



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUÍS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



**MAPEO GEOQUÍMICO-AMBIENTAL DE SUELOS
EN LOS VALLES CENTRALES DEL ESTADO DE
CAMPECHE.**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN GEOLOGÍA APLICADA.**

**PRESENTA:
ING. ISIDRO MONTES AVILA**

**ALUMNO BECADO POR
CONACYT
CLAVE 242520**

**ASESOR DE TESIS:
DR. MARCOS G. MONROY FERNÁNDEZ**

**CO-ASESOR DE TESIS:
DR. ISRAEL RAZO SOTO**



San Luis Potosí, S.L.P., Enero 2012

RESUMEN.

Dentro del Posgrado en Geología aplicada, perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), se elaboró un proyecto de Mapeo Geoquímico-Ambiental de Suelos en los Valles Centrales del Estado de Campeche (Edzná y Yohaltún), cuyo objetivo principal es documentar la distribución de las concentraciones actuales de elementos químicos en la superficie de la región y establecer una diferencia entre concentraciones de origen natural de aquellas de origen antrópico. En este trabajo se ha generado una base de datos geoquímicos con aplicaciones basados en el empleo de la técnica conocida como análisis exploratorio de datos (EDA), y apoyada con técnicas de sistemas de información geográfica (SIG), análisis espacial de datos (SDA) y cartografía geoquímica.

La metodología de muestreo de campo se basó en la propuesta de los proyectos internacionales cartografía Geoquímica Mundial (Global Reference Network promovido por la IUSG) y paisajes geoquímicos de Norteamérica (North América Geochemical Landscapes Project, promovido por los servicios geológicos de Canadá, Estados Unidos y México). Se recolectaron muestras de suelo superficial (Ss) y perfiles de suelo integrados por los horizontes "A" (superior) y "C" (material parental), en un polígono de 50 X 150 km (7,500 Km²), compuesto por celdas de 5x5 km (25 km²), con 80 puntos de muestreo, que representa una densidad de 2,000 km², adecuada para identificar patrones geoquímicos regionales (líneas de base y valores de fondo), cabe mencionar que el estudio realizado por Chiprés (2008) y por Hernández (2008) en suelos impactados por actividad minera y el presente, forman parte de las contribuciones de México para los programas internacionales GRN y NAGLP, y sobre todo este trabajo será el primero en su modalidad en suelos sometidos a actividades agrícolas.

El análisis estadístico consistió en: (i) elaboración de gráficas de boxplots, de las cuales se obtuvieron los rangos utilizados para la elaboración de las cartas geoquímicas y obtención de outliers (anomalías), (ii) curvas de probabilidad normalizadas, de las cuales mediante un análisis de las rupturas que presentaban las gráfica y ayudándonos en la localización geográfica de las muestras, para obtener los valores de fondo de la zona, así como, las líneas base del área de estudio, (iii) finalmente la elaboración de las cartas geoquímicas que proveen de información invaluable para los estudios ambientales que no pueden ser obtenida de una simple carta geológicas o edafológicas. Estas cartas permiten describir la distribución espacial de elemento, identificando patrones de concentración y facilitando la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos de los elementos seleccionados como relevantes correspondientes a valores de fondo (rangos) son; i). Los macronutrientes; calcio de 0.34 a 2.81 % y fósforo de 0.009 a 0.039 %. ii). Los elementos potencialmente tóxicos (EPT's); cadmio de 0.26 a 1.4 mg/kg, cobre de 13.4 a 34.8 mg/kg, plomo de 3.44 a 58.9 mg/kg, selenio de 0.6 a 2.0 mg/kg y zinc de 31.4 a 86.3 mg/kg, y iii). El trazador del uso de fertilizantes; lantano de 9.2 a 76.9 (86.4 a 125.0) mg/kg.

En cuanto a los valores arriba del límite superior al valor de fondo y que pueden estar relacionados a las actividades antrópicas (agricultura y ganadería), son; i). Los macronutrientes, calcio de 3.47 a 20.30 %, fósforo de 0.072 a 0.177 %. ii). Los elementos potencialmente tóxicos (EPT's); cadmio de 0.54 a 1.67 mg/kg, cobre de 35.6 a 36.2 mg/kg, plomo de 66.3 a 101.0 mg/kg, selenio de 2.2 a 3.1 mg/kg, zinc de 120.0 a 182.0 mg/kg, y iii). Trazador del uso de fertilizantes; lantano van desde 130.0 a 171.0 mg/kg.

Las concentraciones obtenidas en los valles centrales en el Estado de Campeche, comparados con otros valores de referencia normativos (nacionales e internacionales), es posible apreciar que se encuentran por debajo de las concentraciones promedio de algunos EPT's, y muy similares a los valores de fondo de los suelos agrícolas del mundo, lo cual es un indicio de que el área de estudio es una zona que geoquímicamente no presenta impacto antrópico (contaminación).

CONTENIDO

| <u>CAPÍTULO</u> | <u>PÁGINA</u> |
|---|---------------|
| INDICE DE TABLAS | vi |
| INDICE DE FIGURAS | vii |
| INDICE DE FOTOGRAFIAS | xiii |
| RESUMEN. | i |
| CONTENIDO | iv |
| INTRODUCCIÓN. | 1 |
| I.- CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL. | 4 |
| I.1. Antecedentes de la cartografía geoquímica | 4 |
| I.1.1.- Proyecto de la Cartografía Geoquímica Global (GRN). | 5 |
| I.1.2.- Proyectos de paisajes geoquímicos (GLP). | 6 |
| I.1.3.-La Cartografía Geoquímica en México. | 7 |
| I.2.-Justificación | 9 |
| I.3.- Objetivos | 11 |
| I.3.1.- Objetivo general. | 11 |
| I.3.2.-Objetivos específicos. | 11 |
| I.4.-Alcance. | 11 |
| II.- LOS VALLES CENTRALES DE EDZNÁ Y JOHALTÚN, EN EL ESTADO DE CAMPECHE: CARACTERISTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS. | 13 |
| II.1.- Antecedentes. | 13 |
| II.2.- Marco socioeconómico. | 14 |
| II.2.1.- Localización, vías de comunicación. | 14 |
| II.2.2.- Poblaciones y actividades productivas. | 18 |
| II.2.3.- Uso del suelo. | 19 |
| | iv |

| | |
|---|-----|
| II.3.- Marco físico. | 22 |
| II.3.1.-Climatología | 22 |
| I.3.2.- Provincias fisiográficas. | 25 |
| II.3.3.-Geología regional y geología local. | 27 |
| II.3.4.- Yacimientos Minerales. | 35 |
| II.3.5.- Edafología. | 36 |
| II.3.6.- Hidrogeología. | 44 |
| III.- DESARROLLO METODOLÓGICO. | 46 |
| III.1.-Muestreo de campo. | 46 |
| III.1.1. Control de calidad de muestreo | 53 |
| III.2.- Preparación de muestras y análisis químico. | 53 |
| III.2.1. Prueba de Movilidad. | 59 |
| II.2.2. Caracterización mineralógica. | 67 |
| III.3. Análisis Estadístico y Geoestadístico. | 73 |
| III.3.1.- Análisis Estadístico. | 73 |
| III.3.2.- Análisis Geoestadístico. | 75 |
| IV.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS RELEVANTES Y SU PATRONES GEOQUÍMICOS. | 78 |
| IV.1.- Estadísticas Básicas. | 78 |
| IV.2.- Gráficos Estadísticos. | 80 |
| IV.3.- Cartas Geoquímicas. | 94 |
| V.- DISCUSIÓN. | 124 |
| V.1.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 127 |
| BIBLIOGRAFIA | 130 |
| ANEXOS. | 133 |
| Anexo 1. Tabla de resultados de estadísticas descriptivas básicas. | 133 |
| Anexo 2. Tabla de datos de campo (documento electrónico). | 136 |

| | |
|---|-----|
| Anexo 3. Tabla de resultados de análisis químicos (documento electrónico). | 136 |
| Anexo 4. Fotografías de muestreo (documento electrónico). | 136 |
| Anexo 5. Fotografías de fuentes antrópicas (agroquímico) encontrados en área de estudio. (documento electrónico). | 136 |
| Anexo 6. Fotografías de actividades agrícolas en el área de estudio (documento electrónico). | 136 |

ÍDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Coordenadas UTM zona 15N, que delimitan el área de estudio (basado en la malla de 5x5 km ²). | 15 |
| Tabla 2. Municipios y No. de Habitantes del área de estudio. (INEGI, 2010) | 18 |
| Tabla 4. Límites de detección por ICP-MS e ICP-AES, en mg/kg para los elementos analizados en este estudio. | 57 |
| Tabla 5. Coeficiente de variación del conjunto de muestras utilizadas en el análisis químico de laboratorio. El criterio de aceptación para la precisión se estableció en <20 % | 58 |
| Tabla 6. Listado de muestras utilizadas para la prueba de movilidad y resultados de pH (durante la prueba). | 60 |
| Tabla 7. Criterio para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH | 63 |
| Tabla 8. Tabla de la estadística descriptiva de los resultados de los valores de pH, por Zona y horizonte en muestras de perfiles | 64 |
| Tabla 9. Porcentajes de la fracción móvil de los elementos relevantes del área de estudio | 66 |
| Tabla 10.- Muestras para el análisis por difracción de Rayos X. | 69 |
| Tabla 11. Estadísticas básicas de los horizontes ó capas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior), solo de elementos seleccionados debido a su relevancia ambiental y agrícola. Concentración en mg/kg excepto donde se indica. | 79 |
| Tabla 12. Rango de valores de fondo de las concentraciones de los elementos químicos relevantes (gráficas de probabilidad normalizada). | 89 |
| Tabla 13. Correlación de Pearson de los elementos relevantes, comparando el horizonte inferior (HB, HC ó HC2) contra suelo superficial y horizonte superior (HA ó HC1) | 90 |
| Tabla 14. Valores de la media, mediana, mínimo y máximo de concentraciones de los elementos relevantes en los diferentes horizontes (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior), del área de estudio comparados contra los valores de referencia ambientales de distintos países. | 99 |
| Tabla 15. Movilidad de los elementos químicos relevantes en base al promedio en %, en el área de Estudio (por zonas y horizontes). | 125 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Marco conceptual que presenta el flujo de elementos químicos entre la litosfera y el resto del ambiente (basado en Selinus y Frank, 2000). | 1 |
| Figura 2. Cuadrícula global propuesta por el proyecto internacional GRN correspondiente al territorio mexicano. Cada celda tiene un área de 160 X160 km. | 9 |
| Figura 3. Plano de localización del estado de Campeche y del área de estudio, que corresponde a los valles de Edzná y Yohaltún. | 14 |
| Figura 4. Localización y vías de acceso al área de estudio. | 17 |
| Figura 5. Gráfico de los principales cultivos en los municipios pertenecientes al área de estudio (INEGI, 2011) | 18 |
| Figura 6. Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2008. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación 1:1'000,000). | 22 |
| Figura 7. Mapa de climas en el área de estudio (INEGI, 2008. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación 1:1' 000,000). | 24 |
| Figura 8. Gráfico histórico del clima (temperatura y precipitación), en el estados de Campeche (INEGI, 2010). | 25 |
| Figura 9. Gráfico año 2010 del clima (temperatura y precipitación), en el estados de Campeche (INEGI, 2010). | 25 |
| Figura 10. Ubicación del área de estudio dentro de las provincias fisiográficas de la República Mexicana. | 26 |
| Figura 11. Plano Geológico Simplificado del área de estudio (SGM) | 34 |
| Figura 12. Tipo de suelos y su distribución, presentes en el área de estudio (tomado de INEGI, 2010, y modificado por Montes-Avila, 2011) | 43 |
| Figura 13. Ubicación del Área de estudio, en la región Hidrológica península de Yucatán, así como la ubicación de la Subregión Oeste; dentro de las cuenca de Yucatán (RH32), Cuenca de Rio Champotón y otros (RH31) y Cuencas cerradas. | 45 |
| Figura 14 Mapa malla envolvente de 60 x 150 km, con celdas de 5 x 5 km y Malla ajustada al área de estudio con la totalidad de los puntos de muestreo de suelo. | 48 |
| Figura 15. Distribución de Muestras por Zonas y total en el Área de estudio. | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Mapa con los puntos de muestreo con su ubicación real en campo a la toma de muestra, en su totalidad los puntos muestreados están contenidos en cada celda. | 52 |
| Figura 17. Elementos seleccionados para el proyecto de mapeo geoquímico-ambiental en suelos de los valles centrales de estado de Campeche. En azul, elementos considerados esenciales para una gran diversidad de organismos. En rojo, elementos considerados tóxicos para muchos organismos, aún en bajas concentraciones. En verde, elementos correspondientes al grupo de Tierras Raras y en amarillo son elementos que también fueron analizados para este estudio. | 58 |
| Figura 18. Tendencia de valores de pH por horizontes (HA-HC1 y HC-HC2) y zonas del área de estudio. | 64 |
| Figura 19. Difractograma correspondiente a un suelo Gleysol (horizonte HA), localidad Bethania, Mpio. de Campeche. | 70 |
| Figura 20. Difractograma correspondiente a un suelo Pheozem (horizonte HA), localidad Nohakal, Mpio. de Campeche. | 70 |
| Figura 21. Difractograma correspondiente a un suelo Vertisol (horizonte HC1), localidad de Yohaltún, Mpio. de Champotón. | 71 |
| Figura 22. Difractograma de la muestra M-3, corresponde a cristales de yeso, localidad de Cnel. Ortiz Avila, Mpio. de Champotón. | 71 |
| Figura 23. Elementos de los boxplots y tabla los rangos de clase (usados para la elaboración de los mapas geoquímicos). | 80 |
| Figura 24. Box Plots de calcio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 81 |
| Figura 27. Box Plots de fósforo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 81 |
| Figura 26. Box Plots de fósforo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 81 |
| Figura 27. Box Plots de cadmio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 81 |
| Figura 28. Box Plots de cobre por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 81 |
| Figura 29. Box Plots de selenio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 82 |

| | |
|--|----|
| Figura 28. Box Plots de plomo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 82 |
| Figura 30. Box Plots de zinc por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 82 |
| Figura 31. Box Plots de lantano/lutecio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior). | 82 |
| Figura 32. Curva de probabilidad normalizada del elemento Ca (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales. | 84 |
| Figura 33. Curva de probabilidad normalizada del elemento P (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales). | 85 |
| Figura 34. Curva de probabilidad normalizada del elemento Cd (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales). | 85 |
| Figura 35. Curva de probabilidad normalizada del elemento Cu (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales). | 86 |
| Figura 36. Curva de probabilidad normalizada del elemento Pb (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales. | 87 |
| Figura 37. Curva de probabilidad normalizada del elemento Se (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales. | 87 |
| Figura 38. Curva de probabilidad normalizada del elemento Zn en el suelo Superficial y Horizonte Superior, las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales. | 88 |
| Figura 39. Curva de probabilidad normalizada del elemento Lantano en el suelo Superficial y Horizonte Superior, las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales. | 89 |
| Figura 40. Graficas de correlación del calcio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 91 |
| Figura 41. Graficas de correlación del calcio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 42 Graficas de Correlación del cadmio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 92 |
| Figura 43. Graficas de correlación del cobre: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 92 |
| Figura 44. Graficas de correlación del selenio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 92 |
| Figura 45. Graficas de correlación del plomo: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 93 |
| Figura 46. Graficas de correlación del Zinc: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 93 |
| Figura 47. Gráficas de correlación del Lantano: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior. | 93 |
| Figura 48. Mapa geoquímico de calcio en el suelo superficial (1mx1mx5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 100 |
| Figura 49. Mapa geoquímico de calcio en el horizonte superior (HA ó HC1), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 101 |
| Figura 50. Mapa geoquímico de calcio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 102 |
| Figura 51. Mapa geoquímico de fósforo en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 103 |
| Figura 52. Mapa geoquímico de fósforo en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche | 104 |
| Figura 53. Mapa geoquímico de fósforo en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 105 |
| Figura 54. Mapa geoquímico de cadmio en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 106 |
| Figura 55. Mapa geoquímico de cadmio en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche | 107 |
| Figura 56. Mapa geoquímico de cadmio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 108 |
| Figura 57. Mapa geoquímico de cobre en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 58. Mapa geoquímico de cobre en el horizonte superior (HA ó HC1), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 110 |
| Figura 59. Mapa geoquímico de cobre en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 111 |
| Figura 60. Mapa geoquímico de plomo en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche | 112 |
| Figura 61. Mapa geoquímico de plomo en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche | 113 |
| Figura 62. Mapa geoquímico de plomo en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 114 |
| Figura 63. Mapa geoquímico de selenio en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 115 |
| Figura 64. Mapa geoquímico de selenio en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche | 116 |
| Figura 65. Mapa geoquímico de selenio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 117 |
| Figura 66. Mapa geoquímico de zinc en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 118 |
| Figura 67. Mapa geoquímico de zinc en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 119 |
| Figura 68. Mapa geoquímico de zinc en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 120 |
| Figura 69. Mapa geoquímico de lantano en el suelo superficial (1mx1mx5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 121 |
| Figura 70. Mapa geoquímico de lantano en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 122 |
| Figura 71. Mapa geoquímico de lantano en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche. | 123 |
| Figura 72. Grafico sobre la distribución de los diferentes grupos de suelos en el área de estudio. | 124 |

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|---|----|
| Fotografía 1. Pheozem; Fotografía a). suelo superficial, celda Ca4G, localidad Tikinmul, Mpio. de Campeche (clasificación WRB; PH epileptico humico (calcarico esqueletico) /2) . Fotografía b). Perfil de suelo, celda Ca7E. localidad Nohakal, Mpio. de Campeche (PH humi endoleptico (calcarico epi-esqueletico)/2). | 37 |
| Fotografía 2. Vertisol; Fotografía a). Suelo Superficial (Ss) de la Celda Ca5E, Localidad Pocyaxum, Mpio. de Campeche (VR humi-epi-gleyco (másico eutrico)/2). Fotografía b). Perfil de Suelo (HC1 y HC2), Celda Ca20. Localidad Chilam Balam, Mpio. de Champotón (VR humi- epi-gleyico (calcarico, másico)/3) | 38 |
| Fotografía 3. Gleysol; Fotografía a). Suelo superficial (Ss), celda Ca15G, localidad Kikab, Mpio. de Champotón. (GL epi-estagnico vértico (húmico, hipo sáiico)/3). Fotografía b). Perfil de Suelo (HC1 y HC2), Celda Ca5F, Localidad Nohyaché (Hda. Zidzidla), Mpio. de Campeche | 39 |
| Fotografía 4. Luvisol LV profundihumico (rodico / 3) muestreo Superficial, celda Ca5H, localidad Cayal, Mpio. de Campeche. | 40 |
| Fotografía 5. Leptosol (LP Rensico, epi-esqueletico (húmico, calcarico) /2), Celda Ca11D, localidad Adolfo Ruiz Cortinez, Mpio. de Campeche. | 41 |
| Fotografía 6. Nitisol, perfil, celda Ca2F, localidad Nilchi, Mpio. de Tenabó. | 42 |
| Fotografía 7. La fotografía (a) muestra el cuarteo realizado en la preparación de la muestras en el laboratorio. La fotografía (b) se observan el empaque de las muestras para su envío al laboratorio ACTLABS. La Fotografía (c) corresponde a las muestras duplicadas. | 50 |
| Fotografía 8. La fotografía (a) muestra el cuarteo realizado en la preparación de la muestras en el laboratorio. La fotografía (b) se observan el empaque de las muestras para su envío al laboratorio ACTLABS. La fotografía (c) corresponde a las muestras duplicadas. | 54 |

INTRODUCCIÓN.

El estudio del suelo es esencial por: 1) ser el soporte natural de la vida terrestre; 2) ser la base del desarrollo económico (agricultura y ganadería); y 3) tener gran influencia sobre los demás medios del ambiente al ser la fuente natural de los elementos químicos (Selinus y Frank, 2000; Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Plant *et al.*, 2001; USGS, 2004). Estos tres aspectos se relacionan entre sí, de manera directa e indirecta, a través de distintos procesos. Solo hay que recordar que es en el suelo donde se producen los cultivos y se cría al ganado que constituyen el suministro de alimentos de distintas poblaciones, y que el suelo está en contacto en cierto momento con el agua que se bebe (superficial y subterránea) y el aire que se respira (Figura 1). Por tales motivos en fechas recientes ha aumentado el interés por definir con detalle la influencia del medio terrestre superficial sobre los ecosistemas y la misma calidad de vida humana.

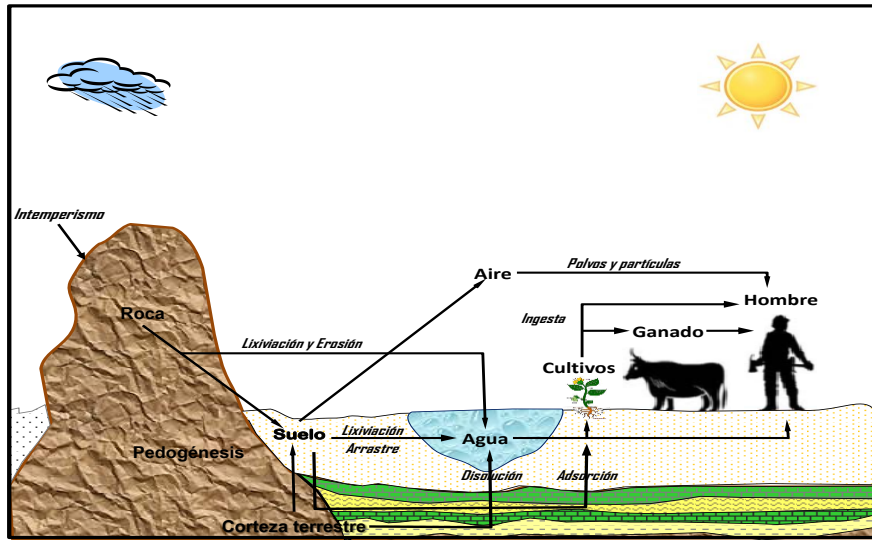


Figura 1. Marco conceptual que presenta el flujo de elementos químicos entre la litosfera y el resto del ambiente (basado en Selinus y Frank, 2000).

Debido a la relación que los ecosistemas tienen con la capa superior de los suelos, cada vez más se ha hecho necesario realizar estudios con el objetivo de caracterizar el estado geoquímico actual de la superficie terrestre. Aun así, no es suficiente conocer el estado geoquímico de este medio, si no también saber los procesos que participan en su formación y en la concentración de los diferentes elementos químicos presentes en la superficie terrestre (Selinus *et al.*, 2005).

La contaminación del suelo por elementos traça se ha producido desde la antigüedad y afecta sobre todo a aquellos países que se han desarrollado, desde los comienzos de la revolución industrial, actividades de extracción y concentración de minerales, actividades industriales relacionadas con la obtención de energía en sentido amplio, así como actividades agrícolas y ganaderas en las que el empleo de productos fitosanitarios y los residuos generados aceleran este proceso de degradación química (Diez-Ortiz, 2006).

