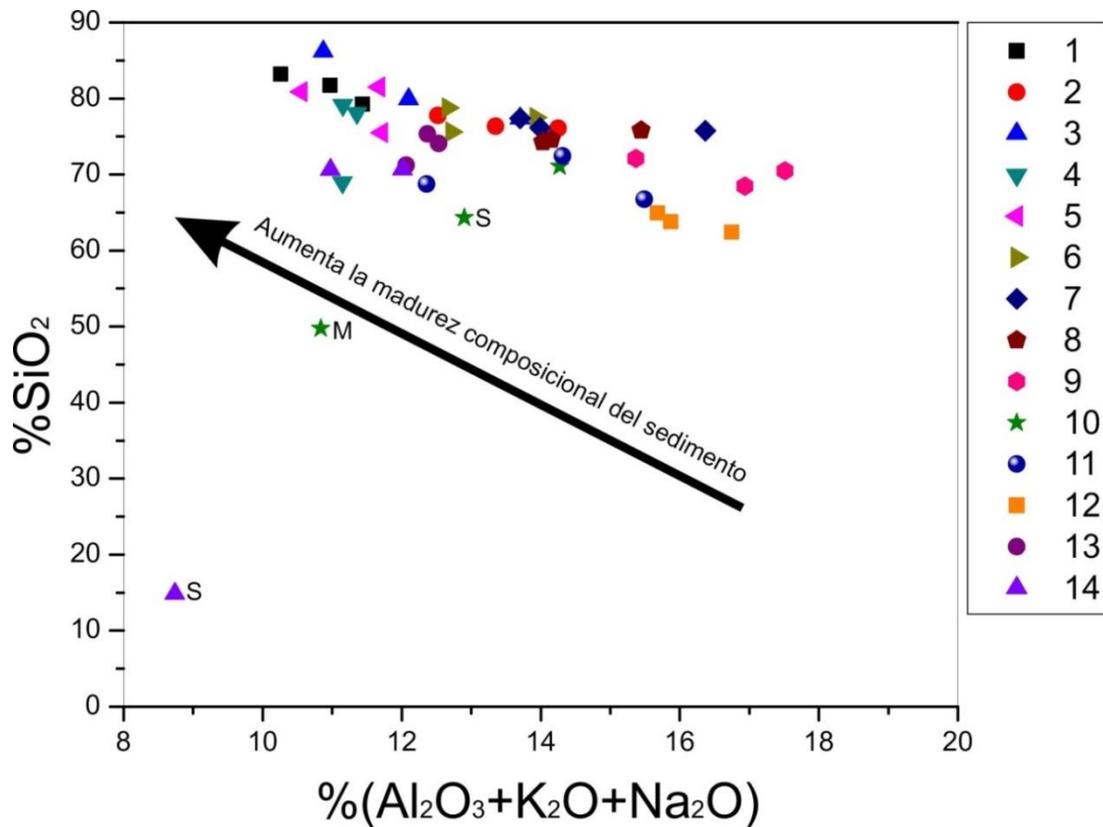


Figura 46. Diagrama de madurez composicional de sedimentos (Herron, 1988).

Las playas que presentan mayor madurez composicional están localizadas al extremo occidental del área de estudio, desde Tonalá (1) hasta Pajonal (5) en las cuales se presenta el incremento y acumulación de  $\text{SiO}_2$ , debido al transporte litoral de los sedimentos a causa de la dirección de las corrientes hacia el occidente del Golfo de México, lo que genera que el cuarzo siendo más resistente que los otros componentes pueda ser concentrado hacia esta zona (Figura 46).

### 9.5 Geoquímica de elementos traza

La presencia de minerales pesados en todo el perfil de las playas al oriente de la zona de estudio indican la alta influencia de la desembocadura del río Grijava-Usumacinta en la formación de las playas contiguas a esta. La carga sedimentaria del río y su reflejo en la

composición de las playas 9 a 14, indican que los factores endógenos como la hidrografía, el relieve y la litología de la cuenca tienen mayor influencia en la depositación de los sedimentos que los factores exógenos.

Las playas desde Carrillo Puerto (10) hasta Campechito (14), en infraplaya, presentan anomalías positivas de Cr, Ni, y Zr, proporcionado por minerales pesados como cromita  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ , en donde la alta concentración de Cr y Ni puede indicar la procedencia de rocas ultramáficas (Armstrong-Altrin et al., 2012). La anomalía de Zr, en estas mismas playas se debe a la aparición de zircón ( $\text{ZrSiO}_4$ ) como mineral accesorio de rocas sedimentarias de las formaciones terciarias de Tabasco.

En mesoplaya los elementos que proceden de minerales pesados tienen anomalías positivas como son el Cr, Co, Ni, Th y U, los minerales correspondientes que están asociados son cromita, ilmenita y magnetita, y otros como zircón, rutilo y monazita; están en las playas localizadas hacia el oriente con alta influencia de las desembocaduras de los ríos. Por otro lado, en las playas hacia el occidente, los elementos mencionados, tienen anomalías negativas y una fuerte correlación negativa con Rb, Sr y Ba (Anexo 1), de ahí que se observa una anomalía ligeramente positiva de Rb, Sr y Ba en las playas hacia el occidente.

Nuevamente en supraplaya se encuentran anomalías positivas para los elementos asociados con minerales pesados y negativas para los elementos que tienen correlación negativa y que son en alguna medida incompatibles, tales como Rb, Sr, Cs y Ba. Lo anterior se aprecia en las playas Carrillo Puerto (10), El Bosque (11) y Campechito (14). Las otras playas tienen anomalías ligeramente negativas o acordes con la UCC en estos elementos.

#### 9.6 Geoquímica de tierras raras

La playa de mayor contenido de  $\text{SiO}_2$ , Santa Ana (3) con 86% se observa que en todo el perfil de playa, la concentración de REE es la más baja de todas las playas de estudio. Por el contrario, en supraplaya de Campechito (14) con 93% de acumulación de minerales

pesados, con los cuales están asociados los REE, la tendencia de la normalización de REE está sobre el valor promedio de la condrita y de las otras playas en estudio.

La normalización de REE según los valores de la condrita y la anomalía de Eu proporcionan información sobre la procedencia de los sedimentos, Las rocas de composición félsica como dacitas y andesitas son caracterizadas por una relación alta entre LREE/HREE con anomalía negativa de Eu y para rocas de composición máfica como basaltos, la relación entre LREE/HREE es baja y la anomalía de Eu es negativa. La concentración de Eu es importante analizarla puesto que el  $\text{Eu}^{2+}$  sustituye al Ca en las plagioclasas cálcicas (Armstrong et al., 2012), que hacen parte de los basaltos de composición subalcalina (Kasper et al., 2016).

Las muestras de infraplaya en el área de estudio tienen valores por debajo del promedio de UCC y en cuanto a la normalización con la condrita los valores siguen el patrón y la anomalía de Eu no está marcada.