Ante esta situación existe hoy en día, una creciente inquietud por parte de gobiernos y miembros de la comunidad científica para definir criterios confiables de calidad de un suelo. Los valores de fondo de elementos traça en suelos (no impactados); en este sentido, son de gran interés, ya que permite establecer la calidad de un suelo, y por extensión del ecosistema (Davies, 1983; De Temmerman *et al.*, 1984; Davies y Wixson, 1985; Mc-Grath, 1986; Crock *et al.*, 1992; Tobías *et al.*, 1997); al tiempo que posibilita la adopción de criterios adecuados en las labores de limpieza y remediación de suelos contaminados (Fleischhauer y Korte, 1990).

A diferencia de las sustancias artificiales, los elementos traça están presentes en la corteza terrestre de forma natural, por lo que su distribución en los suelos vendrá condicionada por la concentración natural del material original (background geoquímico) y por aportes antrópicos actuales o pasados. Estos aportes se suman al contenido basal de los suelos, pudiendo cambiar su estado de equilibrio. Entendemos por elementos traça aquellos elementos esenciales para diversos sistemas biológicos, que se encuentran en pequeñas cantidades y que pasan a ser tóxicos a partir de un determinado umbral de concentración. Este es el caso de elementos como el arsénico, boro, cobalto, cromo, cobre, molibdeno, manganeso, níquel, selenio y zinc. Dentro de la denominación de elementos traça se engloban tanto metales pesados como metales ligeros o no metales. Se consideran metales pesados aquellos elementos metálicos que tiene una densidad igual o superior a 6 g/cm³ cuando están en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos o alcalinotérreos (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

Con relación a lo anterior, en México existe una gran necesidad de conocer las características físico-químicas de los suelos; y así, como su relación con los diferentes procesos (naturales y antrópicos), que interactúan con este recurso natural. La baja cultura ambiental que México tuvo hasta la década de los 90's, propició el mal manejo ambiental de las diferentes actividades productivas en el país; minera, industrial, agroindustrial, agrícola,

etc.; y en consecuencia, existen grandes impactos ambientales asociados a estas actividades.

El estado de Campeche tiene las características para un óptimo desarrollo de la agricultura y otras actividades económicas, como lo son un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, ríos superficiales, corrientes subterráneas y un terreno generalmente plano con suelos considerados aptos para producción agrícola. Sin embargo, se ha reportado que en la región centro del estado, principalmente en los valles de Edzná y Yohaltún, donde la agricultura y la ganadería han desgastado las propiedades físicas y químicas de los suelos, dando como resultado disminuciones en rendimiento (Contreras-Benítez *et al.*, 2002). Actualmente existe información (cartografía) muy completa y confiable a escalas gruesas de trabajo (1:250,000) elaborados por el INEGI, tal es el caso del continuo vectorial serie II (WRB 2000) que incluye 1841 polígonos para Campeche. Sin embargo, no existe información reciente a menor escala, que realmente refleje el estado actual de los suelos y pueda ser utilizada con mayor certidumbre en las decisiones regionales y locales. Hasta la fecha no se tiene un registro sistemático del estado físico-químico y geoquímico de los suelos en estos valles, de manera que su óptimo aprovechamiento puede ser establecido en función a estos factores, contra el cual algunos de los parámetros de un levantamiento actual de suelos puede ser comparado y así obtener mayor información de la acción humana sobre el desarrollo y características del recurso suelo. Ya la UNESCO ha reconocido que los estudios de suelo son un requisito para alcanzar el desarrollo sostenible (Darnley *et al.*, 1995), y la FAO (2005), donde recomiendan que los estudios básicos de suelo se realicen en el horizonte "A", ya que es la capa donde la mayoría de las acciones biológicas ocurren. La circulación de aire, agua y químicos es mayor en este horizonte, así como el contacto con raíces de cultivos. Así mismo, la calidad geoquímica del suelo es variable y se ha reconocido que los elementos químicos son potencialmente biodisponibles a plantas, animales y seres humanos, llegando a implicar incluso situaciones de interés ambiental o de salud humana, por lo que determinar su concentración es un requisito para un estudio integral del suelo (Plant *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 2005). Algunos elementos químicos son lixiviados hacia capas inferiores u otros medios del ambiente (ej. Ca, Na, Mg, K y otros elementos traza esenciales), siendo comúnmente la fracción móvil la de mayor importancia para los cultivos u otras cuestiones ambientales (Smith *et al.*, 2005). Debido a la importancia de la caracterización físico-química y geoquímica de los suelos, han surgido diversas iniciativas internacionales para promover dichos estudios y homologarlos entre países, aunque es responsabilidad de cada país realizar estudios regionales más detallados.

I.- CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL.

I.1. Antecedentes de la cartografía geoquímica

La relación suelo/hombre es un tema que día a día toma mayor importancia, debido a que el suelo es indispensable en el desarrollo de las actividades diarias del ser humano. Por la interacción existente entre ambos, a llevado a la sociedad a conocer las características, comportamientos y procesos que influyen en el desarrollo del suelo (Selinus y Frank, 2000).

La cartografía geoquímica es una herramienta que permite visualizar una base de datos de concentración de los diferentes elementos químicos, en función de rangos de concentración sobre un espacio determinado (Chiprés *et al.*, 2008). Desde la década de 20's se empiezan a generar los primeros mapas geoquímicos, los científicos rusos fueron pioneros al elaborarlos para las exploraciones mineras, utilizando esta herramienta para encontrar zonas anómalas, las cuales pudieran relacionarse con zonas mineralizadas (Darnley *et al.*, 1995). Posteriormente y debido a la relación cada vez mayor suelo/hombre, principalmente debido crecimiento poblacional, la cartografía geoquímica en materia ambiental se ha convertido en una herramienta para conocer el estado geoquímico de la superficie terrestre, y poder cuantificar la contaminación antrópica (Darnley *et al.*, 1995,1997)

Al final de la década de los 70's y 80's, comenzaron a realizarse los primeros estudios de cartografía geoquímica con aplicación en la evaluación ambiental. aunque fueron pocos los estudios, estos eran principalmente a escalas nacionales o regionales en Norteamérica y Europa (Shackletten *et al.*, 1971; Shackletten y Boerngen, 1984; Vrana *et al.*, 1997). En la década de los 90's y sobre todo a partir del año 2000, en Norteamérica (Smith *et al.*, 2005) y Europa (Reimann *et al.*, 2000; plant *et al.*, 2003; Salminen *et al.*, 2005), siguieron desarrollando proyectos, en Asia empiezan a generar su cartografía geoquímica principalmente en China, en donde el desarrollo fue muy importante desde 1979 (Darnley, 1995). Como un ejemplo del resultado del estudio en China, fue la visualización de un patrón de distribución de selenio (deficiencias de este elemento) que atraviesa el país de NE-SW. Tomando como herramienta la cartografía geoquímica se realizó un análisis más detallado de la región, por la deficiencia del selenio. Esto demostró la ocurrencia de dos

enfermedades, con asociación a la deficiencia de este elemento (cardiomiopatía y osteoartritis), de acuerdo con Darnley *et al.*, (1995); Selinus y Frank, (2000); Selinus *et al.*, (2006).

Así como lo hecho por China, muchos países sobre todo en Europa y Norteamérica han empezado a realizar importantes estudios para poder tener la cartografía geoquímica en estas áreas, para esto; a lo largo de la historia de la Cartografía Geoquímica existen dos proyectos de gran relevancia que se encuentran desarrollándose actualmente, uno a nivel mundial el Proyecto de Cartografía Geoquímica Mundial (GRN por su siglas en inglés) y el otro a nivel continental que involucra a México en el proyecto paisajes geoquímicos (GLP, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo principal, son estandarizar las metodologías utilizadas a través de los diferentes estudios.

I.1.1.- Proyecto de la Cartografía Geoquímica Global (GRN).

El antecedente del GRN que es un proyecto a nivel mundial, inicia en 1988 denominado Cartografía Geoquímica Internacional (International Geochemical Mapping), ese año la sociedad geológica estaba convencida de que los mapas geoquímicos representaban la tarea más importante y urgente dentro de la geología para la sociedad de hoy en día, este trabajo fue un proyecto apoyado por el programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP, por sus siglas en inglés), en conjunto con la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, por sus siglas en inglés), y la organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) (Darnley, 1995). En 1992 en la agenda 21, que es un programa para desarrollar la sostenibilidad a nivel planetario, aprobado por 173 gobiernos en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente, celebrada en Rio de Janeiro, se empieza a hablar de la importancia a cerca de trabajar bajo métodos sistematizados de la Cartografía Geoquímica, principalmente para que los trabajos tuvieran un control de calidad y reproducibilidad. En esa misma conferencia se llega a un acuerdo, que era la necesidad de crear una base de datos global, la cual debería contener toda información geoquímica que pudiera utilizarse en aspectos ambientales (Darnley, 1995).

Pasaron cuatro años para que en mayo de 1996, el Comité de las Naciones Unidas para los recursos naturales reconociera la importancia del proyecto, debido a la falta de conocimientos sobre el desarrollo de estrategias de monitoreos ambientales. En este mismo

año, se estableció formalmente un grupo de trabajo por parte de la IUGS, con la finalidad de coordinar y facilitar las actividades científicas concernientes a la elaboración de líneas base geoquímicas globales, estableciéndose el proyecto de Cartografía Geoquímica Global (Global Reference Network, GRN) (Darnley, 1997).

El objetivo principal del proyecto GRN es buscar la generación de cartas geoquímicas de valores de fondo a una escala continental y global. La metodología aplicada para la escala nacional o continental sería generar una malla de muestreo ampliamente espaciada; en la cual, en cada celda se colectarían muestras de agua, perfiles de suelos y sedimentos obteniendo los datos geoquímicos. Los sitios de muestreo seleccionados serían aquellos sin aparente perturbación por actividad humana, similares en procesos parentales y pedogénicos a los perturbados, de manera que sirvan de comparación para evaluar el impacto antrópico, además de permitir la observación de patrones geoquímicos naturales (valores de fondo) (Darnley *et al.*, 1997; Salminen *et al.*, 1998; Chiprés *et al.*; 2008).

En cuanto a la metodología para el proyecto global, se generó una malla sobre la totalidad de la superficie terrestre, compuesto por celdas de 160 X 160 km, que forman la red de referencia global, con una densidad propuesta de 5 muestras por celda (Chiprés *at. al.*, 2008). Las celdas están definidas por dos paralelos de latitud 1.5° entre ellos y por dos meridianos desplazados en longitud E y O, en bandas latitudinales sucesivas con el fin de mantener un área constante de 25,600 km² (Salminen y Travainen, 1998). Actualmente este proyecto global ya ha sido completado en China y en la Comunidad Europea. Presentando sus resultados en el Atlas Geoquímico de Europa (FOREGS, 2006), en diversos países de Asia, África y Latinoamérica continúa en fase de planeación (Chiprés *et al.*, 2008).

I.1.2.- Proyectos de paisajes geoquímicos (GLP).

Tiempo después del surgimiento del GRN, se creó otro proyecto internacional de valores de fondo, denominado Paisajes Geoquímicos de Norte América (North América Geochemical Landscape Project. NAGLP), cuyo objetivo es llevar a cabo la cartografía geoquímica de suelos para el territorio completo de Norteamérica. En él participan los servicios geológicos de Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS), Canadá (Geological Survey of Canadá, GSC) y México (Servicio Geológico Mexicano, SGM) (Chiprés *et al.*, 2008).

A diferencia del GRN, el cual tomaría muestras de agua, perfiles de suelos y sedimentos. El NAGLP se orienta exclusivamente a suelos. La metodología a seguir sería la siguiente: se establecería una densidad de muestreo de aproximadamente 1600 km², la recolección de muestras se realiza por horizontes de suelo (superficial, O, A, B, C), y el análisis no se orienta únicamente a los aspectos geoquímicos de los suelos, sino que incluye análisis microbiológicos, de bioaccesibilidad y un número limitado de compuestos orgánicos (organoclorados, hidrocarburos, etc.). La finalidad de este esquema de trabajo es obtener un conocimiento más detallado sobre la composición de los suelos, la distribución de sus componentes, los posibles riesgos que pueden presentar, los procesos físicos y biogeoquímicos que en ellos ocurren (Chiprés *et al.*, 2008).

La primera fase del proyecto fue la etapa de planeación, prueba y refinamiento de protocolos, mediante estudios piloto a escala continental (un transecto vertical y horizontal que recorre EUA y Canadá, y un transecto vertical en el centro de México) y otro estudio piloto a escala regional (transecto en California), esta etapa concluyó en noviembre de 2007 (USGS, 2004; Smith *et al.*, 2005), y en México en el 2008, se inició el muestreo de la celda que abarcan el estado de Chihuahua y Sinaloa (Chiprés *et al.*, 2008).

I.1.3.-La Cartografía Geoquímica en México.

La geoquímica de suelos en México, en la actualidad no cuenta con un registro de la situación a escala nacional, regional o local. Debido a lo anterior y a su importancia para la relación suelo/hombre (económica, ambiental y de salud), el interés por realizar una base de datos de la geoquímica de suelos ha despertado la iniciativa de realizar proyectos de mapeo geoquímico por parte de instituciones académicas, así como de instituciones gubernamentales. Esta información permitiría identificar áreas de potencial riesgo a la salud por concentraciones elevadas o deficientes de elementos químicos, de origen natural (valores de fondo) o antropogénicos, así como establecer valores de referencia en la preparación de normativas y evaluaciones ambientales, sin dejar al lado otras aplicaciones (Chiprés *et al.*, 2007), a partir de la generación de mapas geoquímicos o líneas base (concentraciones actuales, tanto naturales como antrópicas).

Actualmente se viene desarrollando un proyecto piloto por parte de instituciones del gobierno como el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el Instituto Nacional de Estadística,

Geografía e Informática (INEGI), así como la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el cual tiene como objetivo principal crear una base de datos de valores de fondo a escala nacional, cubriendo la superficie del país con un muestreo espaciado a cada 40 km. Tomando el criterio tanto del GRN y GLP, la colecta de muestras se tomaría sobre sitios idealmente no impactados por actividad humana. El resultado que arrojará este proyecto, es el marco de referencia nacional del estado geoquímico natural de los suelos (valores de fondo).

Muchas anomalías geoquímicas (naturales o antrópicas), que son de carácter regional o local, debido a la gran escala (nacional) utilizada no quedarían registradas en este proyecto. En relación con lo anterior, cabe mencionar que actualmente existe una metodología en México aplicable con el fin de mostrar un panorama geoquímico regional o local (Chiprés *et al.*, 2007). Tratando de dar respuesta a GRN-NAGLP (identificación de anomalías geoquímicas y metodología a nivel regional o local) surge un proyecto paralelo al nacional, el mapeo geoquímico regional, promovido y ejecutado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, realizado en el Altiplano potosino en la Región Catorce-Matehuala; el objetivo principal es proponer y probar una metodología que permita registrar el panorama geoquímico actual de los suelos a escala regional, con un enfoque de carácter ambiental principalmente, pero sin limitar su potencial de aplicación en otras áreas (Chiprés *et al.*, 2007). La metodología propuesta por Chiprés *et al.*, (2008) fue desarrollada a partir del empleo de criterios similares a los establecidos por los proyectos internacionales Cartografía Geoquímica Mundial (Global Reference Network) y Paisajes Geoquímicos de Norteamérica (North América Geochemical Landscapes Project, promovido por los Servicios Geológicos de Canadá, Estados Unidos y México), sobre las siguientes tres escalas de trabajo:

- a) Una celda de 160 X 160 km, con 16 puntos de muestreo sobre el altiplano potosino, representan una densidad de muestreo de 1600 km², este diseño permitió identificar patrones geoquímicos a escala nacional en suelos no impactados (valores de fondo mundiales/continentales/nacionales) (Figura 2).
- b) Una celda de 40 X 40 km con 100 puntos de muestreo, sobre una región comprendida por la Sierra de Catorce y el Valle de Matehuala, que representa un densidad de 16 km² para identificar los patrones geoquímicos regionales sobre las condiciones actuales de los suelos con perspectiva ambientales y de salud (líneas base y valores de fondo).

- c) Una celda de 10 X10 km con 100 puntos de muestreo sobre el distrito minero de Santa María de la Paz, con una densidad de muestreo de 1 km² permitió identificar valores de fondo locales sobre un área mineralizada e impactada por actividad minera.

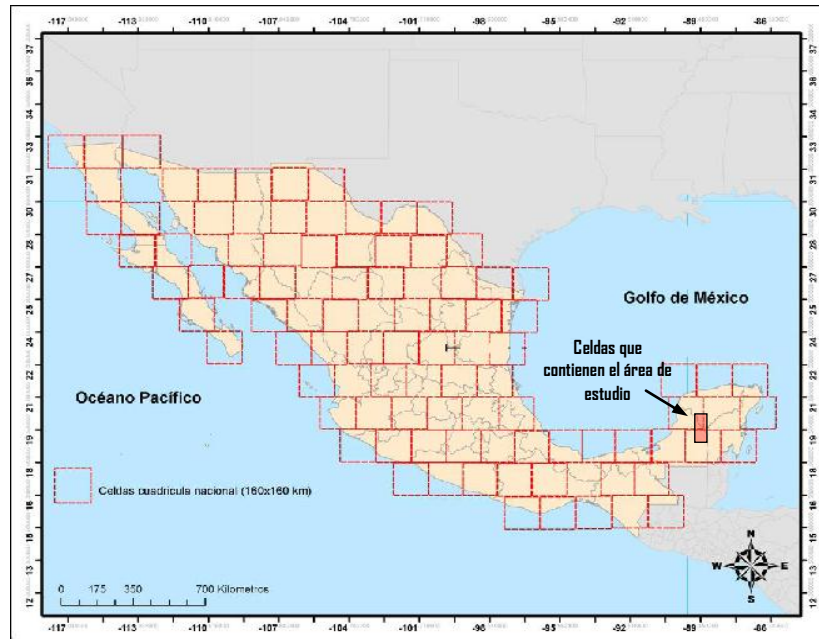


Figura 2. Cuadrícula global propuesta por el proyecto internacional GRN correspondiente al territorio mexicano. Cada celda tiene un área de 160 X160 km.

I.2.-Justificación

El estudio del suelo es de gran importancia debido a que es el soporte natural de la vida terrestre, es la base del desarrollo económico primario (agricultura, ganadería) por su influencia sobre los demás medios ambientales, al ser la fuente natural de elementos químicos. Por tales motivos, es necesario definir con detalle las características del medio terrestre superficial para así optimizar su aprovechamiento agrícola, ganadero y también para su protección ambiental. Soló hay que recordar que es en el suelo, donde se producen los cultivos y se cría al ganado que constituye el suministro de alimentos y sustento económico de comunidades, y su correcto aprovechamiento influye sobre la misma calidad de vida humana.

Actualmente diversas actividades agrícolas y agroindustriales han provocado cambios en las propiedades del suelo, afectando su productividad y con impactos por

elementos nocivos hacia el ambiente y la salud. Es cierto que existen algunos estudios de suelo en el Estado de Campeche, incluyendo cartas edafológicas realizadas por el INEGI. Sin embargo, hasta la fecha no existe un estudio de suelo en los valles de Edzná y Yohaltún que incluya sus más importantes variables físico-químicas y geoquímicas.

Estos factores cobran especial relevancia en los suelos que fueron cultivados de forma intensiva, y frecuentemente son los que desencadenan la llamada “fatiga del suelo”. Incluso, el desbalance en uno de los múltiples factores edáficos puede traer consigo problemas mayores en el sistema, que acaban repercutiendo en las actividades agrícolas y en su rendimiento. Solo mediante la completa caracterización de los factores es posible identificar situaciones adversas a tiempo.

En cuanto a la calidad geoquímica del suelo, hay que reconocer que los elementos químicos no están uniformemente distribuidos en la superficie terrestre y que pueden surgir problemas agrícolas, ambientales y de salud cuando la abundancia de uno de ellos en los suelos es demasiado baja (deficiencia) o demasiado alta (toxicidad). Aproximadamente se conocen 25 elementos que son esenciales para los humanos y la vida animal o vegetal (calcio, hierro, fósforo, potasio, sodio, cromo, cobalto, cobre, níquel, manganeso, molibdeno, etc.). Sin embargo, existen elementos que eventualmente no tienen ningún papel biológico reconocido y que a menudo tienen propiedades dañinas o perjudiciales en función de su dosis (ej. cadmio, arsénico, mercurio, talio y plomo).

Por tales motivos y dada la gran cantidad de variables del sistema suelo, la caracterización integral (física y química), es la mejor herramienta para un exitoso aprovechamiento del recurso suelo en todos sus aspectos. Un proyecto que incluya no solo la clasificación de suelos, sino su completa caracterización permitirá identificar con tiempo situaciones adversas o de mal manejo del recurso, para así poder implementar acciones correctivas o incluso mejorar las actividades productivas ya en desarrollo. La Organización de las Naciones Unidas, a través de la UNESCO, ya ha hecho evidente la necesidad de contar con estudios de suelos como un requisito para alcanzar el desarrollo sustentable.

I.3.- Objetivos

I.3.1.- Objetivo general.

Identificar y caracterizar geoquímicamente los diversos tipos de suelos en los Valles de Edzná y Yohaltún en el Estado de Campeche, dependiendo del uso a los que han sido sometidos en la zona de estudio, a partir de la obtención de líneas base y valores de fondo (paisaje geoquímico actual, ya sea por impacto antrópico o natural).

I.3.2.-Objetivos específicos.

1. Aplicar la metodología de cartografía geoquímica a escala regional, propuesta por Chiprés *et al.*, (2008), principalmente en suelos de uso agrícola con mayor desarrollo de los horizontes del suelo.
2. Obtener las líneas base por elemento (estado geoquímico actual), considerados de significado geoquímico para la región en los valles Edzná y Yohaltún.
3. Obtener los valores de fondo (concentraciones naturales), del área de estudio.
4. Comparar las concentraciones de los valores de elementos potencialmente tóxicos (EPT's), con los valores normativos a nivel nacional e internacional (de salud y ecológicos).
5. Pruebas para determinar el potencial de movilidad de los elementos traza del suelo al entrar en contacto con agua meteórica.

I.4.-Alcance.

Este proyecto busca obtener resultados de los cuales se pueda tener el paisaje geoquímico de la zona de estudio, es decir se trata de evaluar las condiciones geoquímicas actuales (líneas base), así como conocer y diferenciar las condiciones naturales (valores de fondo) de la zona. De esta manera se pueden identificar anomalías geoquímicas, las cuales

serían zonas de potencial interés económico (si las anomalías geoquímicas son naturales), ambiental y/o de salud (natural o antrópica).

Como se ha mencionado, en el desarrollo del presente proyecto se aplicaran la metodología propuesta por Chiprés *et al.*, (2008), la cual a su vez toma como base la metodología y los modelos propuestos por el Mapeo Geoquímico Mundial (GRN) y el proyecto de Paisajes Geoquímicos (GLP), de manera que se busca consolidar una metodología que en la actualidad en México no existe a nivel regional o local. Se pretende verificar en campo la calidad y confiabilidad de esta metodología.

El alcance ambiental del proyecto solo pretende ubicar zonas de potencial interés, se hará un análisis de las concentraciones resultantes con la normatividad ambiental y de salud vigentes a nivel nacional e internacional, principalmente en los EPT's ya sea de origen naturales o antropogénicos presentes en el medio ambiente (Selinus *et al*, 2005), esto con la identificación de las anomalías geoquímicas esto no implica necesariamente un riesgo a la salud o a los ecosistemas que los rodean (Chiprés *et al*, 2007).

II.- LOS VALLES CENTRALES DE EDZNÁ Y JOHALTÚN, EN EL ESTADO DE CAMPECHE: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS.

II.1.- Antecedentes.

El estado de Campeche ha sido objeto de numerosos estudios geológicos por parte de diversos organismos e instituciones, tanto nacionales como extranjeras. El primer estudio data del siglo XIX (Sapper, 1896). Consistió en un estudio regional de índole geográfico–geológico con observaciones sobre geología económica, en el que las rocas de la península fueron divididas en Terciario Medio y Terciario Superior. El Instituto Geológico de México, dentro de su programa de reseñas geológicas estatales, elaboró una descripción sucinta de la geología del Estado, en la que el Terciario Superior fue separado en Mioceno y Plioceno (Flores, 1925).

Posteriormente, se dio inicio a diversos estudios, tanto geológicos como geofísicos, con el objeto de conocer y determinar de una manera más precisa la localización y estructura de los yacimientos de hidrocarburos que existen en el subsuelo del territorio campechano, (Cornejo–Toledo y Hernández–O., 1950). Tales estudios culminaron con la perforación de pozos petroleros, que tuvo inicio en 1952 con el pozo Chicxulub No. 1 (López–Ramos, 1979). Lo anterior ha generado un conocimiento amplio del marco geológico regional, no solamente de Campeche, sino también de toda la península de Yucatán, tanto en superficie como de subsuelo.

López–Ramos (1973) hizo una compilación tanto de los estudios publicados como de informes inéditos de Petróleos Mexicanos. Una publicación en la que se recopiló los diversos estudios realizados hasta esa fecha sobre la península de Yucatán, que comprendía varias disciplinas fue editada por Weidie (1974).

En cuanto al área de estudio (Valles Edzná y Yohaltún), existen pocos estudios de referencia geoquímica; sin embargo, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) ha realizado levantamientos geoquímicos por sedimento de arroyo, y entre estos destaca los correspondientes a las cartas geoquímicas Campeche (E15-3) y Cd. del Carmen (E15-6), ambas editadas a escala 1:250,000 en el 2005 (2da edición).

II.2.- Marco socioeconómico.

II.2.1.- Localización, vías de comunicación.

El estado de Campeche se localiza al Sureste de México, entre los 17°49' y 20°51' de latitud N y los 89°05' y 92°28' de longitud W. Ocupa el décimo octavo lugar nacional con una superficie de 57,003.00 km² (INEGI, 1998). Limita al Norte con el Golfo de México y el estado de Yucatán, al Sur con Guatemala y Tabasco, al Oeste con el Golfo de México y Tabasco, al Este con el estado de Quintana Roo y al Sureste con Belice (Figura 3).

Las carreteras en el estado tienen una longitud de 3,971.36 km, dando una densidad de 6.86 km de carretera por cada 100 km². Estas enlazan a la mayoría de las localidades importantes de la entidad. Las vías férreas complementan la comunicación estatal con 403.8 km, este importante medio se ubica en la porción occidental con una orientación aproximada de Sur a Norte. El aeropuerto de Campeche ofrece servicio nacional e internacional, mientras que el ubicado en Ciudad del Carmen da servicio nacional; con respecto a los aeródromos, se encuentran distribuidos por la entidad un total de 22; además posee puertos de altura y cabotaje.

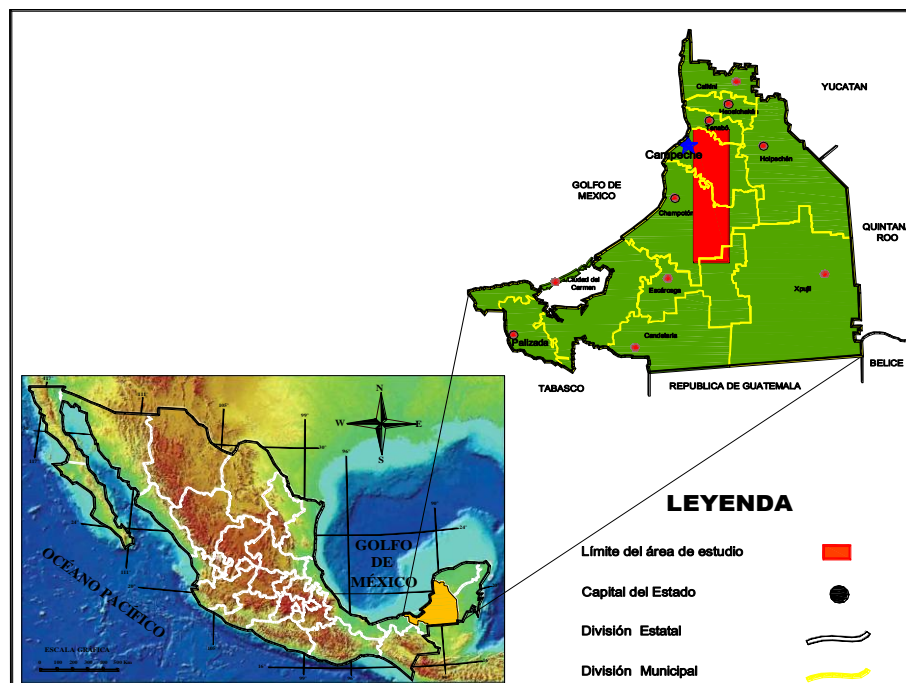


Figura 3. Plano de localización del estado de Campeche y del área de estudio, que corresponde a los valles de Edzná y Yohaltún.

El área de estudio esta comprendida dentro de una malla, que se compone de celdas de 5X5 km² (Tabla 1). En dicha área se encuentran los Valles de Edzná y Yohaltún, ubicados en la parte centro-norte del estado de Campeche, en el territorio de los municipios de Tenabó, Campeche, Champotón y Escárcega. El Valle Edzná abarca desde la parte sur del municipio de Tenabó, recorriendo de Norte a Sur el municipio de Campeche, hasta la zona centro del municipio de Champotón. Este valle es el más extenso del territorio a nivel estatal. La parte central de Champotón se comparte por ambos valles. El Valle de Yohaltún se ubica a partir de la zona centro de este municipio hasta el norte del Escárcega; la región de este valle está dedicada principalmente a las actividades agrícolas y ganaderas, debido a las características físicas del lugar.

Tabla 1. Coordenadas UTM zona 15N, que delimitan el área de estudio (basado en la malla de 5x5 km²).

| Vértice | Latitud | Longitud |
|---------|---------|----------|
| Punto 1 | 757750 | 2207752 |
| Punto 2 | 817750 | 2207752 |
| Punto 3 | 757750 | 2057750 |
| Punto 4 | 817150 | 2057750 |

Las principales vías de comunicación en el área de estudio (Figura 4), son las siguientes:

a). Accesos al valle de Edzná.

Carretera Federal 180, tramo Campeche-San Antonio Cayal. A partir de la Ciudad de Campeche en dirección “E”, con una longitud de aproximadamente 35 km.

Carretera Estatal 233 tramo Campeche-Tixmucuy. A partir de la Ciudad de Campeche con una longitud aproximada de 35 Km, comunica a la parte norte del Valle de Edzná.

Carretera Estatal 188, tramo Hool-Uzazil Edzná-San Antonio Cayal. Partiendo de la Ciudad de Campeche a través de la carretera federal 180 en el km 32 aproximadamente, se encuentra la carretera que limita la parte norte del valle de Edzná con una longitud aproximada de 60 km, cruzando por varios poblados a partir de Hool, a 20 km del entronque de Tixmucuy, a 10 km Uzazil Edzná, 20 km a San Antonio Cayal.

b). Accesos al valle de Yohaltún

Autopista Campeche-Champotón. A partir de la ciudad de Campeche hasta la ciudad de Champotón, y que sirve de vía de comunicación terrestre hacia el área del proyecto, con dos carriles de circulación y acotamiento en cada sentido de circulación.

Carretera federal 180, tramo Campeche-Champotón. Partiendo de la ciudad de Campeche hasta la ciudad de Champotón, es la carretera “libre”, sirviendo de vía de comunicación terrestre hacia el área del proyecto, con dos carriles de circulación en ambos sentidos.

Carretera federal 261, tramo Champotón-Entronque carretera federal 261, con carretera estatal a Felipe Carrillo Puerto, a la altura del km 4, tramo Champotón-Escárcega.

Entronque de carretera federal 261, con carretera estatal a Felipe Carrillo Puerto, altura del km 4, tramo Champotón-Escárcega-Valle de Yohaltún (Nayarit de Castellot), con una longitud aproximada de 60 km, constituye la principal vía de comunicación terrestre de acceso al área de estudio (esta vialidad fue utilizada para el traslado de la producción de arroz, que era transportado al molino arrocero ubicado en la ciudad de Champotón).

Carretera estatal de Campeche-Edzná-Valle de Yohaltún (Nayarit de Castellot). Con aproximadamente 130 km de longitud constituye una vía de comunicación terrestre hacia el sitio de estudio, desde la capital del Estado de Campeche.

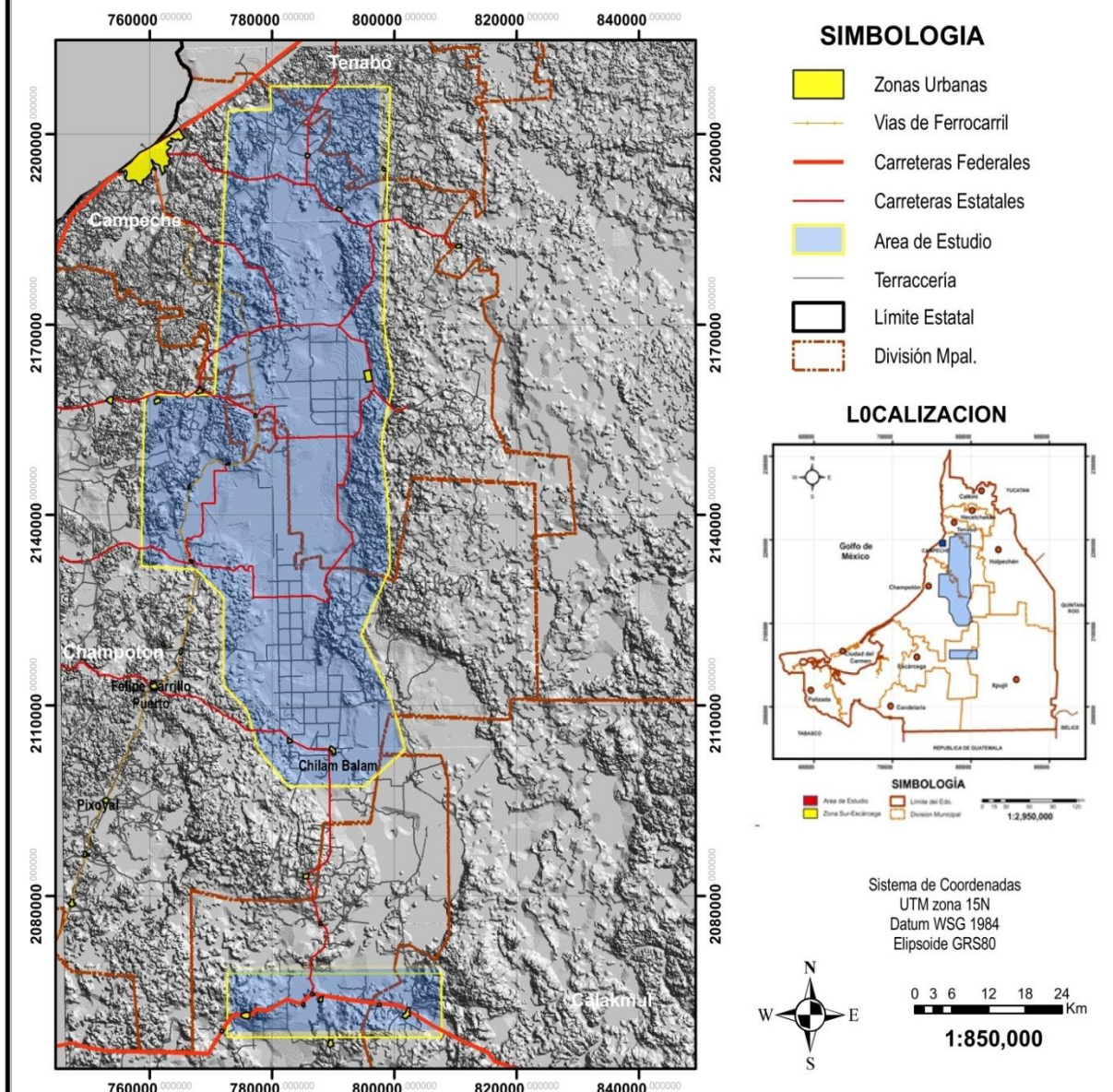
Camino carretero-terracerero Coronel José Ortiz Ávila-Valle de Yohaltún, con una longitud aproximada de 2 km. comunica a una de las localidades ubicada en la zona de influencia del Valle de Yohaltún.

Camino carretero-terracerero Nayarit de Castellot-Valle de Yohaltún, con una longitud aproximada de 5 km, comunica al sitio del proyecto con esta localidad ubicada en la zona de influencia del proyecto.

Camino terracerero San Antonio Yacasay-Valle de Yohaltún, con una longitud aproximada de 6 km comunica a esta localidad ubicada en la zona de influencia del área de estudio con el Valle de Yohaltún.

Camino terracerero Carlos Salinas de Gortari-Valle de Yohaltún, con una longitud aproximada de 5 km con respecto al Valle de Yohaltún, comunica a esta localidad situada en la zona de influencia, con el área de estudio.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún



Fecha de Elaboración del Mapa: Octubre 2011
Elaboró: Ing. Isidro Montes Avila
Revisó: Dr. Javier G. Castro Larragotia

MAPA DE LA LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO VALLES CENTRALES EDZNÁ - YOHALTÚN Y ZONA SUR-ESCÁRCEGA.

Figura 4. Localización y vías de acceso al área de estudio.

II.2.2.- Poblaciones y actividades productivas.

En el área de estudio se localizan los siguientes municipios que están ordenados por número de habitantes (Tabla 2), de menor a mayor: Tenabó, Escárcega, Champotón y Campeche.

Tabla 2. Municipios y No. de Habitantes del área de estudio. (INEGI, 2010)

| | Tenabó | Escárcega | Chapotón | Campeche | Edo. Campeche |
|----------------|--------|-----------|----------|----------|---------------|
| Hombres | 5002 | 26809 | 41760 | 125561 | 407721 |
| Mujeres | 4734 | 27375 | 41261 | 133444 | 414720 |
| Total | 9736 | 54184 | 83021 | 259005 | 822441 |

Las actividades que se presentan en la región son la extracción maderera, ganadería bovina, porcina, caprina, ovina; la extracción de miel, la cacería de subsistencia y el comercio. En la agricultura es de tipo comercial como chile verde, tomate rojo, frijol, sorgo y entre otros (calabaza y de subsistencia como el maíz, frijol y yuca) (Figura 5).

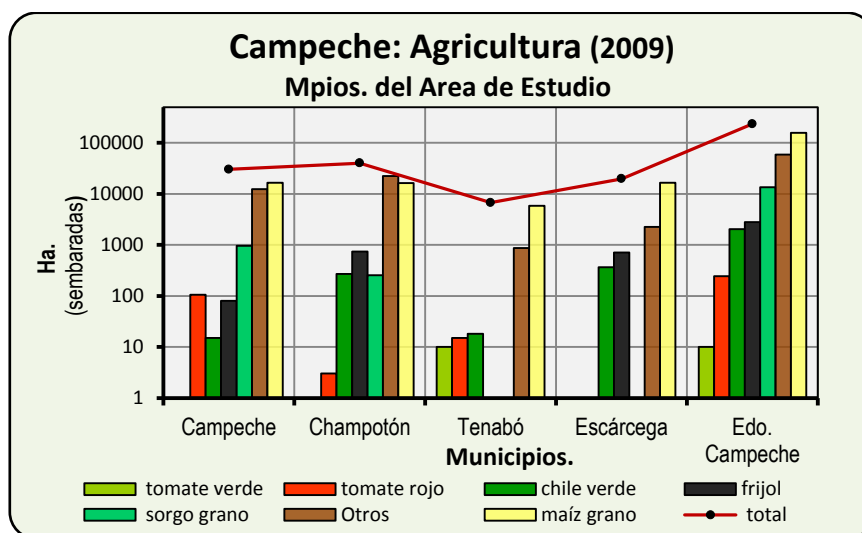


Figura 5. Gráfico de los principales cultivos en los municipios pertenecientes al área de estudio (INEGI, 2011)

La zona costera del estado cuenta con un litoral de 532 km de longitud, está dada cabida a diversas actividades económicas importantes como lo es la pesca.

El valle Edzná está localizado en la parte central del municipio de Campeche, y en la parte norte de Champotón (Figura 4). La población con la que cuenta la localidad de Edzná es de 299 habitantes, los cuales se dedican a las actividades agrícolas, donde se destacan los siguientes cultivos: maíz (72% de la zona cultivada), arroz (con el 5%) y caña de azúcar (16%); pero donde también predominan cultivos como sorgo, coco, cacahuete diversas variedades de plátano, naranja dulce y agria, así como de una gran variedad de hortalizas. Esta práctica se caracteriza por ser de temporal en la mayoría de las tierras sembradas (el 91%), mientras que el resto es de tipo de riego (9%).

Con respecto a la ganadería este valle se encuentra ubicado dentro de uno de los municipios de mayor importancia en el estado de Campeche (Champotón), por ende esta zona goza de esa misma importancia, ya que en ella encontramos gran cantidad de tierras destinadas a esta actividad. En el área de estudio la ganadería está integrada por animales ovinos y caprinos. Este valle es el más extenso del territorio a nivel estatal, y es apto para la actividad agrícola. Cuenta con pequeños cuerpos de agua, el nivel freático se encuentra a profundidades que van de 6 m a 90 m y su aprovechamiento agrícola se hace a través de obras de riego, su ubicación en el territorio estatal lo hace uno de los lugares con mayor recurso hidrológico.

II.2.3.- Uso del suelo.

De acuerdo al INEGI (2008), el principal uso de suelo en las zonas que no han sido desmontadas, para llevar a cabo la actividad agrícola o ganadera, cuenta con selva perennifolia y subperennifolia; agricultura de riego, agricultura de temporal principalmente. El giro que se le da al uso de suelo en ésta zona es de tipo agrícola y de agostaderos. Los tipos de vegetación presentes en la región son pastizales inducidos y selvas medianas en los alrededores (Figura 6).

En cuanto a selva refiere, en los valles central existente diversos tipos, los cuales se describen a continuación:

- 1). **Selva mediana subcaducifolia**, la cual se caracteriza por ser muy parecida en apariencia a la selva alta perennifolia, de la que se diferencia porque una alta proporción de los árboles (del 25 al 75%) pierden las hojas durante la época seca. Se estima que ocupa

aproximadamente un 4% del territorio, prosperando desde el nivel del mar hasta los 1,300 m de altura o un poco más, a una temperatura media anual entre los 20°C y 28°C. La precipitación media anual regularmente oscila entre 1,000 mm y 1,600 mm, con una temporada de sequía de 5 a 7 meses de duración. Se pueden identificar dos estratos de vegetación:

- Estrato superior: Los árboles del estrato superior alcanzan una altura entre 20 y 30 m. Las especies más representativas son: ramón (*Brosimum alicastrum*), rosadillo (*Mirandaceltis monoica*), jobillo (*Astronium graveolens*), yuco (*Bernoullia flammea*), cerezo (*Bumelia cartiláginea*), laurel blanco (*Cordia alliodorra*), olotillo (*Dendropanax arboreus*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), kopo (*Ficus cotinifolia*), cuapinol (*Hymenaea courbaril*), capire (*Mastichodendron Camiri*) y palo de rosa (*Tabebuia rosea*).
- Estrato medio: Los árboles del estrato inferior alcanzan alturas de 8 a 15 mts. Las especies más comunes son: capulín (*Belotia mexicana*), palo jiote (*Bursera simaruba*), Ceibillo (*Ceiba aesculifolia*), boob ch'iich' (*Coccoloba barbadensis*), Crotón (*Croton draco*), Cola de Pavo (*Cupania glabra*), Aceituno blanco (*Forchhammeria pallida*) y flor blanca (*Plumeria rubra*).

2). **Selva mediana subperennifolia.** Dependiendo del autor y del país, la selva alta perennifolia es también conocida como: bosque tropical perennifolio, selva alta o mediana superennifolia. La selva alta perennifolia presenta varios estratos y se caracteriza porque la mayoría de las especies no pierden las hojas durante la época de secas. Este tipo de vegetación se distribuye regularmente desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1,500 metros de altitud, en zonas con una temperatura media anual que regularmente no es inferior a 20° C, pero que rara vez supera los 26° C. La precipitación media anual oscila entre los 1,500 y 3,000 mm, sobrepasando algunas veces los 4,000 mm. En el continente, se localiza desde el Ecuador hasta el Trópico de Cáncer hacia el Norte, y hasta el Trópico de Capricornio hacia el Sur. Los estratos pueden ser los siguientes:

- Estrato superior, es mayor de 30 m con individuos de hasta 50 ó 60 m de altura. Las especies más comunes son: canxan (*Terminalia amazonia*), ojuste (*Brosimum alicastrum*), caoba (*Swietenia macrophylla*), castano (*Sterculia apetala*), chichicaste (*Poulsenia armata*), tamarindillo (*Dialium guianense*), chicozapote (*Manilkara*

achras), Olmo (*Ulmus mexicana*), las cuales, sirven de soporte para una gran cantidad de trepadoras leñosas y epífitas.

- El siguiente estrato se encuentra entre los 5 y 20 m. Entre las principales especies se encuentran: cacao (*Theobroma cacao*), Pimienta (*Pimenta dioica*), cedro (*Cedrela odorata*), Chicozapote (*Manilkara achras*), corozo (*Scheelea liebmannii*), palo jiote (*Bursera simaruba*), orejuela (*Cymbopetalum penduliflorum*), las cuales, soportan también una gran cantidad de plantas trepadoras leñosas y epífitas, que dan el aspecto de una red continua a lo largo del bosque.
- En el estrato menor a los cinco metros de altura, es posible hallar diversas especies de palmas así como al menos 9 especies de *cycadas*.