En el caso de los sedimentos de mesoplaya de Pajonal (5), El Bosque (10) y Campechito (14), tienen un incremento en los valores de REE tanto en el valor con respecto a UCC como a la condrita con anomalías negativas para Eu, sugiriendo el origen en rocas de composición félsica; por otro lado las arenas de playas con valores inferiores son Santa Ana (3) y El Limón (7), con un comportamiento de Eu siguiendo el rango normal. En estas últimas playas, están localizadas las escolleras y en petrografía y geoquímica de elementos mayores se registraron altos valores para cuarzo y  $\text{SiO}_2$ , respectivamente; indicando como se mencionó anteriormente, que el cuarzo tiene efecto de dilución en los REE.

En supraplaya se presenta el caso de Campechito (14) en donde se incrementa notablemente el enriquecimiento de REE con respecto a UCC y a la condrita y con anomalía negativa muy marcada de Eu. Las playas restantes siguen el patrón normal para REE, aunque en la playa Santa Ana (3) sí se registra empobrecimiento de REE a causa de la presencia del cuarzo.

## 9.7 Correlación entre parámetros texturales, petrográficos y geoquímicos.

En el análisis de las correlaciones (Anexo 1) se busca determinar las asociaciones entre parámetros (Rollinson, 1993), en este caso valores de tamaño de grano y clasificación, petrografía con la composición de Qt (cuarzo total), Fk (feldespato potásico), Fp (plagioclasa), Lv (fragmentos líticos volcánicos), Ls (fragmentos líticos sedimentarios), Lm (fragmentos líticos metamórficos), Lp (fragmentos líticos plutónicos), Mi (micas) y MP (minerales pesados), y de geoquímica con la concentración de elementos mayores, traza y REE.

La correlación está definida como la medida de la asociación entre dos variables medidas de un número de individuos y es cuantificada con el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), el valor varía entre -1 y 1. (Rollinson, 1993). Según el Análisis Geoquímico de Datos de Rollinson (1993) el valor del coeficiente: 1.  $r=1$ , es de perfecta afinidad y perfecta relación linear. 2.  $r = -1$ , es de perfecta afinidad negativa. 3.  $r = 0$ , no existe relación entre las variables.

La significancia del coeficiente de correlación se estima para este caso al 5% (0.05), con Grados de libertad ( $GL = n-2$ ,  $n =$  número de muestras;  $GL = 42 - 2 = 40$ ). El valor tabulado es 0.304. Si el valor calculado es mayor que el valor tabulado (0.304), el coeficiente de correlación de la muestra indica que existe un 95% de probabilidad que la relación observada en la muestra se aplique a una población. El valor tabulado se obtuvo de datos de Sachs (1984) en Rollinson (1993).

Se presentan a continuación las relaciones más relevantes entre los parámetros analizados:

### A. Parámetros texturales

- Tamaño de grano ( $Mz\phi$ ): correlación positiva con los líticos volcánicos (0.373),  $Al_2O_3$  (0.461), MgO (0.465), CaO (0.434), Ni (0,610), Rb (0.420) y Cs (0,539), en donde se sugiere que el tamaño de arenas muy finas hay mayor presencia de los compuestos y elementos nombrados y la correlación negativa con  $SiO_2$  (-0,435)

indica mayor presencia de cuarzo en tamaños más gruesos como arenas finas, medias y gruesas.

- La clasificación ( $\sigma\phi$ ): con relación al tamaño de grano tiene correlación negativa (-0.449), las partículas más gruesas ( $Mz\phi\leq 1$ ) están menos clasificadas ( $\sigma\phi\geq 0.5$ ).

## B. Parámetros composicionales

El cuarzo (Qz) tiene correlación negativa con los minerales pesados (MP) (-0.574) y con los elementos mayores  $TiO_2$  (-0.560),  $Fe_2O_3$  (-0.535), MnO (-0.565) y  $P_2O_5$  (-0.556), los cuales son los que conforman la ilmenita, magnetita y monacita respectivamente; con todos los elementos traza asociados a los mismos V, Cr, Co, Ni, Y, Zr, Nb, Th, U (-0.485 a -0.587) haciendo parte de la cromita, monazita, micas y hornblendas.

Los feldespatos potásicos (Fk) y plagioclasas (Fp) no presentan significativas correlaciones posiblemente por ser altamente alterables por las condiciones climáticas y son afectadas por el intemperismo químico.

Los líticos volcánicos (Lv) tienen correlación negativa con los líticos sedimentarios (Ls) (-0.331) y positiva con el tamaño de grano (0.373), indicando que pertenece a la fracción más fina de la muestra. Los líticos sedimentarios (Ls) tienen correlación positiva con  $Al_2O_3$  (0.318) y  $K_2O$  (0.545), sugiriendo así la presencia de feldespatos potásicos dentro de sus componentes, siendo posiblemente su roca fuente areniscas feldespáticas de unidades terciarias.

Los líticos metamórficos (Lm) no tienen correlaciones importantes posiblemente por la cantidad de elementos presentes en su estructura y por el bajo conteo de los mismos respectivamente. Las rocas metamórficas al tener texturas de grano grueso, es menos probable encontrarlas en fracciones finas de arenas, caso contrario con las rocas volcánicas que tienen textura fina y sí se encuentran en las fracciones finas de las arenas (Carranza-Edwards, 1994).

Los minerales pesados (MP) tienen fuertes correlaciones positivas con todos los elementos que son afines a su composición como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , todos los elementos traza exceptuando Rb, Sr, Cs y Ba, y todos REE; confirmando de esta manera la presencia de los minerales antes mencionados.

### C. Parámetros geoquímicos

Los elementos mayores están agrupados de acuerdo con su afinidad y sus correlaciones entre ellos y con los demás elementos. Se aprecia que entre el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  tienen correlaciones positivas, siendo la mayor entre  $\text{K}_2\text{O}$  Y  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.686) ya que hacen parte de los componentes de los feldspatos potásicos; y tienen correlaciones negativas con los elementos afines de los minerales pesados (MP).

El  $\text{Ti}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , tienen correlaciones fuertes positivas entre ellos, cercanas a 1; de igual manera con los elementos traza exceptuando Rb, Sr, Cs y Ba y con REE, excluyendo el  $\text{MgO}$  que no presenta ningún tipo de relación con REE. El  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tiene solamente correlación positiva con  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  por la formación de los feldspatos potásicos y de las plagioclasas; y el  $\text{CaO}$  que no presenta correlaciones importantes debido a su escasa abundancia.

Los elementos traza están agrupados en Sc, V, Cr, Co, Ni, Y, Zr, Nb, Pb, Th y U, con correlaciones positivas entre ellos y con los elementos que conforman los minerales pesados (MP); las correlaciones negativas de los elementos anteriormente mencionados son con Rb, Sr, Ba y Cs.