3). **Selva baja caducifolia.** Se le conoce con alrededor de 17 sinónimos, y es característico que la mayoría de las especies que la componen pierdan sus hojas durante la época seca, es decir entre 5 y 8 meses del año. Presenta un sólo estrato, y prospera desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1,900 m de altitud; la temperatura media anual oscila entre los 20 y 29°C y la precipitación varía entre los 300 y los 1,800 mm. Se calcula que ocupa aproximadamente un 8% del territorio del estado. Este tipo de vegetación solo tiene un solo estrato con una altura menor de 15 m y sus especies más representativas son: ciricote (*Cordia dodecandra*), jabín (*Piscidia piscipula*), Morro (*Crescentia alata*), araguaney (*Tabebuia Chrysantha*).

4). **Pastizal.** Vegetación dominada por herbáceas, principalmente gramíneas (pastos, zacates o graminoides). Casi todos los pastizales de nuestro país se emplean para la producción ganadera, casi siempre con una intensidad excesiva. Otros pastizales fueron bosques o matorrales y la acción del ganado y el fuego los mantienen en esta forma alterada. A éstos se les conoce como pastizales inducidos.

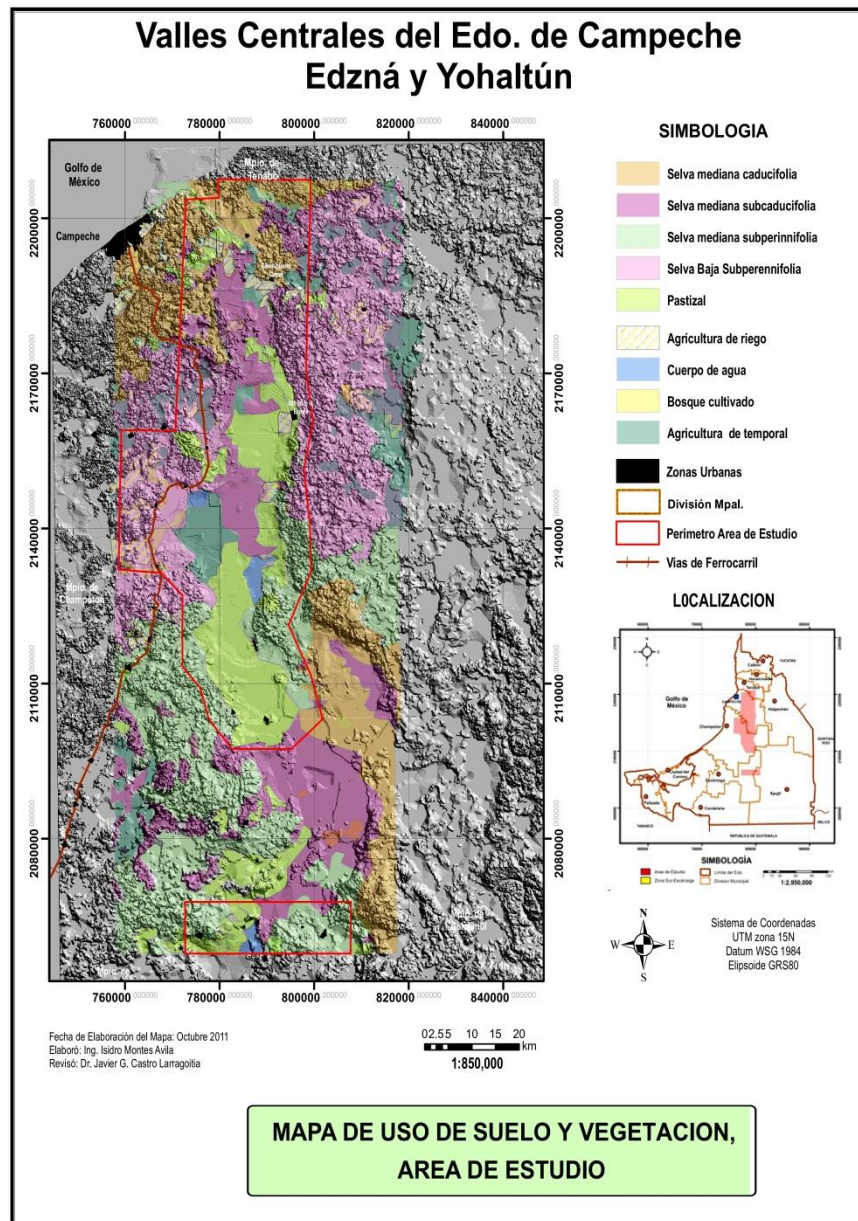


Figura 6. Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2008. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación 1:1'000,000).

II.3.- Marco físico.

II.3.1.-Climatología

En general, el clima del estado de Campeche es cálido subhúmedo con lluvias en verano y con una precipitación pluvial anual acumulada de 1,300 a 1,500 mm. El período de lluvias es de junio a octubre. La temperatura media anual es de 27°C; no se presentan heladas, y en cuanto a huracanes, su litoral es el de menor incidencia.

Si bien la importancia de las precipitaciones incide en la actividad agrícola de temporal, su potencialidad radica primordialmente en la recarga de los mantos acuíferos, sobre zonas calizas que favorecen la infiltración, hasta cerca de 2000 mm en el Suroeste en la llanura costera del Golfo Sur donde por la naturaleza del terreno es mayor razón por la cual se presenta un gran número de corrientes y depósitos de agua, como los ríos Palizada y Cantería o las lagunas de Atasta y Pom

Su posición geográfica dentro del trópico, aunada a su vecindad con el Golfo de México y el Mar Caribe, determinan la presencia de climas cálidos, húmedos y subhúmedos con lluvias en el verano, con temperaturas medias anuales superiores a 22° C y una precipitación total anual que varía de menos 1000 mm en el Norte en parte del área que fisiográficamente corresponde a la provincia denominada “península de Yucatán”.

La temporada de lluvias está comprendida entre los meses de junio a octubre y la de estiaje (ausencia de lluvias), del mes de enero a mediados del mes de mayo.

De acuerdo con la clasificación de Köeppen, modificada por E. García, se presentan cuatro tipos de clima en Campeche, todos ellos de tipo cálido, distribuidos en franjas concéntricas con aumento de humedad en el sentido Noreste-Suroeste.

Aw 0: el más seco de los cálidos subhúmedos, sobre los municipios de Calkiní, Hecelchakán, Tenabó, Campeche y Norte de Hopelchén.

Aw 1: el cálido subhúmedo intermedio, sobre los municipios de Champotón, Hopelchén, Escárcega y Carmen; en todos ellos abarca parte de su superficie.

Aw 2: el más húmedo de los cálidos subhúmedos en parte de Escárcega y Carmen, así como una pequeña porción del municipio de Calakmul.

Am: el cálido húmedo con influencia de monzón, ocupa parte del municipio de Carmen y todo el de Palizada.

El clima predominante dentro de la zona de estudio, según INEGI, es de tipo Cálido-Subhúmedo con lluvias en verano tanto para el valle de Edzná como para el de Yohaltún (Figura 7). Se encuentran en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas, donde el clima suele ser tropical, semiárido a subhúmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad.

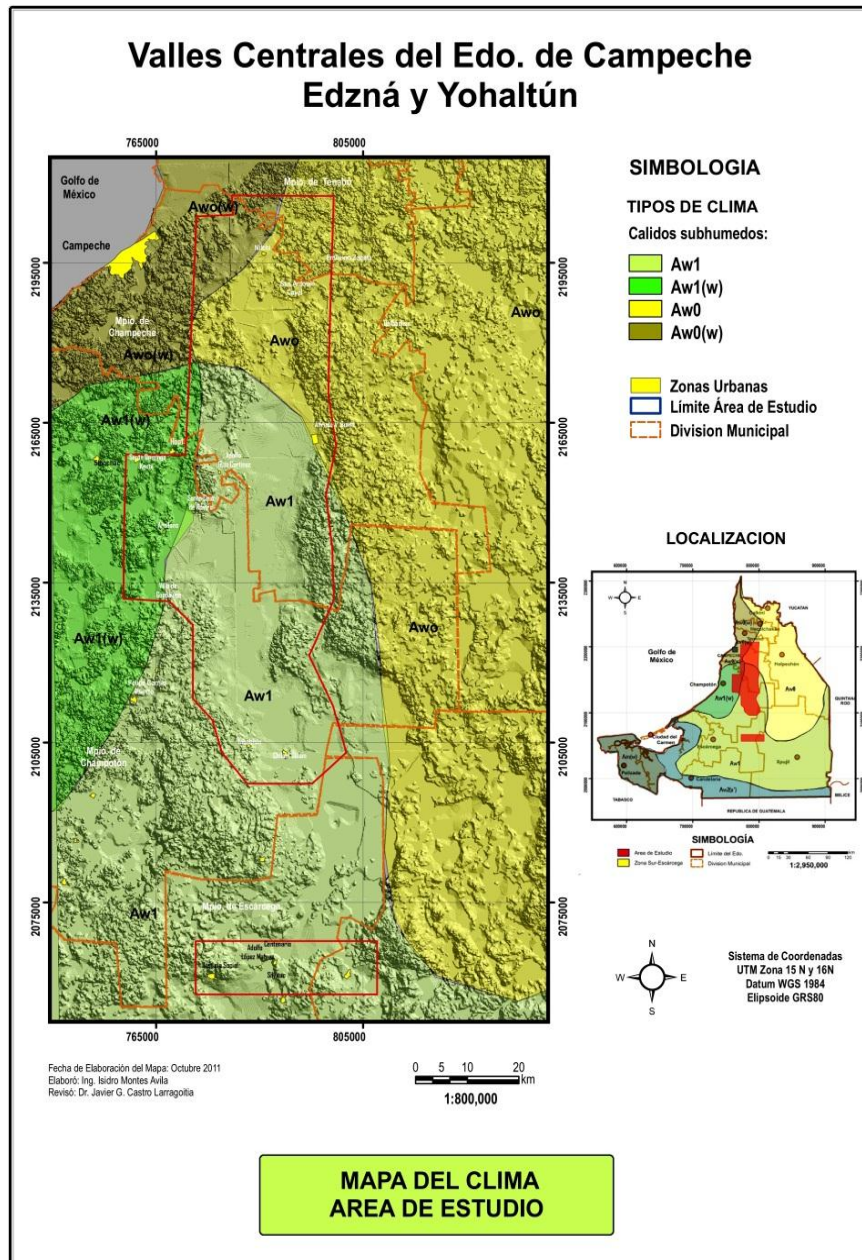


Figura 7. Mapa de climas en el área de estudio (INEGI, 2008. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación 1:1' 000,000).

El comportamiento histórico de la temperatura promedio anual en los últimos 10 años, oscila entre una temperatura máxima de 26.9 °C (2011) y mínima de 26.0 °C (2004), observándose una tendencia constante durante este periodo. El comportamiento histórico de la precipitación acumulada anual en los últimos 10 años, oscila entre una precipitación máxima de 1,790.3 mm (2005) y mínima de 1,133.5 mm (2009), observándose una tendencia negativa. (Figura 8)

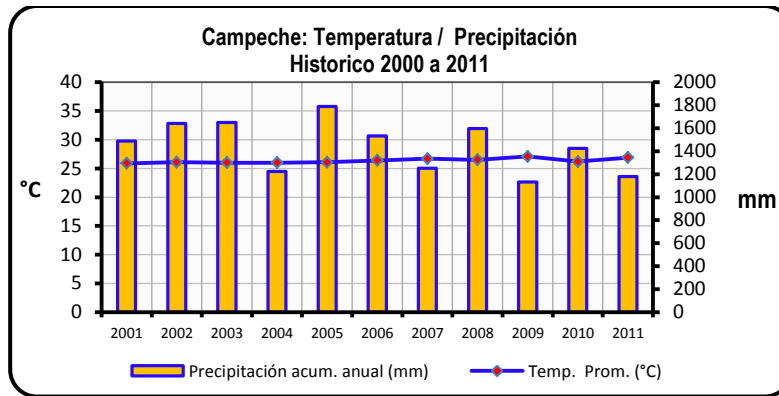


Figura 8. Gráfico histórico del clima (temperatura y precipitación), en el estados de Campeche (INEGI, 2010).

La temperatura promedio anual de esta región es de 26 °C como temperatura media, con una temperatura máxima que oscila entre los 40 °C, esto en la época de verano. Las temperaturas mínimas que se encuentran dentro de estos valles están entre los 10 y 14 °C en el mes de enero. La temporada de lluvias para el valle de Edzná está comprendida entre los meses de Junio a Octubre y la de estiaje del mes de Enero a mayo; mientras que para el Valle de Yohaltún la temporada de lluvia comprende los meses de junio a septiembre. La precipitación media anual es de 1543 mm en el 2010 (Figura 9).

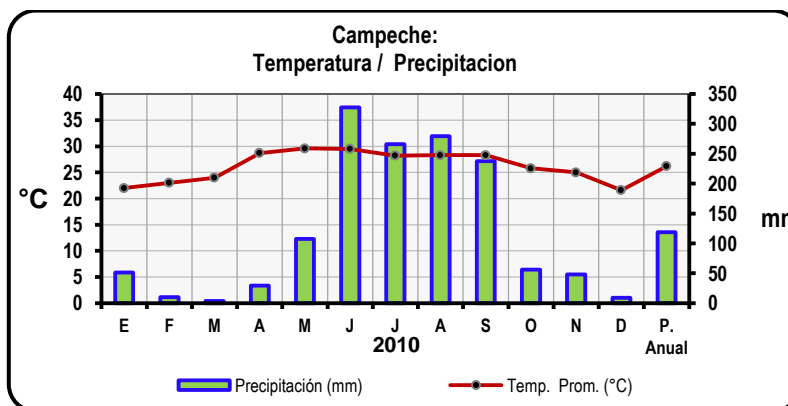


Figura 9. Gráfico año 2010 del clima (temperatura y precipitación), en el estados de Campeche (INEGI, 2010).

I.3.2.- Provincias fisiográficas.

La zona de estudio está localizada dentro de la provincia fisiográfica de la Península de Yucatán, dicha provincia limita al Norte y Oeste con el Golfo de México, al Este con el Mar Caribe y Belice, al Sur Guatemala y en el SW con la Llanura Costera del Golfo Sur

(Raisz, 1959) (Figura 10). Las características fisiográficas se describen en base a los municipios que son parte del área de estudio.

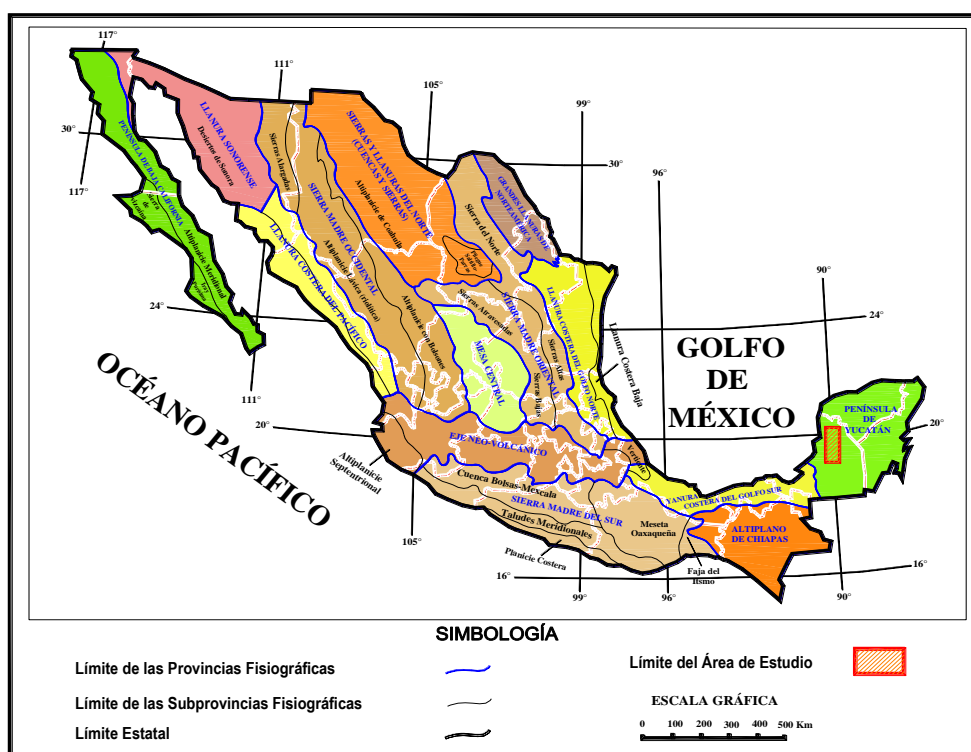


Figura 10. Ubicación del área de estudio dentro de las provincias fisiográficas de la República Mexicana.

Tenabó; Pertenece a la Península de Yucatán (100%), con una altitud entre 0 y 100 msnm, es parte de la Subprovincia Carso Yucateco (65.57%) y Carso y Lomeríos de Campeche (34.43%). Su sistema de topoformas se caracteriza por una llanura rocosa (38.44%), Llanura rocosa con lomerío de piso rocoso o cementado (34.26%), llanura costera con ciénagas (19.08%) y Playa o barra inundable y salina (8.08%). El dominio litológico corresponde a rocas sedimentaria: calizas (68.93%) y el resto es suelo con la siguiente distribución: lacustre (20.32%), residual (8.69%), palustre (1.01%) y aluvial (0.44%).

Campeche; Pertenece a la Provincia Península de Yucatán (100%), con una altitud entre 0 y 200 msnm., es parte de la Subprovincia Carso y lomeríos de Campeche (89.62%) y Carso Yucateco (10.38%). Su sistema de topoformas se caracteriza por una llanura rocosa con lomerío de piso rocoso o cementado (61.16%), lomerío bajo (37.81%), playa o barra inundable y salina (1.03%). El dominio litológico corresponde principalmente a rocas sedimentaria calizas (67.84%) y resto es suelo con la siguiente distribución; aluvial (22.72%), residual (6.96%), palustre (0.76%) y lacustre (0.01%).

Champotón; Pertenece a la Provincia Península de Yucatán (89.52%), con una altitud entre 0 y 200 msnm., es parte de la Subprovincia Llanura Costera del Golfo Sur (10.48%), Carso y lomeríos de Campeche (89.52%) y Llanuras y pantanos Tabasqueños (10.48%). Su sistema de topofomas se caracteriza por una Llanura aluvial costera inundable (36.78%), lomerío bajo (28.86%), lomerío bajo con Llanuras (23.95%), Llanura rocosa con lomerío de piso rocoso o cementado (5.13%), lomerío alto (4.94%) y Llanura de depósito lacustre con lomerío (0.21%). El dominio litológico corresponde a principalmente a roca sedimentaria calizas (64.95%), y el resto suelo con la siguiente distribución; aluvial (27.37%), lacustre (4.96%), residual (1.36%), palustre (0.84%) y litoral (0.12%).

Escárcega; Pertenece a la Península de Yucatán (99.59%) con una altitud entre 0 y 200 msnm, es parte de la Subprovincia Llanura Costera del Golfo Sur (0.41%), Carso y lomeríos de Campeche (99.59%) y Llanuras y pantanos Tabasqueños (0.41%). Su sistema de topofomas se caracteriza por Lomerío bajo con Llanuras (52.79%), Llanura de depósito lacustre de piso rocoso o cementado (45.75%), Llanura aluvial costera salina (0.31%), Lomerío alto (0.25%) y Llanura aluvial costera inundable (0.11%). El dominio litológico corresponde principalmente a rocas sedimentaria calizas (65.02%) y caliche (0.04%), y el resto es Suelo con la siguiente distribución; aluvial (31.80%) y lacustre (2.01%).

II.3.3.-Geología regional y geología local.

En este apartado se presenta un resumen de la geología regional que conforma la parte central de Estado de Campeche, así como, la estratigrafía local de los municipios comprendidos en el área de estudio (Tenabó, Campeche, Champotón y Escárcega). El presente resumen está basado principalmente en el trabajo que realizó el Consejo de Recursos Minerales (actualmente Servicio Geológico Mexicano, SGM), debido a que es el trabajo más completo y actualizado en cuanto a la geología de esta área, ya que se utilizaron las cartas geológicas E15-3 y E15-6.

Geología Regional

Al hablar del marco tectónico, así como de la evolución geológica del estado de Campeche, es necesario tener en cuenta la evolución que ha presentado la península de Yucatán en su conjunto, dentro del marco evolutivo de la cuenca del Golfo de México. Desde el punto de vista tectónico, el estado de Campeche queda ubicado dentro del terreno tectonoestratigráfico denominado como terreno Maya (Campa y Coney, 1983; Coney y Campa–Uranga, 1987; Sedlock *et al.*, 1993); o bien, de acuerdo con el criterio de otros autores, Campeche forma parte del bloque Maya (Dengo, 1975), terreno Yucatán (Comité Geodinámico de los Estados Unidos, 1989) o bloque cortical Yucatán–Chiapas (Dickinson y Lawton, 2001). Debida esta última denominación a que se comportó como un elemento de corteza rígida durante la expansión del fondo oceánico ocurrida en la apertura del Golfo de México.

En la porción central de la cuenca del golfo de México, la columna geológica consiste en rocas sedimentarias cuya edad oscila entre el Triásico Tardío y el Holoceno, la cual cubre de manera discordante a un complejo basal poco conocido de rocas pre–Triásicas. Dicho basamento, en la porción central de la cuenca, queda localizado a una profundidad estimada de 12 a 16 km debajo del nivel del mar.

Cubriendo a las rocas de basamento se halla una secuencia de lechos rojos, correlacionable con la Formación Todos Santos, a la que se ha asignado una edad del Jurásico–Cretácico (Viniegra, 1971) y, por otra parte, una edad del Triásico–Jurásico (López–Ramos, 1979). De acuerdo a perforaciones realizadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX), en el subsuelo del territorio campechano se ha detectado una secuencia calcárea de edad cretácica constituida principalmente por anhidrita, caliza, dolomía, yeso y arcilla bentonítica, principalmente hacia la base de la secuencia (López–Ramos, 1979). Por su parte, las perforaciones recientes encaminadas a la localización de hidrocarburos dentro de la sonda de Campeche, muestran especial interés en el Jurásico Superior, ya que en el intervalo Oxfordiano–Titoniano han sido encontradas rocas con gran potencial como generadoras y almacenadoras de Petróleo (Ángeles–Aquino, 1997).

Como lo señalan Lugo–Hubp y colaboradores (1992), las rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas, existentes en la plataforma de Yucatán, llegan a presentar un espesor que pudiera ser mayor a los 3,500 m, y tales rocas descansan sobre un basamento de edad paleozoica, sobre el cual existe una columna de rocas de edad jurásica, las cuales, a su vez, han sido reconocidas hacia el sector oriental de la península, sobre todo en la

porción centro septentrional de Belice. Todos los sedimentos del Cretácico que se han encontrado en las perforaciones de PEMEX, pertenecen a la parte superior de dicho periodo, es decir, al intervalo Campaniano–Maastrichtiano.

Dentro del territorio que comprende el estado de Campeche, las rocas expuestas comprenden un intervalo geocronológico que abarca del Paleoceno al Holoceno, y están constituidas por grandes espesores de caliza y caliza arcillosa con horizontes terrígenos. Esta secuencia de rocas carbonatadas presenta una actitud horizontal, con algunas pequeñas ondulaciones en el ámbito local, provocadas, posiblemente, por la paleogeografía existente al momento del depósito.

Las rocas pertenecientes a la era Cenozoica representan la totalidad de los afloramientos rocosos de la península de Yucatán. Estas rocas consisten en una secuencia marina de carbonatos y evaporitas, con material terrígeno escaso, cuyo espesor alcanza los 1,000 m (López–Ramos, 1973). En el SW del Estado, esta secuencia está cubierta por aluvión cuaternario. La secuencia basal de las rocas aflorantes en el estado de Campeche corresponde al Paleoceno; sobre ella, de manera concordante, existe el depósito de una serie carbonatada depositada durante el intervalo Eoceno–Holoceno

Las rocas paleocénicas constituyen la base de la secuencia terciaria que aflora dentro del territorio campechano. Estas rocas se encuentran expuestas principalmente en una franja que se extiende sensiblemente en dirección Norte–Sur, desde los límites con la República de Guatemala, al Sur, hasta las inmediaciones de la población de Dzitbalché, porción centro–oriental del estado, en la región conocida como “Los Chenes”.

En la base de esta secuencia, aflora una serie de cuerpos de yeso de espesor potente que han sido reconocidos y denominados, de manera informal, como formación Xpujil, aunque también han sido considerados como parte de las Evaporitas Yucatán (Salvador y Quezada–Muñetón, 1989); dichos cuerpos presentan sus mejores afloramientos en la porción meridional de la entidad. Cubriendo al yeso, se presenta una secuencia compuesta fundamentalmente por caliza y dolomía que llegan a presentar, ocasionalmente, fragmentos de pedernal. Dicha secuencia se conoce con el nombre de Formación Icaiché, definida por Sapper (1896) como una alternancia de caliza blanca, marga y yeso.

Cubriendo de manera concordante a la secuencia litológica de la Formación Icaiché, se encuentran las rocas más abundantes de toda la península, las cuales están representadas

por el depósito de una columna de caliza microcristalina de textura mudstone de color pardo claro y estructura estratificada, cuyos estratos presentan espesores variables. Dicha unidad ocasionalmente se observa en forma masiva; aflora en la porción central del estado, llegando a presentar fragmentos de sílice coloidal dentro de la matriz calcárea. Esta secuencia calcárea comprende la parte superior de la Formación Icaiché, Pisté y Chichén-Itzá (López-Ramos, 1973).

Las rocas del Oligoceno se encuentran expuestas principalmente en el sector septentrional de la entidad, principalmente en los límites con el estado de Yucatán. Tales rocas están conformadas básicamente por paquetes de caliza con contenido fósil con texturas que varían de grainstone-pakstone a boundstone de color blanco y rosado, así como caliza grainstone de la misma tonalidad.

Afloramientos similares se localizan en el área de Acapulquito, cerca del puerto pesquero de Seybaplaya, dentro del municipio de Champotón. Estas rocas podrían pertenecer a la parte superior de la Formación Chichén-Itzá, o bien, a la parte inferior de la Formación Carrillo Puerto.

Las rocas pertenecientes al Mioceno son las menos abundantes en la superficie estatal; sus afloramientos se localizan en la porción Suroccidental del estado, en las proximidades de los límites con el estado de Tabasco y la República de Guatemala, en la región del río Candelaria (Lámina A). Esta secuencia está compuesta por caliza fosilífera, con texturas predominantes de tipo packstone de color blanquecino un tanto recristalizadas pertenecientes a la Formación Bacalar (López-Ramos, 1973). Por su similitud con la Formación Carrillo Puerto, resulta complicado establecer diferencias claras entre ambas (Figura 11). Esta unidad se puede correlacionar con la Formación Río Dulce que se encuentra expuesta en el estado vecino de Quintana Roo.

Las rocas del Plioceno-Mioceno no diferenciadas, se cartografiaron como Neógeno (N), de acuerdo a Ortega-Gutiérrez y colaboradores (1992). Estas rocas se presentan en tipos diferentes: caliza blanca recristalizada con microfauna, caliza coquinoide y caliza conglomerática. Su actitud estructural es horizontal y se caracterizan por no presentar estratificación (López-Ramos, 1973).

Las rocas que pertenecen exclusivamente al Plioceno constituyen depósitos de caliza masiva bioclástica, ocasionalmente estratificada de textura packstone con esporádicos horizontes de lutita y limolita. Tales rocas se encuentran expuestas en el área cercana al límite con el estado de Tabasco, porción suroccidental de la entidad.

Las rocas del Cuaternario (Holoceno–Pleistoceno) que afloran en la entidad corresponden tanto al ambiente de depósito continental como al marino. El Cuaternario continental (Qc) está representado por depósitos de caliza bioclástica de textura packstone, así como por horizontes detríticos compuestos por lutita y limolita cubiertas por caliche (conocido en lengua maya como sascab), a las cuales no se les ha asignado un nombre formacional. En conjunto, estas unidades afloran principalmente en el sector occidental de la entidad. Con el símbolo Q, siguiendo a Ortega–Gutiérrez y colaboradores (1992), se designa a los sedimentos de la costa septentrional de la península de Yucatán, emergidos durante el Cuaternario debido a cambios eustáticos (a nivel mundial) del nivel del mar. Esa región costera constituye una provincia de depósito en la que la naturaleza de los sedimentos es estrictamente carbonatada marina, debido a la ausencia de corrientes fluviales que depositen sedimentos terrígenos (Aguayo–Camargo *et al.*, 1980). López–Ramos (1979) señala la posibilidad de que las calizas consolidadas pertenezcan al Pleistoceno y las no consolidadas, presentes en la faja costera, al Holoceno.

Geología Local.

El marco geológico superficial del estado de Campeche está representado básicamente por la presencia de una secuencia litológica compuesta por rocas calcáreas cuya edad corresponde a la era Cenozoica. Dicha secuencia carbonatada no presenta deformaciones significativas y está constituida por estratos que conservan una actitud horizontal o subhorizontal. Como parte de la provincia geológica Plataforma de Yucatán (Ortega–Gutiérrez *et al.*, 1992), el estado de Campeche constituye un sector de lo que ha sido denominado como Gran Banco Calcáreo Yucateco (Viniegra–Osorio, 1981).

La geología de los valles centrales (Edzná y Yohaltún) de Campeche data de la Era Cenozoica del periodo terciario (Neógeno y Paleógeno) (Figura 11). El tipo de roca presente son las sedimentarias de tipo caliza y caliza marga las cuales se originan por la acción de agentes externos (sustancias ácidas, lluvias, viento, etc.) que producen la desintegración

física y química de rocas preexistentes. Los materiales desintegrados son transportados por el agua y por el viento hasta que se depositan y se acumulan como sedimentos. Estos depósitos se compactan por el peso de las sucesivas capas de material y se disponen en forma de capas y estratos. La dureza depende del grado de cementación de los gránulos.

En este tipo de rocas encontramos una gran cantidad de minerales entre los que destacan el cuarzo, el feldespato, la calcita y las arcillas.

En el caso de la roca caliza margá esta se compone de caliza y arcilla, con predominio, por lo general, de la caliza, lo que le confiere un color blanquecino con tonos que pueden variar bastante de acuerdo con las distintas proporciones y composiciones de los minerales principales.

La unidad más antigua expuesta en el área de estudio corresponde a la Formación Icaiché del Paleoceno (TpCa-Yz), constituida principalmente por calizas, yeso, brecha calcárea con abundantes horizontes de sílice, cubriendo de manera concordante, se encuentra la Formación Chichen-Itzá (TeCz-Mg) de edad Eoceno conformada por calizas, margas y brecha calcárea con escasos horizontes arcillosos y de sílice que es cubierta discordantemente por la Formación Carrillo puerto (TmplCz-Cq) de edad Mioceno-Plioceno, constituida por caliza y coquina interestratificada con brecha calcárea. Le sobryace concordantemente la Unidad Bioclastos Sybaplaya (QptCq-Cz) de edad Pleistoceno que consta de bioclastos y conglomerados polimíctico con clastos de caliza, coquina, brecha y sílice sementados en una matriz bioclástica constituida por fragmentos de conchas y calcitas, intercalada con calcarenitas y coquina.

Las unidades antes descritas son cubiertas de manera discordante por depósitos cuaternarios no consolidados de litoral (Qholi), Palustre (Qhopa) y aluvión (Qhoal), de edad Holoceno.

Formación Icaiché (TpCa-Yz): constituida por calizas blancas con intercalaciones de margas y yeso. Son rocas de origen lacustre a menudo con dolomitas anhídras y silícificadas se distinguen de las rocas del Eocénico - Paleocénicas por la presencia de yeso, la formación se localiza al Sur de la península, aproximadamente a 20 Km de Zoh laguna, es posible que se extienda hacia el Norte hacia Chumul en donde existen importantes yacimientos de yeso y también hacia el Sur hacia la provincia del Petén.

Formación Carrillo Puerto (TmplCz-Cq): Ocupa una gran extensión peninsular y está constituida por calizas muy variadas que de lo profundo a la superficie son mármoles de un metro de grosor, cubiertos por calizas duras y ricas en *Planeroplidae* hacia abajo y de calizas más impuras, arcillosas, amarillento-rojizas, tal vez por efectos de laterización, hacia arriba que se acumulan en las dolinas y están protegidas por una densa selva.

Se trata de una formación francamente transgresiva que constituye prácticamente toda la parte oriental y central de Quintana Roo, centro de Yucatán y noreste de Campeche, cuya transgresión se manifiesta en sus concordancias con la formación Bacalar del Mioceno superior que le subyace y la formación Calizas con Moluscos probablemente del Pleistoceno, por lo que es posible que corresponda al Plioceno.

Formación Chichén Itzá (TeCz-Mg): Al Norte de Libre Unión, Yuc., está el miembro Chumbec, constituido por calizas masivas blancas y muy cristalinas con aspecto de mármoles sacaroideos. Su microfauna es pobre y representativa únicamente de la parte superior del Eoceno medio y superior. Muy cercano a Chichén Itzá se encuentra el miembro Pisté que comprende a los tres estados peninsulares y está formado por calizas amarillentas más o menos masivas, excepto en Campeche en donde presenta pliegues anticlinales y subclinales con ejes dominantes WNW-ESE fáciles de apreciar en los cortes de las canteras. La microfauna es muy abundante, característica del Eoceno medio del Caribe. Se le ubica en el centro y occidente de la península, considerándose transgresivo con respecto a Ixbacal.

Las capas del miembro Ixbacal son de espesor variable y se confunden con margas o arcillitas verdosas. Son rocas que forman pliegues cuyo echado es del orden de los 20° lo que indica con toda seguridad una afectación tectónica de importancia aflora al norte y al oeste de Escárcega. Su microfauna es muy abundante y por la similitud que tiene con la hallada en la cuenca del Caribe suponemos que pertenece al Eoceno inferior.

Geología

Valles de Edzná y Yohaltún, Camp.

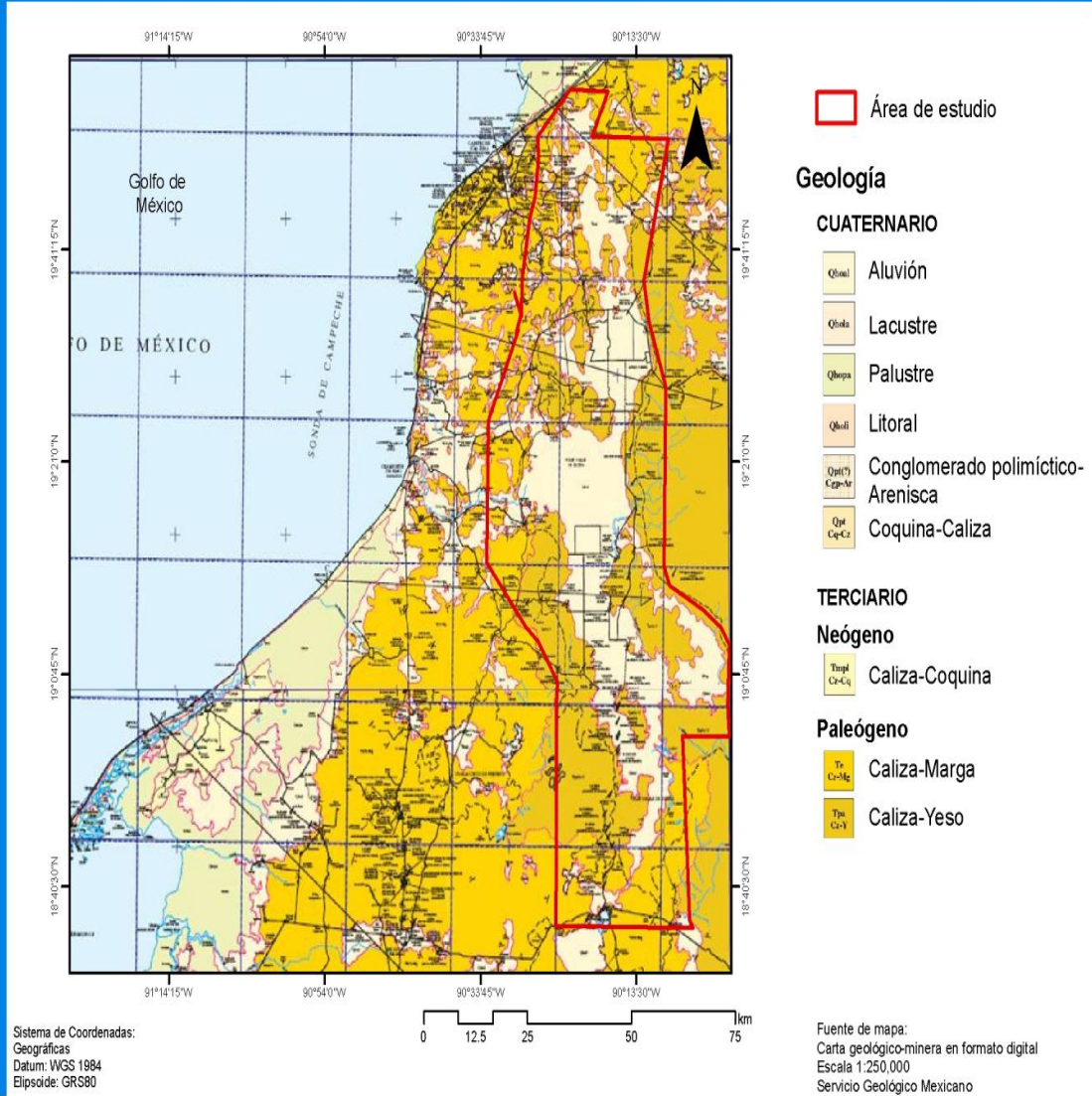


Figura 11. Plano Geológico Simplificado del área de estudio (SGM)

II.3.4.- Yacimientos Minerales.

Básicamente, los recursos minerales de la entidad se concretan a las sustancias no metálicas, principalmente en lo que respecta a depósitos compuestos por yeso, arcilla, caliza, caliza dolomítica y sal. Asimismo, se ha reportado la presencia de arenas de playa con importantes contenidos de zircón en la zona limítrofe con el estado de Tabasco, así como arenas de tipo síliceo en la región de Palizada, al sur poniente de la entidad.

De las sustancias anteriores, los depósitos de caliza son las más abundantes en el territorio estatal. Algunas de las localidades que actualmente explotan bancos de caliza llegan a presentar purezas de CaCO_3 superiores al 99% (área cercana a Champotón), que actualmente se utilizan, principalmente, para la producción de agregados pétreos en la industria de la construcción y para la fabricación de cal (viva e hidratada), así como materia prima en la fabricación de cemento. Y como se menciona anteriormente se describe los principales yacimientos en área de estudio.

Depósitos Estratiformes y en Lentes: De forma invariable, los depósitos de caliza, así como los horizontes arcillosos asociados, se presentan de manera estratificada; por tanto, pertenecen a este grupo los depósitos de caliza de la región de Escárcega, Tenabó y Campeche. De igual forma, quedan comprendidos en esta categoría las arenas zirconíferas y sílicas en forma de lentes del sur del Estado, así como los horizontes y lentes de arcilla.

Depósitos de origen detrítico: Dentro de esta categoría se incluyen a los depósitos de arcilla, así como las arenas sílicas y zirconíferas de la zona de Uvita y Zapata, localizada en las cercanías a la desembocadura del río San Pedro y San Pablo, el cual marca el límite con el estado de Tabasco

Depósitos de Origen Químico: Dentro de esta categoría, se encuentran los extensos depósitos de calizas que afloran en todo el territorio estatal. Los principales depósitos de este tipo que actualmente se encuentran en explotación corresponden a los localizados en las áreas aledañas a las poblaciones de Tenabó, Castamay, Campeche, Villa Madero, El Boxol (municipio de Champotón) y la localidad de Cantemó, así como los bancos localizados en los kilómetros 3, 6, 9, 10, 15 y 44.5 de la carretera Escárcega–Champotón. Asimismo, los cuerpos de yeso pertenecen a esta categoría y corresponden a las variedades cristalina (selenita) y alabastro, con algunas impurezas de arcilla. Las principales localidades de este tipo de depósitos corresponden a la zona de Xpujil (ejido Eugenio Echeverría Castellot), municipios de Calakmul, Hopelchén y Champotón, así como a los

cuerpos de yeso de la zona de Ucum–Chunchintok, en la región de Los Chenes. Por último, los depósitos salinos de Real de Salinas (ejido Tankuché, municipio de Calkiní) quedan incluidos en esta categoría. Estos depósitos se presentan en una extensión superficial aproximada de 16.7 ha.

II.3.5.- Edafología.

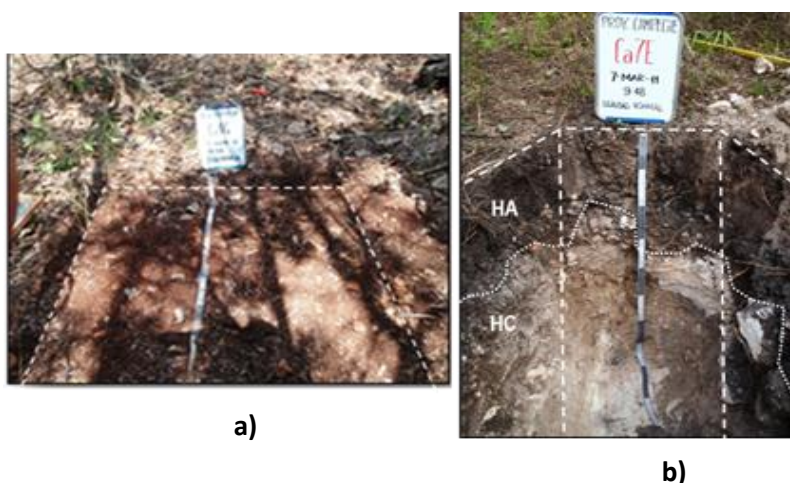
En este apartado se describen los principales tipos de suelos presentes en el área de estudio de acuerdo a la base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), es la sucesora de la Base internacional de referencia para la Clasificación de suelos (IRB), una iniciativa de la FAO, apoyada por el programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP) y la sociedad internacional de la Ciencia del Suelo, que data de 1980 (Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 84).

Tomando como base las cartas Edafológicas del INEGI (E15-3 y E15-6), así como las observaciones de campo realizadas durante la etapa de muestreo, los tipos de suelo presentes en el área de estudio ([Figura 12](#)), son los siguientes:

Pheozem (PH): son suelos de pastizales relativamente húmedos regiones forestales en clima moderadamente continental. Los Pheozem son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Pheozem pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo. **Descripción:** Connotación; Suelos oscuros ricos en materia orgánica; del griego phaios, oscuro, y ruso zemlja, tierra. **Material parental:** Materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till glaciario y otros. **Ambiente:** Cálido a fresco (ej. tierras altas tropicales) regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas de modo que la mayoría de los años hay alguna percolación a través del suelo, pero también con períodos en los cuales el suelo se seca; tierras llanas a onduladas; la vegetación natural es pastizal como la estepa de pastos altos y/o bosque. **Desarrollo del perfil:** Un horizonte mólico (más fino y en muchos suelos menos oscuro que en los Chernozems), principalmente sobre horizonte subsuperficial cámbico o Árgico.

Manejo y uso. Son suelos porosos, fértiles y son excelentes tierras agrícolas. En Estados Unidos de Norteamérica y Argentina, los Pheozem se usan para la producción de soja y trigo (y otros granos pequeños). Los Pheozem en las planicies altas de Texas producen

buenos rendimientos de algodón bajo riego. Los Pheozem en la franja templada se siembran con trigo, cebada y vegetales junto con otros cultivos. (Fotografía 1).



Fotografía 1. Pheozem; Fotografía a). suelo superficial, celda Ca4G, localidad Tikimul, Mpio. de Campeche (clasificación WRB; PH epileptico humico (calcarico esqueletico) /2) . Fotografía b). Perfil de suelo, celda Ca7E. localidad Nohakal, Mpio. de Campeche (PH humi endoleptico (calcarico episqueletico)/2).

Vertisol (VR): Son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expansibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo que ocurre en la mayoría de los años. El nombre Vertisoles (del latín verteré, dar vuelta) se refiere al reciclado interno constante del material de suelo.

Descripción: Suelos pesados arcillosos, que se mezclan; del latín verteré, dar vuelta.

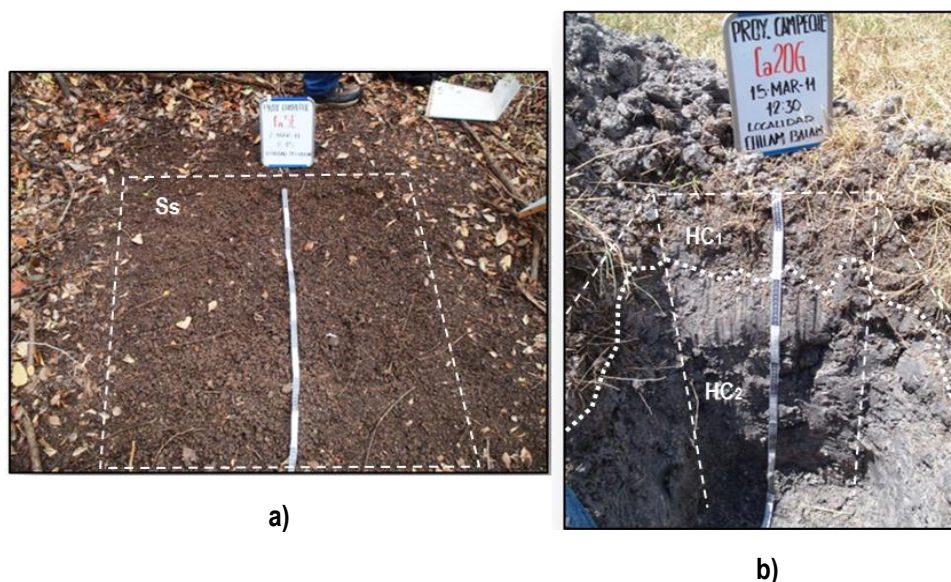
Material parental: Sedimentos que contienen elevada proporción de arcillas expansibles, o arcillas expansibles producidas por neo formación a partir de meteorización de rocas.