Los ETR (REE) tienen fuertes correlaciones positivas entre ellos, aproximadamente de 1 y de igual forma con el conteo de minerales pesados,  $\text{Ti}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , y correlaciones negativas con el conteo de cuarzo (Qz),  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ . Los REE están siendo transportados por minerales asociados como ilmenita, cromita y magnetita.

## **10. CONCLUSIONES**

- **Textura y morfología de playas**

En los perfiles de playa y el análisis textural existe relación entre el tamaño de grano y la pendiente y la extensión de la playa, cuando el sedimentos es más fino (arena fina a muy fina) los perfiles tienden a ser de menor pendiente y más extensos, como en las playas Miramas (9) a Campechito (14) (Figura 14 a Figura 18).

Los sedimentos gruesos se registraron en la mesoplaya de Santa Ana (3) en donde está localizada la escollera lo que refleja que la dinámica litoral y el transporte de los sedimentos están siendo bloqueados generando acumulación en esta zona de la playa. Las escolleras e infraestructuras construidas en la playa, generan un cambio en la dinámica y transporte litoral de los sedimentos, de donde viene el tren de olas va a existir depositación y del otro lado erosión, ya que el porte de os sedimentos se encuentra retenido.

La disminución en la clasificación de la arena, de bien clasificado en las playas adyacentes a moderadamente bien clasificado en la playa La Estrella (12), puede estar relacionado con la cantidad de biógenos registrados en los sedimentos ya que los biógenos son conchas y bivalvos y al disolverse el carbonato de calcio, su componente principal, presenta formas irregulares.

- **Mineralogía**

La distribución de los componentes principales de las playas (Qt-Ft-Lt), permite describir su comportamiento a lo largo del litoral. Las particularidades de cada playa van a influir directamente con la distribución y variación de dichos componentes, ya que los factores exógenos y endógenos pueden tomar mayor relevancia dependiendo de la zona.

La relación entre el tamaño de grano y los líticos volcánicos se genera a raíz de la textura de la roca volcánica fuente de las arenas, la textura de las rocas volcánicas es fina por lo cual se van a registrar líticos volcánicos en la fracción fina de la arena.

Los factores endógenos y exógenos sí afectan local y regionalmente la distribución de los sedimentos puesto que pueden llevar a la acumulación de minerales pesados en las zonas de mayor energía como en Campechito (14) o que por efecto de la acción del viento genera mayor transporte del cuarzo el cual es menos denso aumentando la concentración de minerales pesados, o en el caso contrario, también se pueden considerar factores exógenos la construcción de escolleras para evitar la erosión de las playas y generan la acumulación de cuarzo y feldespatos, como sucede en las playas Santa Ana (3) y El Limón (7).

Las escolleras y construcciones de prevención de la erosión propician la acumulación de cuarzo y feldespatos, como es el caso para Sánchez Magallanes en playa Santa Ana con 86.10% de  $\text{SiO}_2$  y las condiciones de alta energía y tormentas propician la erosión dejando al descubierto minerales pesados como es el caso de la supraplaya de Campechito (14) con hasta 93% de MP.

Se puede inferir desde el análisis composicional de los sedimentos las condiciones de tormenta como es el caso de la tormenta tropical Hermine que pudo propiciar la erosión de la costa permitiendo observar minerales pesados en Campechito (14).

- **Geoquímica**

Los elementos mayores comparados según el promedio del área facilita la determinación de diferencias entre las playas localizadas hacia la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, las playas hacia el occidente y las que tienen escolleras en las playas Santa Ana (3) y El Limón (7). Este resultado de la comparación sigue los mismos patrones de la normalización de Rudnick (2003) y Taylor & McLennan (1985).

La anomalía positiva de  $\text{P}_2\text{O}_5$  se da en todos los diagramas de normalización según el promedio del área y UCC. La presencia de  $\text{P}_2\text{O}_5$  se debe al registro de monazita en las arenas, lo cual también se confirma en el análisis de tierras raras con el La y Ce.

Con la normalización de elementos traza se confirma la presencia de minerales pesados en la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta, con las anomalías positivas especialmente

de Cr, Ni y Zr. Las mayores concentraciones de estos elementos se encontraron en supraplaya.

Las anomalías positivas de tierras raras en las playas hacia el oriente y el empobrecimiento de las mismas hacia occidente, demuestran parámetros diferentes en cada extremo del litoral estudiado.

- **Dinámica costera**

Según los análisis cuantitativos y los coeficientes de Pearson entre los parámetros texturales, composicionales y geoquímicos existen correlaciones positivas y negativas que indican las relaciones sedimentológicas, aunque en el caso de los líticos, los cuales no tienen correlaciones significativas se debe a la variación en sus componentes.

Los parámetros oceanográficos obtenidos al momento de la toma de la muestra, como la dirección del viento con la brújula, la toma de las mediciones por medio de la pelota de tenis para la dirección y velocidad relativa de las corrientes, la marea y el oleaje, son cruciales para la integración con la información luego obtenida de las muestras de arena.

El efecto de los represamientos de los ríos en la costa tiene consecuencias en la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta en el tamaño de las partículas más finas que se van a depositar en las playas, generando cambios en el ecosistema costero.

En las playas con influencia del río Grijalva – Usumacinta, playas 9 a 14, están controladas por los factores endógenos como la hidrografía, relieve y litología de la cuenca, ya que la carga de partículas del cauce se ve reflejada en la composición y geoquímica de los sedimentos. Las playas hacia el occidente del área es formadas con arenas que han sido transportadas por medio del tren de olas que va dirigido hacia el occidente, generando así una mezcla de tamaño de tamaño de partículas en todo el perfil de la playa y pasando gradualmente de bien clasificadas a mal clasificadas en esa dirección, cambiando también la composición a playas con altos contenido de cuarzo, el cual es más resistente que los

otros componentes como los feldespatos y los líticos, y que resiste el transporte litoral generado por las corrientes y el tren de oleaje.

## 11. LITERATURA CITADA

Armstrong-Altrin, J.; Lee, J.; Kasper-Zubillaga, J.; Carranza-Edwards, A.; García, D.; Eby, N.; Balaram, V.; Cruz-Ortiz, N. (2012). Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde*, 72, 345 – 362.

Arias-Madrid, D; López-Paz, O; Jiménez-Builes, J. (2012). Análisis de sedimentos utilizando un enfoque de la programación estructurada. *Rev. Tecno Lógicas*, 29, 49-67.

Bernabeu, A.M.; Medina, R.; Vidal, C.; Muñoz-Pérez, J.J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Rev. Soc. Geol. De España*, 14 (3-4), 227 – 236.

Botero-Saltaren, C.; Pereira Pomárico, C.; Cervantes, O. (2013). Estudios de calidad ambiental de playas en Latinoamérica: revisión de los principales parámetros y metodologías utilizadas. *Investigación ambiental*, 5(2).