Ambiente: Depresiones y áreas llanas a onduladas, principalmente en climas tropicales, subtropicales, semiárido a subhúmedo y húmedo con una alternancia clara de estación seca y húmedo. La vegetación clímax es savana, pastizal natural y/o bosque.

Desarrollo del perfil: La expansión y contracción alternada de arcillas expansibles resulta en grietas profundas en la estación seca, y formación de slickensides y agregados estructurales cuneiformes en el suelo subsuperficial. El microrelieve gilgai es peculiar de los Vertisoles aunque no se encuentra comúnmente.

Características Químicas: La mayoría de los Vertisoles tiene una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un alto porcentaje de saturación de bases (PSB). La reacción

del suelo varía entre débilmente ácida a débilmente alcalina; los valores de pH oscilan entre 6.0 a 8.0 (Fotografía 2).



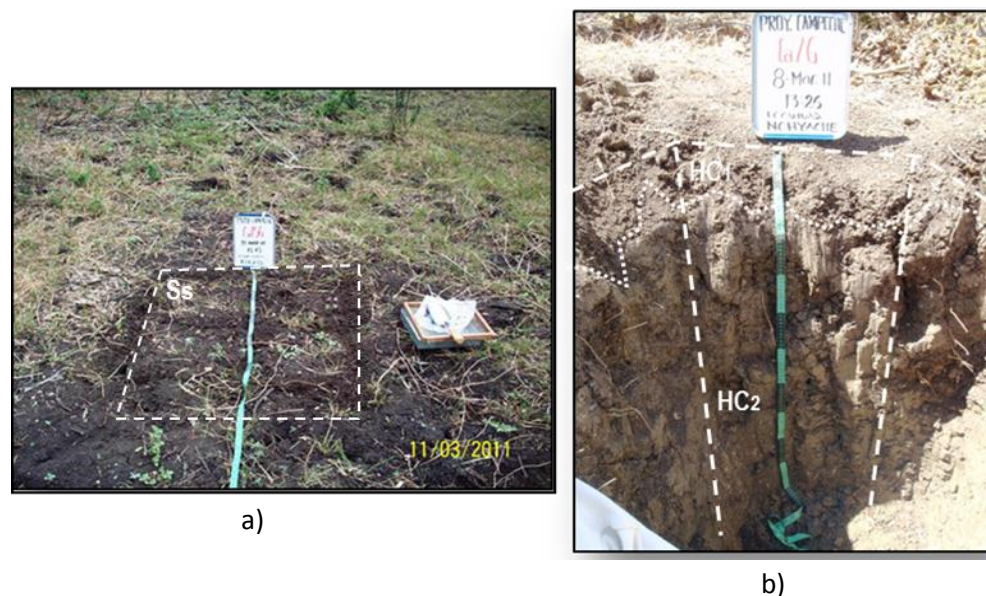
Fotografía 2. Vertisol; Fotografía a). Suelo Superficial (Ss) de la Celda Ca5E, Localidad Pocyaxum, Mpio. de Campeche (VR humi-epi-gleyco (másico eutricto)/2). Fotografía b). Perfil de Suelo (HC1 y HC2), Celda Ca20. Localidad Chilam Balam, Mpio. de Champotón (VR humi-epi-gleyco (calcarico, másico)/3)

Gleysol (GL): Son suelos de humedales que, a menos que sean drenados, están saturados con agua freática por periodos suficientemente largos para desarrollar un característico patrón de color gleyico. Este patrón esta esencialmente hecho de colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos/azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo. Muchos de los Gleysoles de la WRB correlacionan con los subórdenes acuicos de la Taxónoma de Suelos norteamericana (Acualfes, Acuentes, Acueptes, Acuoles, etc).

Descripción: Son suelos con signos claros de influencia del agua freática; del ruso gley, masa lodosa. **Material parental:** Un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno, con mineralogía básica a acida. **Ambiente:** Áreas deprimidas y posiciones bajas del paisaje con agua freática somera. **Desarrollo del perfil:** Evidencias de procesos de reducción con segregación de compuestos de Fe dentro de 50 cm de la superficie del suelo.

Manejo y uso: El principal obstáculo para la utilización de los Gleysoles es la necesidad de instalar un sistema de drenaje para bajar la capa de agua freática. Los Gleysoles drenados

adecuadamente pueden usarse para cultivos arables, producción lechera y horticultura. La estructura del suelo será destruida por un largo tiempo si los suelos son laboreados cuando están muy mojados. Los Gleysoles pueden ser bien utilizados para el cultivo de arroz inundado donde el clima sea apropiado. (Fotografía 3).



Fotografía 3. Gleysol; Fotografía a). Suelo superficial (Ss), celda Ca15G, localidad Kikab, Mpio. de Champotón. (GL epi-estagnico vértico (húmico, hipo sáico)/3). Fotografía b). Perfil de Suelo (HC₁ y HC₂), Celda Ca5F, Localidad Nohyaché (Hda. Zidzidla), Mpio. de Campeche

LUVISOL (LV): Son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial Árgico. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte Árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades.

Descripción: Suelos con una diferenciación pedogenética de arcilla (especialmente migración de arcilla) entre un suelo superficial con menor y un subsuelo con mayor contenido de arcilla, arcillas de alta actividad y una alta saturación con bases a alguna profundidad; del latín luere, lavar. **Material parental:** Una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo till glaciario, y depósitos eólicos, aluviales y coluviales. **Ambiente:** Principalmente tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas (ej. Mediterráneas) con estación seca y húmeda marcadas. **Desarrollo del perfil:** Diferenciación pedogenética del contenido de arcilla con un bajo contenido en el suelo superficial y un contenido mayor en el subsuelo sin lixiviación marcada de cationes básicos o meteorización avanzada de arcillas de alta actividad; los Luvisoles muy lixiviados pueden

tener un horizonte eluvial Albico entre el horizonte superficial y el horizonte subsuperficial Árgico, pero no tienen las lenguas albeluicas de los Albelusoles.

Manejo y uso de Luvisoles: La mayoría de los Luvisoles son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas. Los Luvisoles con alto contenido de limo son susceptibles al deterioro de la estructura cuando se labran mojados con maquinaria pesada. Los Luvisoles en pendientes fuertes requieren medidas de control de la erosión.

Los horizontes eluviales de algunos Luvisoles están tan empobrecidos que se forma una estructura laminar desfavorable. En algunos lugares, el subsuelo denso ocasiona condiciones reductoras temporarias con un patrón de color stagnico. Estas son las razones por las que los Luvisoles truncados en muchas instancias son mejores suelos agrícolas que los suelos originales no erosionados. (Fotografía 4)



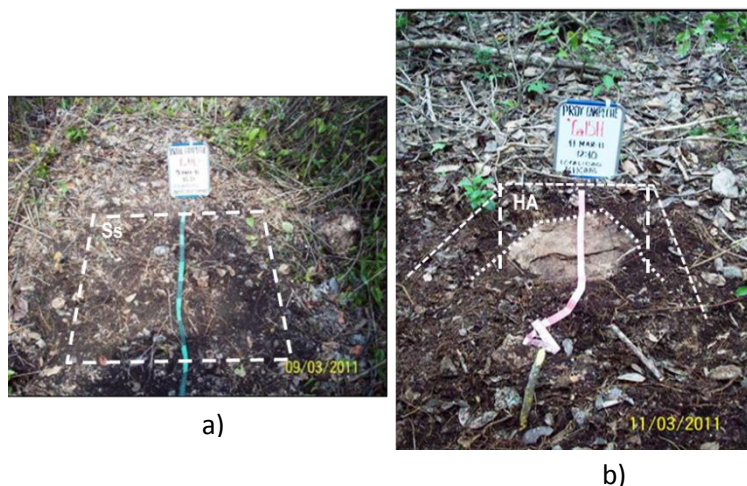
Fotografía 4. Luvisol LV profundihumico (rodico / 3) muestreo Superficial, celda Ca5H, localidad Cayal, Mpio. de Campeche.

LEPTOSOLES (LP). Son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente graviliosos y/o pedregosos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. En muchos sistemas nacionales, los Leptosoles sobre roca calcárea pertenecen a las Rendzinas, y aquellos sobre otras rocas, a los Rankers. La roca continua en la superficie se considera no suelo en muchos sistemas de clasificación de suelos.

Descripción; Connotación: Suelos someros; del griego leptos, fino. Material parental: Varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina. Ambiente: Principalmente tierras en altitud media o alta con topografía fuertemente disectada. Los Leptosoles se encuentran en todas las zonas

climáticas (muchos de ellos en regiones secas cálidas o frías), en particular en áreas fuertemente erosionadas. Desarrollo del perfil: Los Leptosoles tienen roca continua en o muy cerca de la superficie o son extremadamente gravillosos. Los Leptosoles en material calcáreo meteorizado pueden tener un horizonte mólico.

Manejo y uso de Leptosoles: Los Leptosoles son un recurso potencial para el pastoreo en estación húmeda y tierra forestal. Los Leptosoles en pendientes de colinas generalmente son más fértiles que sus contrapartes en tierras más llanas. Uno o unos pocos buenos cultivos podrán tal vez producirse en tales pendientes pero al precio de erosión severa. Las pendientes pronunciadas con suelos someros y pedregosos pueden transformarse en tierras cultivables a través del aterrizado, remoción manual de piedras y su utilización como frentes de terrazas. La agro-forestación (una combinación o rotación de cultivos arables y árboles bajo control estricto) parece promisorio pero esta todavía en una etapa muy experimental. El drenaje interno excesivo y la poca profundidad de muchos Leptosoles pueden causar sequía aún en ambientes húmedos. (Fotografía 5).



Fotografía 5. Leptosol (LP Rensico, epi-esqueletico (húmico, calcarico) /2), Celda Ca11D, localidad Adolfo Ruiz Cortinez, Mpio. de Campeche.

NITISOLES (NT): Son suelos rojos tropicales profundos, bien drenados, con límites difusos entre horizontes y un horizonte sub-superficial con por lo menos 30 por ciento de arcilla y estructura en bloques angulares moderada a fuerte con elementos que fácilmente se deshacen en los característicos elementos brillantes, de bordes planos o muciformes. La meteorización es relativamente avanzada pero los Nitisoles

Descripción: Suelos tropicales rojos, profundos, bien drenados con un horizonte sub-superficial arcilloso nitico que tiene elementos estructurales de bordes planos o nuciformes,

con caras de agregados brillantes; del latín nitidus, brillante. Material parental: Productos de meteorización de textura fina de rocas parentales intermedias a básicas, en algunas regiones rejuvenecidos por adiciones recientes de ceniza volcánica. **Ambiente:** Los Nitisoles se encuentran predominantemente en tierras llanas hasta con colinas bajo bosque lluvioso tropical o vegetación de savana. **Desarrollo del perfil:** Suelos arcillosos rojos o pardo rojizos con un horizonte subsuperficial nítico con alta estabilidad estructural. El tipo de arcilla de los Nitisoles esta dominado por caolinita /(meta)halloysita. Los Nitisoles son ricos en Fe y tienen poca arcilla dispersable en agua.

Manejo y uso: Los Nitisoles están entre los suelos más productivos de los trópicos húmedos. El solum profundo y poroso y la estructura del suelo estable de los Nitisoles permiten enraizamiento profundo y hace a estos suelos bastante resistentes a la erosión. El fácil laboreo de los Nitisoles, su buen drenaje interno y buenas propiedades de retención de agua se complementan con propiedades químicas (fertilidad) que comparan favorablemente con las de la mayoría de otros suelos tropicales. Los Nitisoles tienen contenidos relativamente altos de minerales meteorizables, y el suelo superficial puede contener elevado porcentaje de materia orgánica, en particular bajo bosque o cultivos forestales. La alta fijación de P necesita de la aplicación de fertilizantes P, generalmente provistos como roca fosfática de liberación lenta, bajo grado (varias toneladas por hectárea, con dosis de mantenimiento cada pocos años) en combinación con aplicaciones menores de superfosfato más soluble para la respuesta de corto plazo del cultivo. (Fotografía 5).



Fotografía 6. Nitisol, perfil, celda Ca2F, localidad Nilchi, Mpio. de Tenabó.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

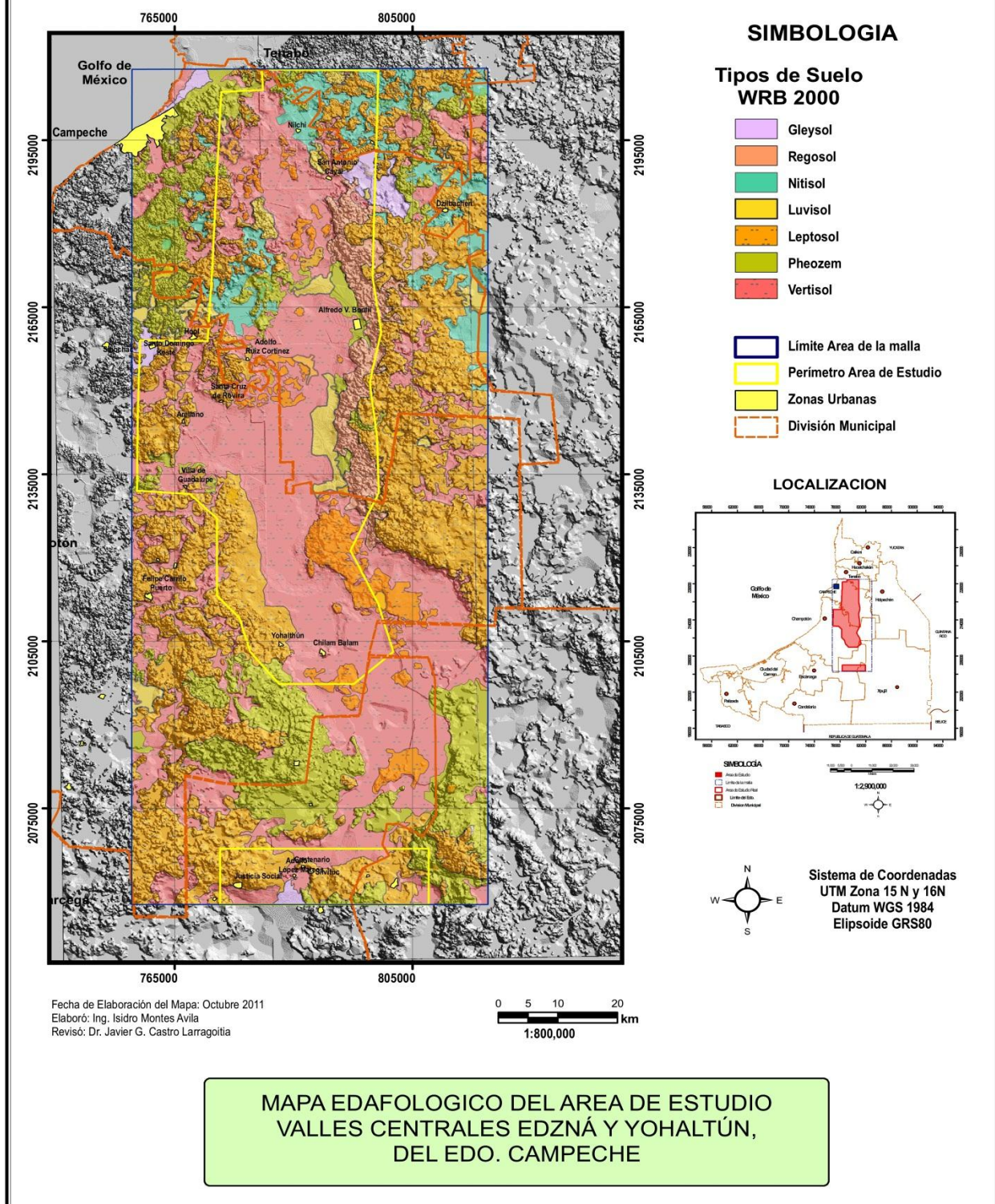


Figura 12. Tipo de suelos y su distribución, presentes en el área de estudio (tomado de INEGI, 2010, y modificado por Montes-Avila, 2011)

II.3.6.- Hidrogeología.

El estado de Campeche, y en específico el área de estudio se encuentran ubicado dentro de la región hidrológica denominada “Península de Yucatán”, en la subregión **Yucatán Oeste** (Campeche) es la más extensa, ocupa el 43.37% de la superficie estatal y se localiza al centro de la entidad, aquí se ubican las Cuenca de Yucatán (RH31), Cuenca Champotón y otros (RH32) y Cuencas Cerradas, las cuales contienen las corrientes Champotón, Las Pozas y Desempeño, así como los cuerpos de agua E. Sabancuy, L. Noh (Silvituc) y L. Chama-ha ([Figura 13](#)).

Los cuerpos de agua presentes en la zona de los Valles Centrales de Campeche están definidos según los municipios a los que pertenezcan. Por una parte en el municipio de Campeche los cuerpos de agua son subterráneos y que son alimentados por las precipitaciones pluviales presentes en la zona.

El manto freático oscila entre los 6 y los 9 m de profundidad y el cual está destinado para el uso agrícola y para la satisfacción de algunas necesidades básicas en los sectores rurales y urbanos del municipio.

Con respecto al municipio de Champotón éste municipio cuenta con el río Champotón que es navegable con embarcaciones de hasta 15 toneladas, desde Canasayab hasta Champotón, en una extensión de 35 kilómetros; es decir, la mayor parte de los 47 kilómetros que mide su longitud. Su cuenca es de 6,080 kilómetros cuadrados y su escarmiento anual asciende a unos 885 millones de metro cúbicos. Encontramos también lagunas como la de Nayarit de Castellot y Noch.

Las principales características hidrológicas de los municipios que pertenecen al área de estudio, se describen a describen a continuación (INEGI, 2009).

Tenabó; Este municipio, se localiza en las regiones hidrológicas: Yucatán Norte (Yucatán) con el 81.79% y Yucatán Oeste (Campeche) con el 18.21%. En él se encuentran las cuencas; Yucatán con el 81.79% y Río Champotón y otros con el 18.21%, y subcuenca Teop con el 18.21% y el resto del territorio no aplica con el 81.79%. Sus cuerpos de agua son Intermitentes (0.14%).

Campeche; Este municipio se localiza en la región hidrológica Yucatán Oeste (Campeche) con el 90.53% y Yucatán Norte (Yucatán) con el 9.47%. En él se encuentran las cuencas del Río Champotón y Otros con el 90.53% y Yucatán con el 9.47%, y la subcuenca Teop con el 78.96%, Varias con el 11.57% y el resto del territorio no aplicable con el 9.47%. Sus corrientes de agua son intermitentes y el cuerpo de agua es Perenne (Nilum) son el 0.03%.

Champotón; Este municipio se localiza en la regiones hidrológicas Yucatán Oeste (Campeche) con el 97.14% y Grijalva-Usumacinta con el 2.86%. En él se encuentran las cuencas; Río Champotón y Otras con el 83.37%, cuencas Cerradas con el 13.27%, y laguna de Términos con el 2.86%, y la subcuencas Varias con el 47.45%, Teop con el 26.96%, Rio La Gloria y Laguna Noh con el 13.27%, Champotón con el 9.46% y Laguna de Términos con el 2.86%. Tiene corrientes de agua perennes como Champotón, la Malinche e Icahao y las intermitentes (Acapulco y Desempeño) con el 0.7% y los cuerpos de agua son perennes (Xnohá, Nilum y Cenote agua azul) con el 0.06 %.

Escárcega; Este municipio se localiza en las regiones hidrológicas Grijalva-Usumacinta con el 60.18%, Yucatán Oeste (Campeche) con el 39.82%. En él se encuentran las cuencas; laguna de Términos con el 60.18%, Cuencas Cerradas con el 37.87% y Rio Champotón con el 1.95%, y las subcuencas Rio La Gloria y Laguna Noh con el 37.87%, Rio Caribe con el 24.68%, Rio Mamantel con el 17.49%), Laguna de Términos (16.42%), Varias (2.98%) y R. Candelaria (0.56%). Tiene corrientes de agua Perennes como: Concepción y Río Caribe e Intermitente (Arrigueña, El Tigre, El Trébol, El Zapote y La Victoria) y los cuerpos de agua Perennes (Silvituc, Xbonil, X-Toc, Yopú y Chama-Há) con el 0.41% e Intermitentes (Aguada Seca, Chuncopó y Saibil) con el 0.38%

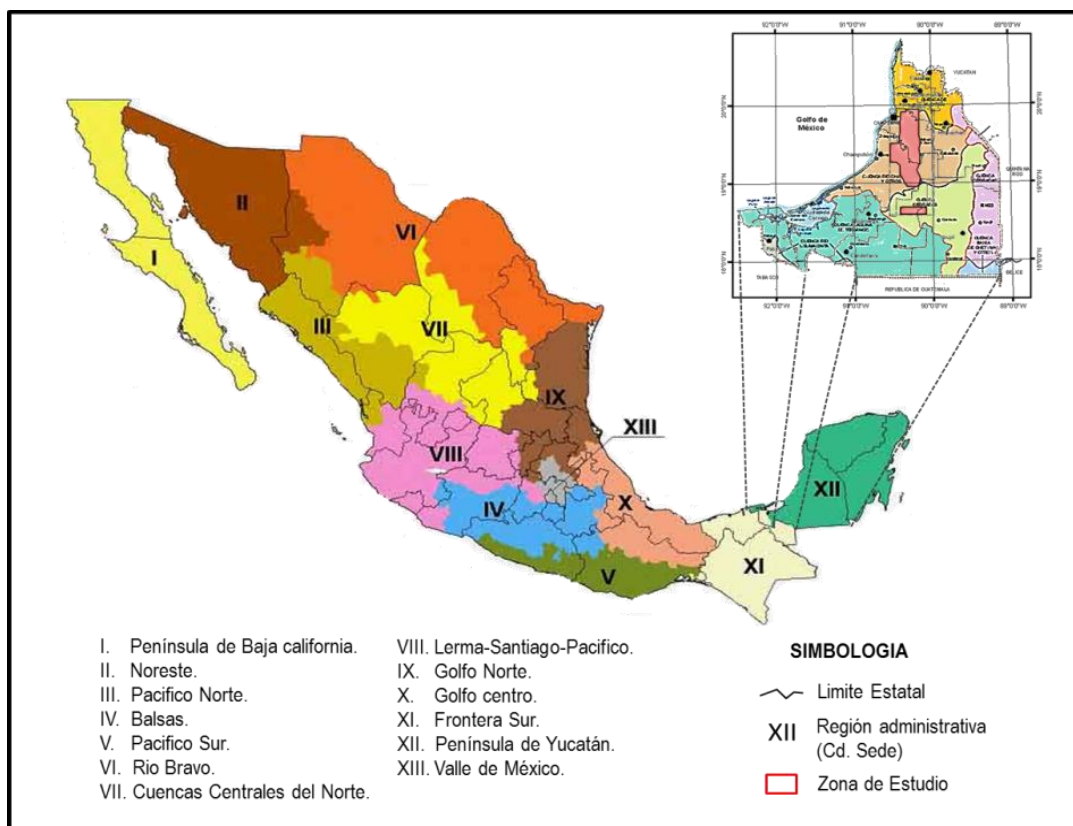


Figura 13. Ubicación del Área de estudio, en la región Hidrológica península de Yucatán, así como la ubicación de la Subregión Oeste; dentro de las cuenca de Yucatán (RH32), Cuenca de Río Champotón y otros (RH31) y Cuencas cerradas.