Carranza-Edwards, A.; Gutiérrez-Estrada, M.; Rodríguez-Torres, R. (1975). Unidades Morfo-Tectónicas Continentales de las Costas Mexicanas. En: *Anales del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología*, 2 (1), 81 - 88.

Carranza-Edwards, A., Caso-Chávez, M. (1994). Zonificación del perfil de playa. *GEO-UNA*, 2 (2), 26-32.

Carranza-Edwards, A.; Rosales-Hoz, L.; Santiago-Pérez, S. (1994). Provenance memories and maturity of Holocene sands in Northwest Mexico. *Can. J. Earth Sci*, 31, 1550-1556.

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

Carranza-Edwards, A., G. Bocanegra-García, L. Rosales-Hoz and L. De Pablo Galán, (1996). Beach sands from Baja California Peninsula, Mexico. *Sedimentary Geology*, 119, 263-274.

Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Centeno-García, E., Lozano-Santa Cruz. (2001). Provenance of beach grey sands from western Mexico. *Journal of South American Earth Science*. 14, 291 – 305.

Carranza-Edwards, A. (2001). Grain Size and Sorting in Modern Beach Sands. *Journal of Coastal Research*, 17 (1), 38-52.

Carranza-Edwards, A., Cabrera-Ramírez, M. (2002). The beach environment in Mexico as a potential source of placer minerals. *Marine Georesources and Geotechnology*, 20, 187 – 198.

Carranza-Edwards, A.; Rosales-Hoz, L.; Caso-Chavez, M.; Morales De La Garza, E. (2004). La geología ambiental de la zona litoral. En: *Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Volumen I*. Secretaría de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Ecología. México.

Carranza-Edwards, A.; Marín-Guzmán, A.; Rosales-Hoz, L. (2010). Problemática ambiental en la gestión costera-marina, 89-100. En: E. Rivera-Arriaga, I; Azuz-Adeath, L; Alpuche Gual; Villalobos-Zapata, G. (eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche CetyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.

Carranza-Edwards, A. (2011). Mexican litoral of the Gulf of México. En Noreen A. Buster and Charles W. Holmes (Eds.) *Gulf of Mexico Origin, Waters and Biota* (Volume 3, Geology). (17), 291-296. Texas A&M University Press, College Station, 446 p. Harte Research Institute John W. Tunnell Jr., General Editor and USGS.

Carranza-Edwards, A.; Márquez-García, A.; Tapia-González, C.; Rosales-Hoz, L.; Alatorre-Mendieta, M. (2015). Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noreste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67 (1), 21 - 43.

Carranza-Edwards, A.; Kasper-Zubillaga, J.; Martínez-Serrano, R.; Cabrera-Martinez, M.; Rosales, L.; Alatorre-Mendieta, M.; Márquez-García, A.; Lozano-Santa Cruz, R. (2019). Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geological Journal*. (54), 552 - 563.

Castellanos-Trujillo, L. (1993). Concentración teórica de ilmenita contenida en playas de Tabasco y Campeche. En: *Anales Instituto Ciencias del Mar y Limnología*. Universidad Nacional Autónoma de México, 19 (2), 131 – 135.

Castro-Soriano, B. (2014). Morfología y vulnerabilidad costera por erosión en el litoral de Campeche, México. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

CONAGUA. (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Programa Integral Hídrico de Tabasco.

Davies, J. (1980). *Geographical variation in coastal development*. 2<sup>nd</sup> ed. Geomorphology text. London, New York : Longman. 212 p.

Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional. (1980). *Trayectorias ciclónicas 1960 – 1980*. Secretaría de agricultura y recursos hidráulicos.

Faure, G. (1991). *Principles and applications of Inorganic Geochemistry*. Estados Unidos: Macmillan Publishing Company.

- Folk, R. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company.
- Franzinelli, E.; Potter, P. (1983). Petrology, Chemistry, and Texture of Modern River Sands: Amazon River System. *Journal of Geology*, 91 (1), 23-91.
- Henderson, P. (1984). *Rare Earth Element Geochemistry*. Department of Mineralogy, British Museum (Natural History), Elsevier Science Publishers, Londres, UK.
- Hernández-Santana, J.; Ortiz-Pérez, M.; Méndez-Linares, A.; Gama-Campillo, L. (2008). Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones geográficas (Mx)*, 65, 7 - 21.
- Herron, M. (1988). Geochemical Classification on Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 820 – 829.
- INEGI. (1984). *Geología de la República Mexicana*.
- INEGI. (2001). *Síntesis de información geográfica del estado de Tabasco*.
- Instituto de Geología. (2007). *Actualización y adaptación de la carta Geológica de la República Mexicana, escala 1: 2000000*, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Instituto de Ingeniería-UNAM. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de presas del río Grijalva ante los impactos del cambio climático*. 186.
- Kasper-Zubillaga, J.; Linares.López, C.; Espino de la Fuente-Muñoz, C. (2016). Prevalence of opaque minerals in coastal sands, western Gulf of Mexico, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68, 323-338.
- Kerr, P. *Mineralogía óptica*. (1965). Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. 433.
- Lawrence, M. (1980). *Informe preliminar de la tormenta tropical Hermine*. National Hurricane Center.
- Lozano, R.; Bernal, J. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. (2005). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (3), 329 - 344
- Macías, J.; Arce, L.; Mora, C.; Espíndola, M.; Saucedo, R. (2003). A 550-year old Plinian eruption at El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: Explosive volcanism linked to reheating of the magma reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 108.

Macías, J. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana*. Volumen conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana, 57 (3), 379-424.

Marín-Guzmán, A.; Carranza-Edwards, A. (2011). Inferencia del transporte litoral dominante del Golfo de México. En: *Interacciones en el Planeta Tierra*. ICML, UNAM. México, DF, 39 – 43.

Márquez-García, A.; Campos-Verduzco, R.; Castro-Soriano, B. (2010). Sedimentología y morfología de la playa de anidación para tortugas marinas, El Carrizal, Coyuca de Benítez, Guerrero. *Hidrobiológica* 2010, 20 (2): 110-112.

Medina, R.; Losada, I.; Losada M.; Vidal, C. (1995). Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. *Ingeniería del Agua*, 2 (Núm. Extraordinario), 133.

Mendieta-Lora, M.; Mejía-Ledezma, R.; Kasper-Zubillaga, J.; Arellano-Torres, E. (2018). Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands closet to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Chemie der Erde*. Article in Press.

Mendujano-Velasquez, J.; Vazquez-Meneses, M. (1996). Reseña bibliográfica y análisis stratigráfico de la sierra de Chiapas. *Instituto Mexicano del Petróleo*. 65(1), 20 - 45.

Mori, L.; Gómez-Tuena, A.; Schaaf, P; Goldstein, S.; Pérez-Arvizu, O.; Solís-Pichardo, G. (2009). Lithospheric Removal as a Trigger for flood Basalt Magmatism in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Petrology*, 50 (11), 2157 - 2186.

Ortiz-Royero, J. (2015). *Introducción a la Oceanografía Física*. Editorial Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.