III.- DESARROLLO METODOLÓGICO.

El desarrollo de la metodología para la elaboración del Mapeo Geoquímico-Ambiental en los valles centrales del estado de Campeche (Edzná y Yohaltún), como se ha mencionado tiene como base la metodología a nivel regional aplicada por Chiprés *et al.*, (2007) para el Altiplano Potosino, emplea principalmente la técnica de análisis Exploratorio y Espacial de datos (EDA-SDA). Describe Chiprés *et al.*, (2008), que EDA-SDA permite establecer y visualizar espacialmente los patrones mostrados por las herramientas estadísticas, para así identificar con mayor certeza las poblaciones y subpoblaciones en las bases de datos utilizadas.

III.1.-Muestreo de campo.

En este apartado se especifica la metodología seguida para realizar el muestreo de campo el cual debido a sus diversas variantes (accesibilidad, clima, etc.), debe de tomarse como una parte determinante en la realización de la cartografía geoquímica, por lo que debe ser realizado con mayor control posible (Chiprés *et al.*, 2008)

El diseño de muestreo empleado y antes descrito Chiprés *et al.*, (2008), señala que el diseño de muestreo empleado debe de establecerse bajo tres requisitos esenciales, que son los siguientes:

- 1) Claridad en los procedimientos: Establecer protocolos bien definidos y simples de seguir, de manera que no necesite extensivos entrenamientos y se disminuya al mínimo la variabilidad del proceso.
- 2) Practicidad y robustez: De manera que los protocolos puedan aplicarse o incluso ajustarse a diversas situaciones encontradas en campo, sin afectar los resultados finales.
- 3) Perspectiva escalar: Es necesario diseñar el programa de muestreo en función de los objetivos a cumplir, pero más que nada mantener la noción de la escala de trabajo, ajustando el diseño de muestreo (celdas, densidad, etc.) al tamaño del fenómeno que se pretende identificar (local, regional, nacional). El salirse de esta perspectiva (ej. una densidad de muestreo muy grande) puede llevar a no identificar los patrones geoquímicos deseados.

En este trabajo, se planifica un muestreo sistemático a partir de una malla envolvente, que contiene el área de estudio, y esta es ajustada a los valles Edzná y Yohaltún.

Para la identificación de los grupos de suelos, se contó con el valioso apoyo del Ing. José Trejo Mata, Edafólogo INEGI, cuya experiencia en la aplicación de la WRB 2000, nos permitió identificar los tipos de suelo presentes en el área de estudio.

El muestreo de campo se divide en tres etapas, las cuales se explican a continuación:

a). Celdas de estudio y densidad de muestreo.

Para este proyecto se estableció una malla de muestreo de escala regional, sobre la parte central del estado de Campeche, abarcando desde el Norte hacia el Sur los municipios de Tenabó, Campeche, Champotón y Escárcega. El diseño de una malla envolvente de 60 x 150 Km y se abarcó un área de 9,000 Km², la cual estaba conformada con 360 celdas de 5 x 5 km, de esta manera la densidad de muestreo es de 25 km², sirvió para contener el área de estudio correspondientes a los valles de Edzná, Yohaltún y un área adicional denominada Sur-Escárcega con el motivo de tener información geoquímica de la zona sur fuera de los valles principales (Figura 14). El área de estudio correspondiente a los Valles de Edzná y Yohaltún quedó comprendida con 106 celdas de 5 x 5 km con una densidad de 25 km², abarcando un área de 2,650 km², aunado al área adicional Sur-Escárcega con 14 celdas (con las mismas condiciones de densidad de muestreo), abarcando está un área de 350 Km², teniendo en total 120 celdas de 5 x 5 Km, con un área de 3000 km². La malla de muestreo se elaboró con referencia a coordenadas UTM (unidades transversales Mercator, zona 15), las cuales tienen una extensión de 1 km, tanto vertical como horizontalmente. El uso de las UTM fue seleccionado porque permite realizar cuadrículados en mapas cartográficos con un alto nivel de exactitud, ideal para estudios regionales (Chiprés *et al.*, 2008).

Valles Centrales del Edo. De Campeche Edzná y Yohaltún

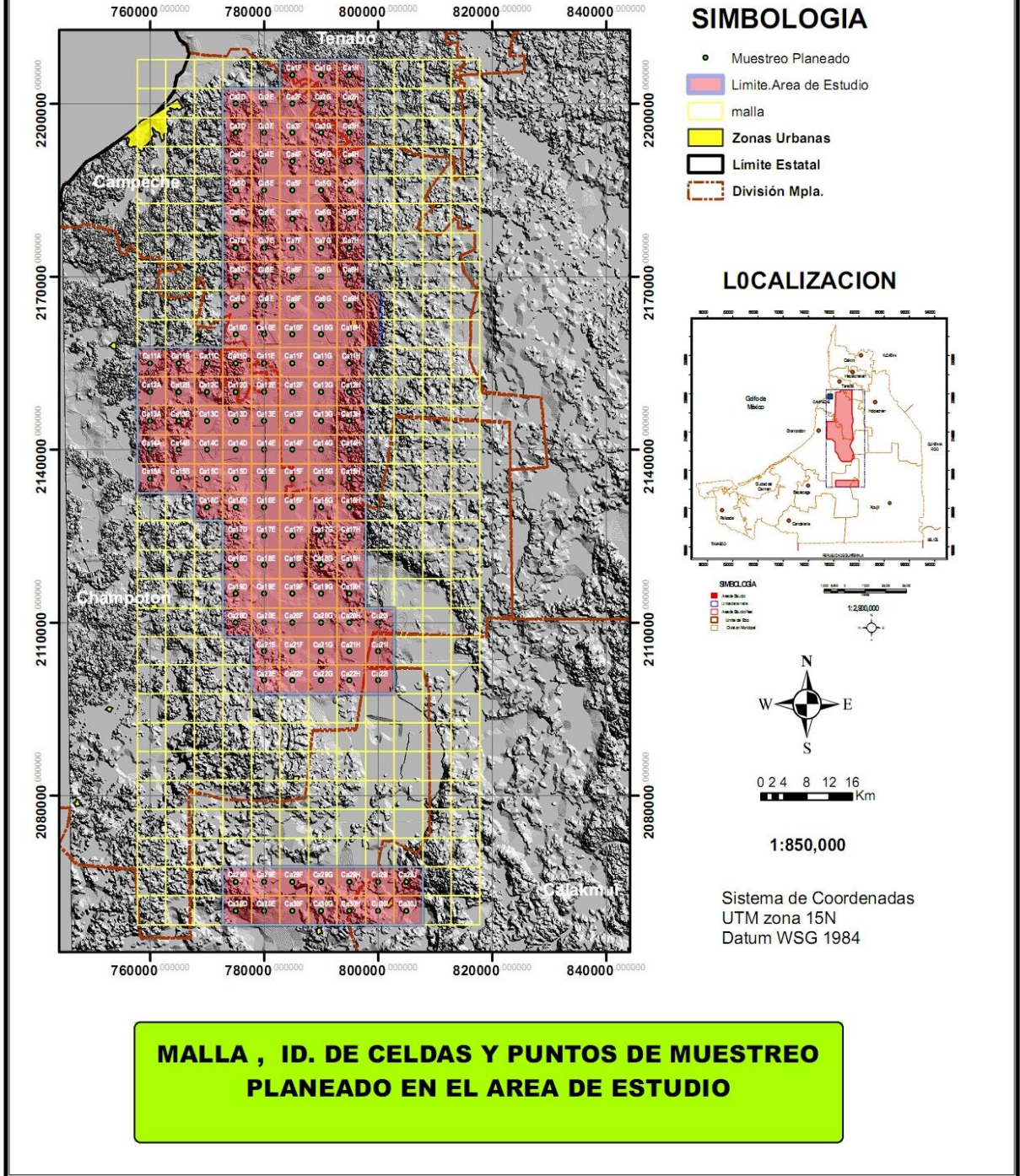


Figura 14 Mapa malla envolvente de 60 x 150 km, con celdas de 5 x 5 km y Malla ajustada al área de estudio con la totalidad de los puntos de muestreo de suelo.

b). Selección del Sitio de muestreo.

En el área de estudio la selección de los sitios a muestrear son determinantes para establecer el panorama geoquímico actual de los suelos, construir los mapas de línea base y establecer los valores de fondo. Por lo que se consideran dentro del muestreo los suelos impactados (actividades agrícolas y ganaderas) y no impactados (suelos naturales). Con relación a los anterior, Chiprés *et al.*, (2008) establece ciertos criterios para la selección del muestreo, para la escala regional señala que la muestra no deberá de tomarse aleatoriamente, esto con la finalidad de obtener un mayor representatividad de la muestra y para identificar la influencia litológica y edafológica sobre la geoquímica regional; para el cumplimiento de este criterio se utilizaron las cartas geológica, edafológica y topográficas de la zona, apoyado con el SIG (Arcgis 9.3).

Para la selección del sitio de muestreo se consideró ante todo la accesibilidad al sitio tanto topográficamente como de propiedad privada. En caso necesario se solicitó permiso de acceso a predios cercados y ejidos. Lo anterior llevó en ocasiones hasta seleccionar un nuevo sitio de muestreo, siempre considerando como criterio alejarse lo menos posible del sitio establecido originalmente (Figura 16).

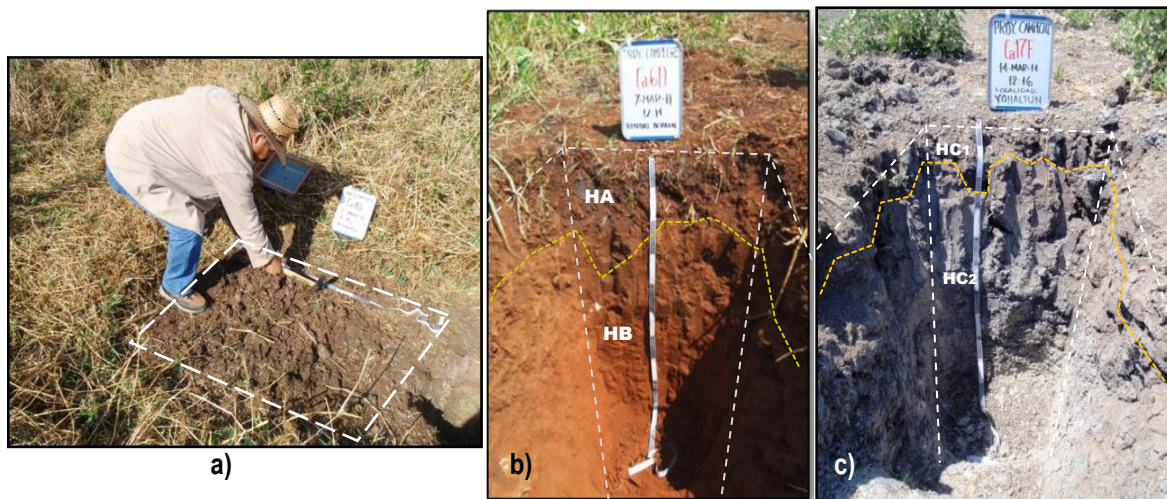
C). Muestreo

A partir del diseño de la malla de muestreo, así como, la densidad de muestreo y la selección del sitio para la toma de muestra en cada una de las celdas, se programó la campaña de muestreo.

Para la ubicación de cada uno de los puntos en campo se usó GPS, con las coordenadas (teóricas) previamente capturadas en cada uno de los equipos, apoyado con planos de campo (topográfico, geológico y edafológico).

Al ubicarse en campo el punto a muestrear, se procedía a coleccionar la muestra, como objetivo del muestreo era recolectar el suelo superficial (HS) recomendado para estudios de riesgo en salud (USGS, 2004), Horizonte A (HA) y Horizonte C (HC). Aunque en gran parte del área de estudio solo se encontraron suelos aluviales (Vertisol y Gleysol), formados por horizontes C. El horizonte superficial (1.0m x 1.0m x 5cm), se tomó en todos los puntos. En los sitios correspondientes a perfiles se realizó una zanja o calicata de (1.0 x 1.20 x 1.0 m) para coleccionar muestras del Horizonte A y Horizonte C (profundo) o su equivalente Horizonte B (Fotografía 7), debido a que en el campo en algunos sitios únicamente en el perfil se

desarrolló sobre un solo horizonte prácticamente HC, por lo que se toma muestra de los sub-horizontes C1 y C2 comprendidos dentro del horizonte C.



Fotografía 7. En la fotografía a). Se observa la delimitación del horizonte superficial (HS). Fotografía b). Se muestra un perfil (calicata) donde se delimita el horizonte HA y HB, y fotografía c). Se muestra un perfil donde se delimitan los horizontes C1 v C2.

El protocolo para la toma de muestra fue el siguiente; para suelo superficial o Horizonte superficial (HS), se limpia el área de muestreo retirando la hierba existente (arbustos, raíces y hojarasca) y rocas grandes, se delimita el área (1 x 1m), se excava a una profundidad de 5 cm, se marcan cuadrantes y se procede a tomar la muestra para pasar a través de la malla y así separar partículas a -2 mm, hasta juntar aproximadamente entre 1 a 1.5 kg y colocarse dentro de una bolsa de plástico previamente identificada y posteriormente cerrando herméticamente.

Para muestras tomada en perfiles; horizonte A, B, C (C1 ó C2) se excava una zanja (1.0m x 1.20m x 1.0 m), se identifican los horizontes y/o substratos. En base a las características edafológicas (horizonte calificador, color, textura, estructura,...etc.) (fichas de campo), se limpia el perfil y se empieza coleccionar la muestra de abajo hacia arriba por cada uno de los horizontes separando cada muestra de 1 a 1.5 kg en su bolsa de plástico previamente identificada para posteriormente cerrar herméticamente.

En casos especiales (principalmente en las zonas más bajas de los valles), se encontraron suelos aluviales (Vertisol y Gleysol) de gran profundidad en donde el horizonte C se estimaba a varios metros de profundidad. En tales casos se adoptó un criterio de máxima profundidad de muestreo, de manera que alcanzada la profundidad de 1.0 a 1.10 m se tomaba la muestra de suelo.

Para la toma de muestras se determinó colectarla en los substratos C1 y C2 (Fotografía 7c), Considerando que en substrato C1 está más cercano a la superficie del terreno y posiblemente refleje afectación de las actividades antrópicas. Lo anterior generó que para el análisis por horizontes las siguiente identificación: Suelo Superficial (HS), Horizonte Superior (HA y HC1) y Horizonte Inferior (HB, HC y/o HC1).

De manera conjunta se llenó una ficha de campo con las características del perfil y el paisaje, así como su localización geográfica y fecha. Finalmente se fotografiaba el perfil de suelo (previo a la toma de muestra) y el paisaje del sitio

El principal problema en la campaña de muestreo fue la accesibilidad al sitio, ya que algunas celdas se localizaban en predios privados o en sitios de muy difícil acceso (principalmente al en la parte oeste del Valle de Yohaltún entre la zona de Santa Cruz de Rovira y Cnel. Ortiz Ávila). Por tal motivo, se descartaron 32 celdas de las 120 originalmente propuestas, considerando que en las 80 celdas restantes se abarcaran todas las zonas agrícolas, ganaderas y que representaran todos los tipos de suelo y litología. De los 80 puntos muestreados (32 son perfiles), se recolectó un total de 144, muestras divididas en 80 de suelo superficial, 32 de horizonte superior (19 de HA y 13 de HC1) y 32 de horizonte inferior (4 de HB, 15 de HC y 13 de HC2) (Figura 15).

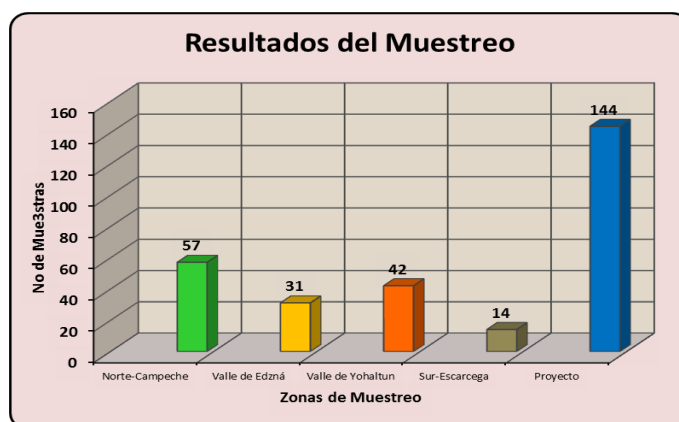


Figura 15. Distribución de Muestras por Zonas y total en el Área de estudio.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

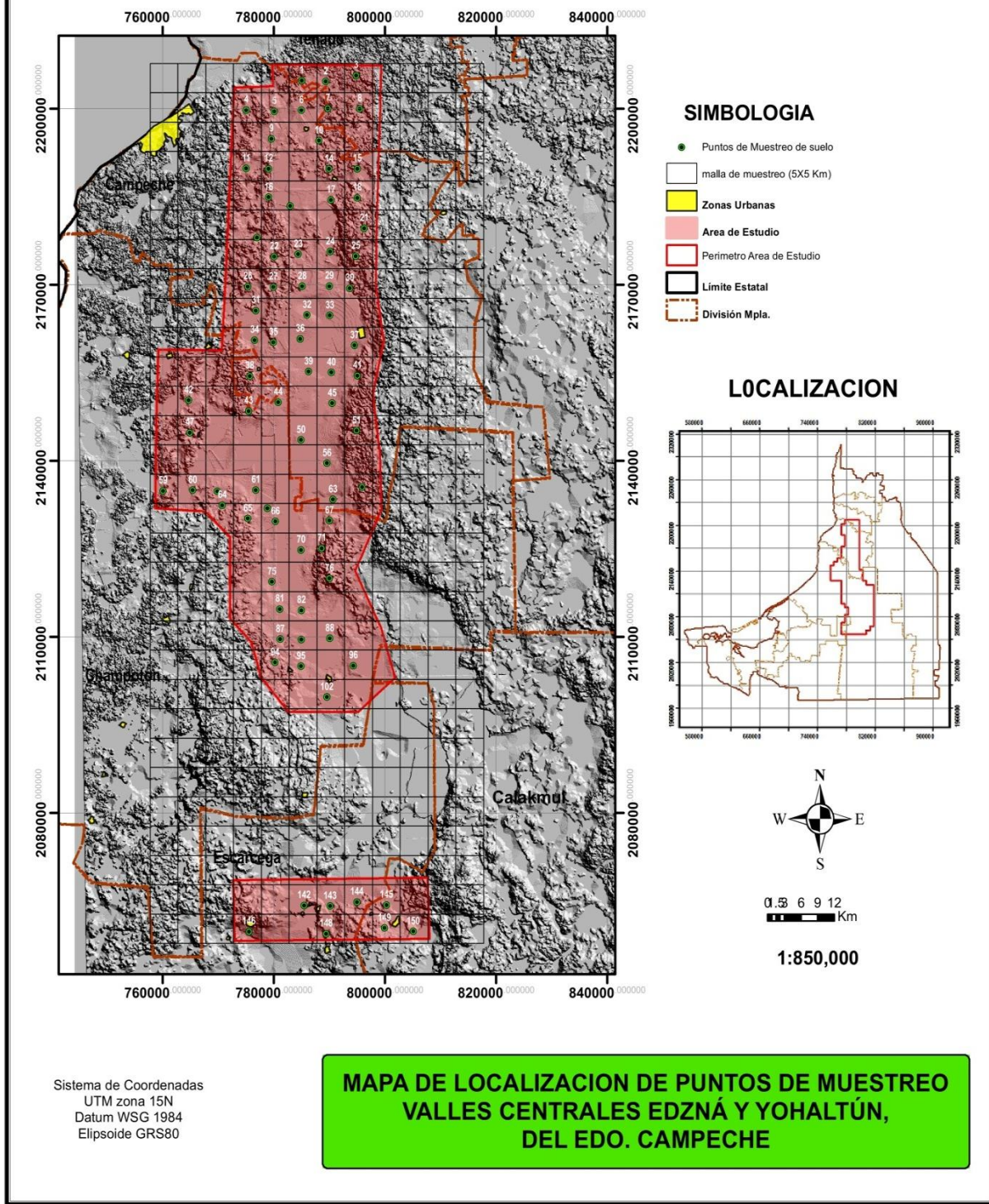


Figura 16. Mapa con los puntos de muestreo con su ubicación real en campo a la toma de muestra, en su totalidad los puntos muestreados están contenidos en cada celda.

III.1.1. Control de calidad de muestreo

El control de calidad en la etapa de muestreo de campo se aplicó las siguientes medidas:

- a) Recolección de duplicados de muestras en campo, tratando en lo mayor posible la repetibilidad de condiciones a la toma de muestra original, se tomaron 10 duplicados de 80 puntos de muestreo (12.5%), distribuidas en toda el área de estudio.
- b) Limpieza y lavado de material entre muestra y muestra, usando agua deionizada, alcohol isopropílico y jabón biodegradable.
- c) En calicatas limpieza de la pared del perfil de suelo y muestreo de abajo hacia arriba

En resumen la colecta de muestras en esta etapa es de 80 puntos de muestreados en 120 celdas, y se llevó acabo de la siguiente manera: 80 muestras de suelo superficial (1m x 1m x 5 cm), 32 perfiles (1.0 x 1.20 x 1.0 m), de los perfiles se obtuvieron 32 muestras del horizonte superior correspondiendo a 20 del horizonte HA y 12 del horizonte HC1, y en cuanto a las 32 muestras del horizonte Inferior corresponden a 4 del horizonte HB, 16 del horizonte HC y 12 del horizonte HC2. Colectando un total de 144 muestreas en toda el área de estudio.

III.2.- Preparación de muestras y análisis químico.

La preparación de la muestra es tan importante como el muestreo y análisis de la misma, ya que los errores cometidos en este proceso pueden invalidar el resultado del análisis químico. La preparación de la muestra de suelo incluye el traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado, homogeneizado, y el almacenamiento para su conservación. Con el propósito de evitar la contaminación de la muestra de suelo y asegurar mayor precisión y exactitud en el resultado del análisis, se deberá realizar esta operación en un lugar especial y limpio.

a. Preparación de muestras

Preparación de muestra se compone básicamente de dos etapas que continuación son explicadas:

La primera etapa de la preparación de la muestra consistió en: secado, tamizado y pulverizado. Para el secado de la muestra se utilizó una estufa a 35°C, para posteriormente ser disgregada a mano y tamizada a <2mm. Cada muestra fue homogenizada, cuarteada,

separada e identificada en dos porciones representativas (250 g), una para el análisis elemental y la otra para ser almacenada. La muestra correspondiente al análisis elemental fue colocada en embalaje y enviada a Laboratorio Certificado ACTLABS ([Fotografía 8](#)).