Rollinson, H. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Pearson, Edimburgo.

Rudnick, R.; Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. In: *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, New York. 3, 1 – 64.

Salisbury-Dana, E. (1981). *Tratado de mineralogía*. Compañía Editorial Continental, S.A. Ciudad de México, México.

Selley, R. (2000). *Applied Sedimentology*. Royal School of Mines. Imperial College of Science, Technology and Medicine. Londres, Reino Unido. 543.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). Carta geológico-minera Coatzacoalcos E15-1-4. México.

- Servicio Geológico Mexicano. (2004). Carta geológico-minera Frontera E15-5. México.
- Servicio Geológico Mexicano. (2005). Carta geológico-minera Tuxtla Gutiérrez E15-11. México.
- Servicio Mareográfico Nacional. Las mareas en México (2019). Recuperado de <http://www.mareografico.unam.mx/>. Consultado: abril de 2018.
- Silva-Casarín, R.; Martínez, M.; Moreno-Casasola, P.; Mendoza-Baldwin, E.; López-Portillo, J.; Lithgow, D.; Vázquez, G.; Matínez-Martínez, R.; Monroy-Ibarra, R.; Cáceres-Puig, J.; Ramírez-Hernández, A.; Bpy-Tamborrell, M. (2017). Aspectos generales de la zona costera. UNAM; INECOL. 54pp.
- Silva-Casarín, R.; Lithgow, D.; Chávez, V. (2019). Criterios para la implementación de infraestructura verde en zonas costeras. Instituto de Ingeniería: UNAM. México.
- Tapia-Fernandez, H; Armstrong-Altrin, J; Selvaraj, K. (2017). Geochemistry and U-Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 346 - 361.
- Uchupi, E. (1967). Bathymetry of the Gulf of Mexico. Reprinted from transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies. 17. 161-172.
- Vázquez-Gutiérrez F. (1994). El sistema lagunar El Carmen-Pajonal-La Machina del estado de Tabasco: su hidrodinámica, la estabilidad de sus bocas y de su línea de costa. Universidad Nacional Autónoma de México, 133.
- Whitney, D.; Evans, B. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 95, 185 - 187.
- Zetina, M.; Sánchez, P.; Osorio, R.; Mariño, T.; Castillo, C.; Cauich, T. (2008). Análisis de modelos de perfil de playa en equilibrio aplicados a una playa de Yucatán, México. Ingeniería, septiembre-diciembre. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México. 12 (3), 15 – 31.
- Historical Hurricane Tracks (2019). Recuperado de <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>. Consultado: septiembre de 2018.
- Arcgis 10. (Versión 10) “software” ArcGIS Runtime Software Developer Esri. 2012
- Mar V1.0 (Versión 1) “software”. Predicciones de mareas en México. CICESE. 2011. <http://predmar.cicese.mx/programa/>. Consultado: abril de 2018.
- OriginPro 8. (Versión 8) “software”. Origin Lab Corporation. One RoundHouse Plaza, Northampton, MA01060 USA, 2009

## 12. ANEXO I

Anexo 1.- Coeficientes de correlación de Pearson de parámetros texturales, composicionales y geoquímicos.

1. Coeficientes de correlación de Pearson de parámetros texturales (Mz $\phi$ : tamaño de partículas,  $\sigma\phi$ : desviación media gráfica inclusiva) y composicionales (Qt: cuarzo total, Fk: feldespato potásico, Fp: plagioclasa, Lv: fragmentos líticos volcánicos, Ls: fragmentos líticos sedimentarios, Lm: fragmentos líticos metamórficos, Lp: fragmentos líticos plutónicos y MP: minerales pesados); y elementos mayores y elementos traza. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|                                | Mz $\phi$ | $\sigma\phi$ | Qt     | Fk     | Fp     | Lv     | Ls     | Lm     | Lp     | MP     |
|--------------------------------|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mz $\phi$                      | 1,000     |              |        |        |        |        |        |        |        |        |
| $\sigma\phi$                   | -0,450    | 1,000        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Qt                             | -0,090    | 0,122        | 1,000  |        |        |        |        |        |        |        |
| Fk                             | -0,168    | -0,134       | -0,303 | 1,000  |        |        |        |        |        |        |
| Fp                             | -0,464    | -0,031       | 0,308  | -0,100 | 1,000  |        |        |        |        |        |
| Lv                             | 0,373     | -0,298       | 0,077  | -0,033 | -0,102 | 1,000  |        |        |        |        |
| Ls                             | 0,078     | 0,271        | -0,168 | -0,049 | -0,216 | -0,331 | 1,000  |        |        |        |
| Lm                             | -0,171    | 0,012        | -0,194 | 0,274  | 0,236  | 0,257  | -0,404 | 1,000  |        |        |
| Lp                             | 0,139     | 0,066        | 0,217  | -0,189 | 0,083  | -0,001 | -0,088 | -0,161 | 1,000  |        |
| MP                             | 0,072     | -0,159       | -0,575 | -0,126 | -0,232 | -0,200 | -0,299 | -0,222 | -0,035 | 1,000  |
| SiO <sub>2</sub>               | -0,435    | 0,195        | 0,488  | 0,243  | 0,414  | 0,160  | 0,107  | 0,355  | -0,083 | -0,856 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,461     | -0,072       | 0,148  | -0,420 | -0,190 | 0,247  | 0,319  | -0,157 | 0,302  | -0,256 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,107     | -0,160       | -0,561 | -0,172 | -0,254 | -0,178 | -0,256 | -0,249 | -0,038 | 0,991  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,158     | -0,173       | -0,536 | -0,199 | -0,285 | -0,181 | -0,275 | -0,265 | -0,005 | 0,984  |
| MnO                            | 0,088     | -0,162       | -0,566 | -0,171 | -0,248 | -0,188 | -0,262 | -0,244 | -0,044 | 0,993  |
| MgO                            | 0,465     | -0,302       | -0,198 | -0,093 | -0,339 | -0,127 | -0,223 | -0,217 | 0,157  | 0,487  |
| CaO                            | 0,434     | -0,099       | 0,004  | 0,034  | -0,269 | -0,170 | 0,013  | -0,304 | 0,257  | 0,099  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,220     | 0,016        | 0,205  | -0,169 | -0,148 | 0,179  | 0,263  | 0,083  | 0,151  | -0,434 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,028     | 0,292        | 0,249  | -0,069 | 0,091  | 0,136  | 0,545  | 0,006  | 0,080  | -0,648 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,080     | -0,141       | -0,557 | -0,177 | -0,174 | -0,148 | -0,253 | -0,190 | -0,076 | 0,960  |
| Sc                             | 0,219     | -0,239       | -0,504 | -0,185 | -0,307 | -0,204 | -0,310 | -0,260 | 0,027  | 0,945  |
| V                              | 0,155     | -0,201       | -0,527 | -0,176 | -0,267 | -0,163 | -0,319 | -0,249 | -0,008 | 0,984  |
| Cr                             | 0,093     | -0,143       | -0,576 | -0,156 | -0,246 | -0,177 | -0,219 | -0,243 | -0,060 | 0,981  |
| Co                             | 0,237     | -0,189       | -0,573 | -0,178 | -0,335 | -0,166 | -0,203 | -0,283 | -0,022 | 0,977  |
| Ni                             | 0,610     | -0,198       | -0,459 | -0,126 | -0,509 | -0,176 | 0,185  | -0,417 | 0,033  | 0,623  |
| Rb                             | 0,420     | 0,141        | 0,106  | -0,059 | -0,176 | 0,141  | 0,654  | -0,089 | 0,067  | -0,545 |
| Sr                             | -0,023    | -0,150       | 0,414  | -0,214 | 0,203  | 0,247  | -0,360 | 0,111  | 0,204  | -0,277 |
| Y                              | 0,177     | -0,210       | -0,520 | -0,165 | -0,279 | -0,175 | -0,321 | -0,253 | -0,003 | 0,980  |
| Zr                             | 0,073     | -0,133       | -0,587 | -0,154 | -0,246 | -0,173 | -0,201 | -0,229 | -0,068 | 0,971  |
| Nb                             | 0,147     | -0,191       | -0,536 | -0,172 | -0,262 | -0,175 | -0,300 | -0,252 | -0,020 | 0,990  |
| Cs                             | 0,539     | 0,134        | 0,045  | -0,271 | -0,334 | 0,024  | 0,608  | -0,177 | 0,079  | -0,322 |
| Ba                             | -0,270    | 0,319        | 0,361  | -0,155 | 0,381  | 0,236  | 0,296  | 0,169  | 0,007  | -0,648 |

|    | Mzφ   | σφ     | Qt     | Fk     | Fp     | Lv     | Ls     | Lm     | Lp     | MP    |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Pb | 0,245 | -0,077 | -0,281 | -0,347 | -0,264 | -0,305 | -0,091 | -0,230 | 0,095  | 0,646 |
| Th | 0,147 | -0,164 | -0,561 | -0,165 | -0,286 | -0,174 | -0,235 | -0,264 | -0,038 | 0,986 |
| U  | 0,133 | -0,147 | -0,579 | -0,167 | -0,278 | -0,177 | -0,202 | -0,257 | -0,050 | 0,980 |

\*Cont. Anexo 1.1

2. Coeficientes de correlación de Pearson de parámetros texturales (Mzφ: tamaño de partículas, σφ: desviación media gráfica inclusiva) y composicionales (Qt: cuarzo total, Fk: feldespato potásico, Fp: plagioclasa, Lv: fragmentos líticos volcánicos, Ls: fragmentos líticos sedimentarios, Lm: fragmentos líticos metamórficos, Lp: fragmentos líticos plutónicos y MP: minerales pesados); y tierras raras. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|    | Mzφ   | σφ     | Qt     | Fk     | Fp     | Lv     | Ls     | Lm     | Lp     | MP    |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| La | 0,036 | -0,132 | -0,536 | -0,140 | -0,167 | -0,230 | -0,170 | -0,205 | -0,090 | 0,901 |
| Ce | 0,033 | -0,129 | -0,529 | -0,138 | -0,160 | -0,235 | -0,164 | -0,202 | -0,094 | 0,889 |
| Pr | 0,030 | -0,126 | -0,515 | -0,137 | -0,149 | -0,240 | -0,157 | -0,198 | -0,097 | 0,869 |
| Nd | 0,030 | -0,124 | -0,507 | -0,137 | -0,146 | -0,242 | -0,152 | -0,196 | -0,100 | 0,857 |
| Sm | 0,023 | -0,121 | -0,490 | -0,135 | -0,133 | -0,243 | -0,150 | -0,186 | -0,105 | 0,834 |
| Eu | 0,040 | -0,106 | -0,325 | -0,128 | -0,077 | -0,220 | -0,078 | -0,137 | -0,127 | 0,590 |
| Gd | 0,016 | -0,119 | -0,470 | -0,131 | -0,117 | -0,243 | -0,146 | -0,175 | -0,108 | 0,805 |
| Tb | 0,015 | -0,122 | -0,477 | -0,128 | -0,117 | -0,243 | -0,154 | -0,174 | -0,109 | 0,815 |
| Dy | 0,012 | -0,123 | -0,480 | -0,126 | -0,116 | -0,241 | -0,160 | -0,171 | -0,110 | 0,818 |
| Ho | 0,017 | -0,127 | -0,506 | -0,130 | -0,134 | -0,235 | -0,172 | -0,180 | -0,108 | 0,857 |
| Er | 0,025 | -0,129 | -0,533 | -0,136 | -0,158 | -0,227 | -0,182 | -0,191 | -0,102 | 0,896 |
| Yb | 0,038 | -0,132 | -0,564 | -0,143 | -0,190 | -0,210 | -0,194 | -0,204 | -0,093 | 0,938 |
| Lu | 0,043 | -0,132 | -0,573 | -0,146 | -0,202 | -0,201 | -0,198 | -0,208 | -0,089 | 0,950 |

3. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos mayores y traza. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|                                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO    | MgO    | CaO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 1,000            |                                |                  |                                |        |        |        |                   |                  |                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0,120           | 1,000                          |                  |                                |        |        |        |                   |                  |                               |
| TiO <sub>2</sub>               | -0,870           | -0,205                         | 1,000            |                                |        |        |        |                   |                  |                               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0,909           | -0,167                         | 0,987            | 1,000                          |        |        |        |                   |                  |                               |
| MnO                            | -0,864           | -0,204                         | 0,999            | 0,988                          | 1,000  |        |        |                   |                  |                               |
| MgO                            | -0,714           | 0,024                          | 0,477            | 0,563                          | 0,473  | 1,000  |        |                   |                  |                               |
| CaO                            | -0,443           | 0,110                          | 0,066            | 0,177                          | 0,062  | 0,652  | 1,000  |                   |                  |                               |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,130            | 0,775                          | -0,399           | -0,392                         | -0,403 | -0,146 | 0,027  | 1,000             |                  |                               |
| K <sub>2</sub> O               | 0,461            | 0,593                          | -0,618           | -0,653                         | -0,625 | -0,526 | -0,248 | 0,686             | 1,000            |                               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -0,804           | -0,219                         | 0,973            | 0,945                          | 0,972  | 0,363  | -0,035 | -0,432            | -0,607           | 1,000                         |
| Sc                             | -0,915           | -0,148                         | 0,937            | 0,975                          | 0,943  | 0,673  | 0,309  | -0,385            | -0,698           | 0,876                         |
| V                              | -0,898           | -0,203                         | 0,983            | 0,997                          | 0,984  | 0,577  | 0,188  | -0,421            | -0,682           | 0,940                         |
| Cr                             | -0,844           | -0,203                         | 0,995            | 0,967                          | 0,992  | 0,414  | 0,002  | -0,383            | -0,571           | 0,979                         |

|    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO    | MgO    | CaO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|----|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| Co | -0,927           | -0,131                         | 0,987            | 0,988                          | 0,983  | 0,549  | 0,167  | -0,352            | -0,585           | 0,950                         |
| Ni | -0,874           | 0,159                          | 0,653            | 0,676                          | 0,634  | 0,672  | 0,517  | -0,053            | -0,248           | 0,597                         |
| Rb | 0,192            | 0,635                          | -0,501           | -0,512                         | -0,519 | -0,224 | 0,076  | 0,638             | 0,824            | -0,478                        |
| Sr | 0,184            | 0,374                          | -0,304           | -0,218                         | -0,279 | 0,087  | 0,179  | 0,234             | 0,022            | -0,334                        |
| Y  | -0,910           | -0,202                         | 0,977            | 0,994                          | 0,978  | 0,618  | 0,226  | -0,414            | -0,689           | 0,930                         |
| Zr | -0,818           | -0,193                         | 0,987            | 0,950                          | 0,984  | 0,367  | -0,054 | -0,369            | -0,541           | 0,977                         |
| Nb | -0,896           | -0,210                         | 0,992            | 0,996                          | 0,991  | 0,561  | 0,161  | -0,415            | -0,666           | 0,953                         |
| Cs | -0,086           | 0,727                          | -0,275           | -0,246                         | -0,283 | -0,028 | 0,210  | 0,584             | 0,645            | -0,280                        |
| Ba | 0,643            | 0,469                          | -0,622           | -0,669                         | -0,618 | -0,761 | -0,524 | 0,513             | 0,824            | -0,532                        |
| Pb | -0,743           | 0,051                          | 0,648            | 0,690                          | 0,652  | 0,639  | 0,261  | -0,142            | -0,336           | 0,603                         |
| Th | -0,885           | -0,185                         | 0,998            | 0,984                          | 0,994  | 0,492  | 0,085  | -0,377            | -0,597           | 0,970                         |
| U  | -0,868           | -0,171                         | 0,995            | 0,972                          | 0,991  | 0,441  | 0,034  | -0,362            | -0,559           | 0,975                         |

\*Cont. Anexo 1.3

4. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos mayores y tierras raras. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO   | MgO   | CaO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|----|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|--------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| La | -0,745           | -0,174                         | 0,918            | 0,874                          | 0,917 | 0,303 | -0,073 | -0,347            | -0,504           | 0,922                         |
| Ce | -0,735           | -0,171                         | 0,906            | 0,862                          | 0,905 | 0,294 | -0,073 | -0,341            | -0,496           | 0,911                         |
| Pr | -0,719           | -0,163                         | 0,886            | 0,842                          | 0,885 | 0,283 | -0,072 | -0,332            | -0,483           | 0,893                         |
| Nd | -0,711           | -0,156                         | 0,874            | 0,831                          | 0,874 | 0,277 | -0,071 | -0,324            | -0,474           | 0,882                         |
| Sm | -0,690           | -0,148                         | 0,851            | 0,808                          | 0,851 | 0,263 | -0,071 | -0,314            | -0,463           | 0,860                         |
| Eu | -0,506           | -0,033                         | 0,609            | 0,576                          | 0,611 | 0,156 | -0,063 | -0,182            | -0,305           | 0,627                         |
| Gd | -0,664           | -0,138                         | 0,821            | 0,779                          | 0,822 | 0,248 | -0,072 | -0,302            | -0,447           | 0,832                         |
| Tb | -0,671           | -0,145                         | 0,831            | 0,788                          | 0,832 | 0,254 | -0,072 | -0,310            | -0,457           | 0,842                         |
| Dy | -0,672           | -0,148                         | 0,833            | 0,791                          | 0,835 | 0,255 | -0,073 | -0,313            | -0,461           | 0,844                         |
| Ho | -0,705           | -0,161                         | 0,873            | 0,830                          | 0,873 | 0,276 | -0,075 | -0,330            | -0,484           | 0,881                         |
| Er | -0,738           | -0,173                         | 0,912            | 0,869                          | 0,912 | 0,297 | -0,076 | -0,345            | -0,505           | 0,917                         |
| Yb | -0,776           | -0,187                         | 0,954            | 0,912                          | 0,954 | 0,324 | -0,076 | -0,361            | -0,527           | 0,954                         |
| Lu | -0,787           | -0,191                         | 0,966            | 0,925                          | 0,966 | 0,333 | -0,076 | -0,366            | -0,533           | 0,965                         |

5. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos traza y tierras raras. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|    | Sc     | V      | Cr     | Co     | Ni     | Rb     | Sr     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sc | 1,000  |        |        |        |        |        |        |
| V  | 0,978  | 1,000  |        |        |        |        |        |
| Cr | 0,901  | 0,960  | 1,000  |        |        |        |        |
| Co | 0,952  | 0,982  | 0,978  | 1,000  |        |        |        |
| Ni | 0,684  | 0,659  | 0,645  | 0,751  | 1,000  |        |        |
| Rb | -0,531 | -0,547 | -0,462 | -0,404 | 0,169  | 1,000  |        |
| Sr | -0,099 | -0,188 | -0,364 | -0,314 | -0,411 | -0,199 | 1,000  |
| Y  | 0,982  | 0,998  | 0,953  | 0,981  | 0,683  | -0,537 | -0,191 |
| Zr | 0,878  | 0,941  | 0,997  | 0,965  | 0,623  | -0,447 | -0,382 |

|    | Sc     | V      | Cr     | Co     | Ni     | Rb     | Sr     |       |  |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--|
| Nb | 0,969  | 0,997  | 0,975  | 0,988  | 0,670  | -0,530 | -0,236 |       |  |
| Cs | -0,233 | -0,290 | -0,258 | -0,157 | 0,354  | 0,873  | -0,095 |       |  |
| Ba | -0,746 | -0,690 | -0,576 | -0,657 | -0,602 | 0,513  | 0,235  |       |  |
| Pb | 0,728  | 0,684  | 0,617  | 0,694  | 0,657  | -0,142 | -0,150 |       |  |
| Th | 0,934  | 0,979  | 0,994  | 0,992  | 0,690  | -0,458 | -0,331 |       |  |
| U  | 0,911  | 0,963  | 0,998  | 0,986  | 0,681  | -0,430 | -0,363 |       |  |
| La | 0,800  | 0,865  | 0,933  | 0,890  | 0,573  | -0,421 | -0,322 |       |  |
| Ce | 0,788  | 0,853  | 0,921  | 0,878  | 0,566  | -0,414 | -0,316 |       |  |
| Pr | 0,769  | 0,833  | 0,901  | 0,858  | 0,555  | -0,404 | -0,302 |       |  |
| Nd | 0,758  | 0,822  | 0,890  | 0,847  | 0,551  | -0,395 | -0,295 |       |  |
| Sm | 0,737  | 0,799  | 0,867  | 0,823  | 0,533  | -0,388 | -0,273 |       |  |
| Eu | 0,519  | 0,567  | 0,625  | 0,591  | 0,407  | -0,248 | -0,128 |       |  |
| Gd | 0,710  | 0,771  | 0,837  | 0,793  | 0,512  | -0,378 | -0,248 |       |  |
| Tb | 0,720  | 0,781  | 0,847  | 0,802  | 0,515  | -0,389 | -0,252 |       |  |
| Dy | 0,723  | 0,784  | 0,849  | 0,804  | 0,512  | -0,395 | -0,247 |       |  |
| Ho | 0,760  | 0,822  | 0,888  | 0,843  | 0,535  | -0,415 | -0,272 |       |  |
| Er | 0,797  | 0,861  | 0,926  | 0,882  | 0,559  | -0,431 | -0,300 |       |  |
| Yb | 0,839  | 0,904  | 0,968  | 0,926  | 0,586  | -0,448 | -0,335 |       |  |
| Lu | 0,851  | 0,916  | 0,980  | 0,939  | 0,594  | -0,451 | -0,349 |       |  |
|    | Y      | Zr     | Nb     | Cs     | Ba     | Pb     | Th     | U     |  |
| Y  | 1,000  |        |        |        |        |        |        |       |  |
| Zr | 0,932  | 1,000  |        |        |        |        |        |       |  |
| Nb | 0,996  | 0,958  | 1,000  |        |        |        |        |       |  |
| Cs | -0,280 | -0,248 | -0,285 | 1,000  |        |        |        |       |  |
| Ba | -0,718 | -0,539 | -0,682 | 0,323  | 1,000  |        |        |       |  |
| Pb | 0,703  | 0,603  | 0,682  | 0,132  | -0,513 | 1,000  |        |       |  |
| Th | 0,975  | 0,986  | 0,989  | -0,232 | -0,629 | 0,668  | 1,000  |       |  |
| U  | 0,958  | 0,995  | 0,977  | -0,212 | -0,586 | 0,645  | 0,997  | 1,000 |  |
| La | 0,856  | 0,939  | 0,885  | -0,218 | -0,476 | 0,520  | 0,915  | 0,929 |  |
| Ce | 0,843  | 0,928  | 0,873  | -0,210 | -0,467 | 0,511  | 0,903  | 0,918 |  |
| Pr | 0,823  | 0,908  | 0,853  | -0,199 | -0,452 | 0,495  | 0,883  | 0,898 |  |
| Nd | 0,812  | 0,897  | 0,841  | -0,188 | -0,443 | 0,488  | 0,872  | 0,887 |  |
| Sm | 0,789  | 0,874  | 0,818  | -0,180 | -0,425 | 0,468  | 0,848  | 0,863 |  |
| Eu | 0,558  | 0,633  | 0,582  | -0,044 | -0,263 | 0,308  | 0,608  | 0,625 |  |
| Gd | 0,761  | 0,844  | 0,789  | -0,171 | -0,404 | 0,443  | 0,817  | 0,834 |  |
| Tb | 0,771  | 0,854  | 0,799  | -0,181 | -0,413 | 0,448  | 0,827  | 0,843 |  |
| Dy | 0,774  | 0,856  | 0,802  | -0,187 | -0,414 | 0,447  | 0,829  | 0,845 |  |
| Ho | 0,812  | 0,894  | 0,841  | -0,205 | -0,441 | 0,477  | 0,869  | 0,884 |  |
| Er | 0,851  | 0,932  | 0,880  | -0,221 | -0,468 | 0,509  | 0,908  | 0,922 |  |
| Yb | 0,893  | 0,973  | 0,922  | -0,241 | -0,499 | 0,549  | 0,951  | 0,964 |  |
| Lu | 0,906  | 0,985  | 0,935  | -0,246 | -0,509 | 0,562  | 0,964  | 0,976 |  |

\*Cont. Anexo 1.5

6. Coeficientes de correlación de Pearson de tierras raras livianas. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|    | La    | Ce    | Pr    | Nd    | Sm    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| La | 1,000 |       |       |       |       |
| Ce | 0,999 | 1,000 |       |       |       |
| Pr | 0,997 | 0,999 | 1,000 |       |       |
| Nd | 0,994 | 0,997 | 1,000 | 1,000 |       |
| Sm | 0,987 | 0,992 | 0,997 | 0,999 | 1,000 |
| Eu | 0,855 | 0,870 | 0,893 | 0,905 | 0,925 |
| Gd | 0,976 | 0,982 | 0,990 | 0,994 | 0,998 |
| Tb | 0,980 | 0,985 | 0,993 | 0,995 | 0,999 |
| Dy | 0,980 | 0,986 | 0,993 | 0,995 | 0,999 |
| Ho | 0,992 | 0,995 | 0,998 | 0,999 | 0,998 |
| Er | 0,999 | 0,999 | 0,997 | 0,995 | 0,990 |
| Yb | 0,992 | 0,988 | 0,979 | 0,973 | 0,961 |
| Lu | 0,983 | 0,977 | 0,966 | 0,959 | 0,944 |

7. Coeficientes de correlación de Pearson de tierras raras pesadas. Celda color rojo: correlación negativa. Celda color verde: correlación positiva.

|    | Eu    | Gd    | Tb    | Dy    | Ho    | Er    | Yb    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eu | 1,000 |       |       |       |       |       |       |
| Gd | 0,944 | 1,000 |       |       |       |       |       |
| Tb | 0,938 | 1,000 | 1,000 |       |       |       |       |
| Dy | 0,935 | 0,999 | 1,000 | 1,000 |       |       |       |
| Ho | 0,905 | 0,994 | 0,996 | 0,997 | 1,000 |       |       |
| Er | 0,863 | 0,980 | 0,984 | 0,985 | 0,996 | 1,000 |       |
| Yb | 0,788 | 0,944 | 0,950 | 0,951 | 0,973 | 0,990 | 1,000 |
| Lu | 0,752 | 0,923 | 0,930 | 0,932 | 0,958 | 0,981 | 0,998 |

**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**DOCUMENTO FINAL DE TESIS PARA SER ENVIADO A  
INTEGRANTES DEL JURADO DE EXAMEN DE GRADO PARA  
REVISION**

NOMBRE DEL ALUMNO: Ingrid Facio Lince Téllez

SEMESTRE ACTUAL (MAESTRIA O DOCTORADO): 5

TITULO DE LA TESIS: Estudio sedimentológico de arenas de playas  
de la provincia de Sotavento en el sur del Golfo de México.

FIRMA DE AVAL DE REVISIÓN DEL DOCUMENTO POR PARTE  
DEL TUTOR



Doctor Arturo Carranza Edwards  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Ciudad de México, 19 de agosto de 2019.