Fotografía 8. La fotografía (a) muestra el cuarteo realizado en la preparación de la muestras en el laboratorio. La fotografía (b) se observan el empaque de las muestras para su envío al laboratorio ACTLABS. La fotografía (c) corresponde a las muestras duplicadas.

Durante esta etapa como parte de la preparación de la muestra, el control de calidad consistió en la limpieza y lavado del material utilizado entre muestra y muestra (espátulas, cucharones, charolas y tamiz).

Digestion de la muestras.

La selección del método de digestión dependerá del objetivo de estudio y el uso final que se les quiera dar a los resultados obtenidos.

Como se mencionó anteriormente en las propuestas internacionales de cartografía geoquímica establecen que el procedimiento de extracción recomendado es la digestión total, ya que permite obtener resultados de mayor reproducibilidad y con valor permanente (Darnley et. al., 2008). Par este estudio considerado dentro de la escala regional y pretende establecer las líneas base y valores de fondo en el área de estudio, con propósitos principalmente ambientales, se empleo el tipo de digestión total recuperable.

Digestión total-recuperable (o parcial): Es una extracción que usa convencionalmente HNO_3 concentrado o una mezcla de HCl y HNO_3 concentrados (agua regia), pero que no está diseñada para destruir la totalidad de la matriz sólida, por lo que las concentraciones obtenidas pueden no reflejar el contenido total de los elementos en la muestra (EPA, 1998). Esta técnica da origen a las llamadas “líneas base ambientales”, ya que a diferencia de la digestión total representa únicamente las concentraciones geodisponibles al ambiente bajo condiciones extremas (Tarvainen y Kallio, 2002). El resto

de los elementos no extraídos por este proceso de digestión (llamados fase residual, principalmente asociados a silicatos y sulfuros primarios) no son considerados como una amenaza ambiental, a pesar de estar presentes en la matriz, debido a que se liberan muy lentamente al medio. A menos que sea posible validar la extracción total de un elemento, solo se pueden obtener valores de fondo aproximados con esta técnica.

Procedimiento (digestión parcial): Se toman 0.50 gramos de la muestra pulverizada y perfectamente homogeneizada. Se le agrega agua regia (ácidos nítrico y clorhídrico) y se calienta por 45 minutos en bloque de grafito. Se deja enfriar y se diluye con agua desionizada a un volumen de 12.5 ml, se mezcla y se analiza por espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES, sus siglas en inglés), para elementos mayores y algunos otros (ver [Tabla 3](#)). Se revisan los resultados para identificar altas concentraciones de Bi, Mo, Ag y W, y en su caso diluir. Posteriormente se analiza por espectrometría de masas acoplado inductivamente (ICP-MS, sus siglas en inglés) para el resto de los elementos.

Tabla 3. Método de análisis para cada elemento utilizando el procedimiento de digestión total (MS, espectrometría de masas. ICP, Plasma acoplado inductivamente. AR, Agua Regia)

| Elemento | Técnica | Elemento | Técnica | Elemento | Técnica | Elemento | Técnica |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Al | ICP-MS | Cd | ICP-MS | Li | ICP-MS | Sr | ICP-MS |
| Ca | ICP-MS | Ce | ICP-MS | Lu | ICP-MS | Ta | ICP-MS |
| Fe | ICP-MS | Co | ICP-MS | Mn | ICP-MS | Tb | ICP-MS |
| K | ICP-MS | Cr | ICP-MS | Mo | ICP-MS | Te | ICP-MS |
| Mg | ICP-MS | Cs | ICP-MS | Nb | ICP-MS | Th | ICP-MS |
| Na | ICP-MS | Cu | ICP-MS | Nd | ICP-MS | Tl | ICP-MS |
| P | ICP-AES | Dy | ICP-MS | Ni | ICP-MS | Tm | ICP-MS |
| S | ICP-AES | Er | ICP-MS | Pb | ICP-MS | U | ICP-MS |
| Ti | ICP-AES | Eu | ICP-MS | Pr | ICP-MS | V | ICP-MS |
| Ag | ICP-MS | Ga | ICP-MS | Rb | ICP-MS | W | ICP-MS |
| As | ICP-MS | Gd | ICP-MS | Re | ICP-MS | Y | ICP-MS |
| Au | ICP-MS | Ge | ICP-MS | Sb | ICP-MS | Yb | ICP-MS |
| B | ICP-MS | Hf | ICP-MS | Sc | ICP-MS | Zn | ICP-MS |
| Ba | ICP-MS | Ho | ICP-MS | Se | ICP-MS | Zr | ICP-MS |
| Be | ICP-MS | In | ICP-MS | Sm | ICP-MS | | |
| Bi | ICP-MS | La | ICP-MS | Sn | ICP-MS | | |

b. Analisis Quimicos

Una de las etapas para la elaboración de la Cartografía geoquímica es el análisis químico de las muestras, casi todos los estudios realizados acerca de este tema (Chiprés *et al.*, y Hernández *et al.*, 2008), mencionan la relevancia de esta etapa ya que es un eslabón delicado dentro de la cadena de trabajo práctico en los proyectos geoquímicos. De esta

manera y de acuerdo al Foro Europeo de Servicios Geológicos (FORESGS), los cuatro requisitos principales son (Salminen *et al.*, 2005).

1. *Los métodos analíticos deben de ser suficientemente sensibles para determinar la detección de un amplio rango de elementos hasta el nivel de fondo.*
2. *La precisión analítica debe de ser buena e incluso significativamente mejor que la variación geoquímica natural.*
3. *La exactitud geoquímica debe ser buena y dentro de los estándares establecidos*
4. *Todos los datos y registros correspondientes al análisis deben estar bien documentados y ser rastreables dentro del proceso.*

Punto 1: Tal como lo describe Chiprés *et al.*, (2008), se dio seguimiento a la metodología propuesta. Las metodologías analíticas utilizadas en este trabajo y además que mejor se ajustan para cumplir con el primer punto son la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), ambos son dos de los métodos más recomendados y usados para para proyectos de cartografía geoquímica (Darnley *et al.*, 1995; Smith *et al.*, 2005; Salminen *et al.*, 2006; Chiprés *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2008).

Algunas de las ventajas que presentan estos métodos analíticos es la eficiencia en determinaciones multielementales, así mismo la extrema sensibilidad con la que trabajan especialmente el ICP-MS, permite la determinación de elementos de baja abundancia natural al tener límites de detección por debajo de muchos valores de fondo, de manera que estos pueden ser estimados con mayor certeza (Chiprés *et al.*, 2008).

Las metodologías analíticas utilizadas en este trabajo son ICP-MS y ICP-AES, siendo dos de los métodos recomendados y útiles para los proyectos de Cartografía Geoquímica.

El análisis químico se realizó en el laboratorio comercial ACTLABS de Ontario, Canadá. En total para el presente estudio se analizaron 62 elementos, varios de los cuales son de interés ambiental o de salud (ej. As, Pb, Co, etc.), mientras que otros también son de interés agrícola (Ca, P, Na, Fe, etc.), y aquellos que podrían ser un campo emergente en los estudios ambientales y de la salud (ej. Tierras raras). En la [Figura 17](#), se presentan todos los elementos seleccionados para el proyecto Mapeo Geoquímico Ambiental. Es de importancia

que este tipo de proyecto presente los límites de detección de los elementos analizados (Tabla 4). Elementos químicos reportados a bajo del límite de detección son 8; Au, Ge, Nb, Ta, Te Ti, W y Re.

Tabla 3. Límites de detección por ICP-MS e ICP-AES, en mg/kg para los elementos analizados en este estudio.

| Elemento | LDD | Elemento | LDD | Elemento | LDD | Elemento | LDD |
|----------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|--------|
| Ag | 0.002 | Er | *0.1 | Na | *0.001% | Ta | *0.05 |
| Al | *0.01% | Eu | *0.1 | Nb | *0.1 | Tb | *0.1 |
| As | *0.1 | Fe | *0.01% | Nd | *0.02 | Te | 0.02 |
| Au | *0.5 ppb | Ga | *0.02 | Ni | *0.1 | Th | *0.1 |
| B | *1 | Gd | *0.1 | P | *0.001% | Tl | *0.02 |
| Ba | *0.5 | Ge | *0.1 | Pb | *0.01 | Ti | *0.01% |
| Be | *0.1 | Hf | *0.1 | Pr | *0.1 | Tm | *0.1 |
| Bi | 0.02 | Ho | *0.1 | Rb | *0.1 | U | *0.1 |
| Ca | *0.01% | In | *0.02 | Re | 0.001 | V | *1 |
| Cd | 0.01 | K | *0.01% | S | +0.001% | W | *0.1 |
| Ce | *0.01 | La | *0.5 | Sb | *0.02 | Y | *0.01 |
| Co | *0.1 | Li | *0.1 | Sc | *0.1 | Yb | *0.1 |
| Cr | *0.5 | Lu | *0.1 | Se | *0.1 | Zn | *0.1 |
| Cs | *0.02 | Mg | *0.01% | Sm | *0.1 | Zr | *0.1 |
| Cu | 0.01 | Mn | *1 | Sn | *0.05 | | |
| Dy | *0.1 | Mo | *0.01 | Sr | *0.5 | | |

Punto 2 y 3: Para la etapa del análisis el control de calidad fueron empleado los estándares Internacionales de referencia certificados GXR-1, GXR-2, GXR-4 y la 6-GXR (materiales de USGS), analizándose al comienzo y final de cada lote de muestras. Como normas de control interno del laboratorio se analizan todas las muestras en lote de 10 y un duplicado se ejecuta por cada 10 muestras. Se estableció para la selección del lote de muestras un criterio de selección aleatorio, las cuales fueron manejadas como muestras independientes e identificables, estimándose el coeficiente de variación del conjunto de muestras. **La precisión** para el análisis específico de los estándares se evaluó mediante el coeficiente de variación (conocido como desviación estándar relativa), empleando un criterio de CV < 20% (Chen, 1997).

Los valores obtenidos de **Exactitud** del lote de muestras fueron aceptables, solo para los siguientes elementos se presentaron valores por arriba del 20 %; K, Na, Ag, B, Ge, Sb, Te y U (Tabla 5).

Tabla 4. Coeficiente de variación del conjunto de muestras utilizadas en el análisis químico de laboratorio. El criterio de aceptación para la precisión se estableció en <20 %

| CV | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Al | Ca | Fe | K | Mg | Na | P | S | Ag | As |
| 3.91284 | 4.04061 | 4.2855 | 47.14045 | 4.56198 | 28.2843 | 3.4493 | 4.04061 | 25.5431 | 5.656854 |
| B | Ba | Be | Bi | Cd | Ce | Co | Cr | Cs | Cu |
| 28.2843 | 3.0878 | 10.3479 | 6.148755 | 15.23 | 4.84478 | 3.41597 | 4.29514 | 10.781 | 3.738009 |
| Dy | Er | Eu | Ga | Gd | Ge | Hf | Ho | In | La |
| 4.76907 | 3.65745 | 8.83883 | 3.928371 | 5.72225 | 28.2843 | 14.1421 | 6.14875 | 10.8786 | 3.659702 |
| Li | Lu | Mn | Mo | Nb | Nd | Ni | Pb | Pr | Rb |
| 5.61196 | 12.8565 | 4.72665 | 11.52322 | 28.2843 | 3.94402 | 4.62834 | 3.09271 | 4.59757 | 5.004425 |
| Sb | Sc | Se | Sm | Sn | Sr | Tb | Te | Th | Tl |
| 70.7107 | 3.53553 | 12.8565 | 5.237828 | 13.7826 | 5.00607 | 5.65685 | 60.6092 | 4.02528 | 4.465938 |
| Tm | U | V | Y | Yb | Zn | Zr | | | |
| 15.7135 | 28.2843 | 6.84297 | 4.399776 | 4.8766 | 7.36646 | 11.9913 | | | |

Punto 4: Para poder dar cumplimiento a este punto, toda la información recopilada tanto en campo, reportes de laboratorio (concentraciones de análisis químicos), se encuentran capturados en base de datos tipo Excel.

| IA | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----|------|-----|----|-----|-------|--------|----|----|----|-----|------|----|----|-----|------|----|----|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| IIA | | | | | | | | | | | | IIIA | IV | VA | VIA | VIIA | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | | P | S | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | Ca | IIIB | IVB | VB | VIB | VII B | VIII B | | | IB | IIB | IIIA | IV | VA | VIA | VIIA | | | | | | | | | | | | | | |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | | | | | | Ag | Cd | In | Sn | Sb | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | | | | | | | Ti | Pb | Bi | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Ce | Pr | Nd | | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Th | | U | | | | | | | | | | | | |

Figura 17. Elementos seleccionados para el proyecto de mapeo geoquímico-ambiental en suelos de los valles centrales de estado de Campeche. En azul, elementos considerados esenciales para una gran diversidad de organismos. En rojo, elementos considerados tóxicos para muchos organismos, aún en bajas concentraciones. En verde, elementos correspondientes al grupo de Tierras Raras y en amarillo son elementos que también fueron analizados para este estudio.

III.2.1. Prueba de Movilidad.

La Movilidad se puede definir como la migración o inestabilidad que presentan los elementos debido a la alteración de fases estables del suelo o al equilibrio entre la fase solididad y la solución del suelo. Es fundamental conocer la especiación química de los elementos presentes en los suelos a estudiar, así como la fracción mineralógica a la que se encuentren asociados ya que en base a estas depende su movilidad en los diferentes horizontes que integran el perfil del suelo.

Los metales en forma de precipitados pueden llegar a ser móviles por disolución acida de la fase en la que se encuentren asociados, cada uno de los compartimientos del suelos y los proceso descritos anteriormente influyen en la movilidad de los elementos químicos en el suelos hacia la fase fluida.

La toxicidad de los elementos químicos en los organismos, incluyendo los Elementos Normados (EN), depende de su disponibilidad en el ambiente, la cual principalmente está en función de la solubilidad de la especie química de estos elementos. Por esta razón actualmente se busca medir la fracción extraíble de los elementos bajo condiciones ambientales, la cual además, está directamente relacionada con la fracción biodisponible que es la reactiva dentro de los organismos vivos.

Es posible analizar la Movilidad de los elementos químicos presentes en el suelo a partir de protocolos de extracción por ejemplo extracción secuencial selectiva y/o extracción con simulación de agua meteórica (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Apéndice Normativo B: Métodos Analíticos), ambos consisten en la lixiviación de los elementos químicos bajo condiciones controladas y para el propósito de este estudio se aplicó extracción con simulación de agua meteórica.

Extracción de solubles con agua en equilibrio con CO₂.

Este método permite obtener rápidamente un extracto acuoso para estimar la disponibilidad de EN presentes en los suelos, bajo las condiciones de laboratorio especificadas. No pretende simular el tipo de lixiviado que se produce bajo condiciones específicas de campo. Sin embargo si busca simular las condiciones de extracción, cuando la composición de los componentes de los suelos es el factor que determina el pH del extracto.

El criterio de selección de muestras para la aplicación de las pruebas de movilidad es el siguiente; i).muestras que correspondan a perfiles, para evaluar la movilidad vertical entre horizontes, ii). Uso de suelos en al área de estudio, iii). Distribución espacial basada en 4 zonas a lo largo y ancho de área de estudio (Tabla 6).

Tabla 5. Listado de muestras utilizadas para la prueba de movilidad y resultados de pH (durante la prueba).

| No | Id. Muestra | Tipo Suelo | Uso de Suelo | Zona | pH | | |
|----|-------------|------------|--------------|----------------------------|------------|--------|------|
| | | | | | HA-HC1 | HC-HC2 | |
| 1 | 4.Ca2D | Gleysol | Natural | Norte | 5.70 | 6.11 | |
| 2 | 8.Ca2H | Pheozem | Agrícola | | 6.78 | 6.90 | |
| 3 | 19A.Ca2D | Phozem | Agrícola | | 7.21 | 7.16 | |
| 4 | 20A-Ca5F | Gleysol | Agrícola | | 6.13 | 5.74 | |
| 5 | 26.Ca8D | Vertisol | Agrícola | | 6.70 | 5.81 | |
| 6 | 29.Ca8G | Vertisol | Natural | | 6.36 | 6.78 | |
| 7 | 34.Ca10D | Vertisol | Ganadería | Centro- Valle Edzná | 6.83 | 6.87 | |
| 8 | 36.Ca10F | Vertisol | Agrícola | | 6.09 | 5.55 | |
| 9 | 37.Ca10H | Vertisol | Ganadería | | 7.12 | 7.36 | |
| 10 | 40.Ca11G | Vertisol | Agrícola | | 6.69 | 7.45 | |
| 11 | 43-Ca12D | Gleysol | Agrícola | | 7.16 | 6.68 | |
| 12 | 56.Ca14G | Vertisol | Natural | | 6.79 | 6.96 | |
| 13 | 60.Ca15B | Vertisol | Agrícola | Centro - Valle de Yohaltún | 8.15 | 7.87 | |
| 14 | 61.Ca15D | Vertisol | Agrícola | | 6.39 | 6.67 | |
| 15 | 65.Ca16D | Vertisol | Natural | | 8.51 | 9.22 | |
| 16 | 67.Ca16G | Vertisol | Ganadería | | 7.80 | 8.97 | |
| 17 | 70.Ca17F | Vertisol | Ganadería | | 7.88 | 8.96 | |
| 18 | 71.Ca17G | Pheozem | Natural | | 8.48 | 8.88 | |
| 19 | 82.Ca19F | Vertisol | Ganadería | | 7.95 | 8.09 | |
| 20 | 88.Ca20G | Vertisol | Ganadería | | 8.15 | 8.65 | |
| 21 | 95.Ca21F | Vertisol | Ganadería | | 7.53 | 7.29 | |
| 22 | 142.Ca29F | Vertisol | Ganadería | | Sur - Esc. | 8.45 | 9.21 |
| 23 | 146.Ca30D | Vertisol | Natural | | | 6.84 | 6.77 |
| 24 | 149.Ca30I | Vertisol | Agrícola | 8.39 | | 8.18 | |

Preparación de muestras: La etapa de preparación de las muestras, inicia desde la identificación de la muestra en cada etapa del proceso y continua con en el secado de cada una a temperatura constante 40 °C (en un horno eléctrico), durante un máximo de 24 hrs., al estar totalmente seca la muestra se disgrega en forma manual, desbaratando los terrones que se lleguen a formar.

Se homogeniza, cuartea y pasa por la malla No 10 (2mm), y así para posteriormente pesarse en balanza analítica por duplicado la cantidad de 25 g.

La muestra es colocada en bolsa de plástico identificada y completamente cerrada, para ser enviada al Laboratorio.

Prueba: Extracción de solubles con agua en equilibrio con CO₂ (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). Este método está basado en la prueba ASTM D 3987-85, modificando las características del agua de extracción. Este es un procedimiento para lixiviar suelos con agua en equilibrio con CO₂ atmosférico (H₂O-CO₂) a pH=5.5 y obtener una solución acuosa para analizar los compuestos lixiviados.

Este método describe la forma de preparar la solución extractante H₂O-CO₂, la obtención del extracto agitando un peso conocido de suelos con H₂O-CO₂ y la forma de separar la fase sólida de la acuosa para realizar los análisis de los Elementos Normados (EN). A través de la obtención de un extracto acuoso para estimar la disponibilidad de EN presentes en los suelos, bajo las condiciones de laboratorio. Se simulan las condiciones de extracción, cuando la composición de los componentes de los suelos es el factor que determina el pH del extracto. La extracción acuosa refleja la capacidad amortiguadora de los suelos, ya que el pH final del extracto acuoso es el resultado de la interacción del extractante con los componentes de los suelos que producen reacciones ácidas o básicas.

El material utilizado debe de cumplir con las siguientes condiciones; no reaccionar con los suelos, Minimizar la adsorción de los iones presentes en el extracto y ser adecuados para realizar la cuantificación de EN.

- Unidades de filtración de acero inoxidable de fondo plano y poroso del mismo material con membranas de 0.45 mm. Se pueden utilizar jeringas de ultra filtración comerciales. Lavar los filtros con ácido antes de usar, enjuagar con ácido nítrico 0,5 M seguido por tres enjuagues consecutivos con agua.
- Frascos de agitación de vidrio borosilicato o de politetrafluoroetileno (PTFE) de boca ancha. Con capacidad de 1 lt. , para muestras con un contenido de sólidos de 140 g y de 2 L para muestras con un contenido de sólidos de 70 g. Para muestras más grandes utilizar múltiplos de estas medidas, para asegurar que, la muestra sólida más el extractante ocupen entre el 80 y 90% de la capacidad del recipiente.

El lavado de los recipientes es con ácido antes de usar, enjuagar con ácido nítrico 0,5 M seguido por tres enjuagues consecutivos con agua. Este lavado no aplica para aquellos

casos en que esta operación afecte al método de cuantificación seleccionado o requiera otro tipo de lavado. Los recipientes deben cerrar herméticamente.

Procedimiento:

Pesar o tarar el recipiente que se va a utilizar para lixiviar y agitar la muestra. Colocar 70 g de muestra en el recipiente, o un múltiplo de esta cantidad y registrar el peso utilizado.

Preparar la solución extractante (agua-CO₂ a pH = 5.5 ± 0.2):

- a) Calcular el volumen de agua destilada necesaria para llevar a cabo el total de las extracciones considerando duplicados y un 25% de exceso.
- b) Burbujear aire en el agua destilada hasta alcanzar un pH de 5.5 ± 0.2. En caso de que burbujear aire no se logre alcanzar fácilmente el pH de 5.5 ± 0.2, se pueden adicionar pequeños volúmenes de una solución de HCl 0.01 N. La solución extractante se debe utilizar lo más pronto posible. Si el pH es < 5.5 no se requiere ajustarlo. Registrar el valor del pH.

Añadir solución extractante a la muestra de suelos, hasta que alcance una relación equivalente en ml de solución a 20 veces el peso en gramos del peso de la muestra. Por ejemplo, para 70 g de muestra se requieren 1,400 mL de solución.

Colocar los recipientes en el equipo de agitación rotatorio, iniciar la agitación continua por 18 ± 0,25 horas a temperatura ambiente. Los frascos del agitador deben tener suficiente capacidad para contener la muestra y el reactivo de extracción. La velocidad de agitación debe ser de 29 ± 2 rpm.

Terminado el periodo de agitación, abrir el recipiente y registrar cualquier cambio que se observe en la fracción sólida o en el sobrenadante. Dejar reposar la muestra durante 5 minutos. Después de este periodo, y separar la fase acuosa de los sólidos más pesados por decantación o centrifugación. Después, filtrar la mezcla al vacío o presión utilizando una membrana de 0,45 mm. Si la velocidad de filtrado fuera muy lenta, se puede utilizar un filtro menos cerrado, pero este cambio debe reportarse en el informe y se debe tomar en cuenta cuando se realice la cuantificación de EN.

Medir el pH del extracto colectado y registrar el valor. Preparar inmediatamente las soluciones para el análisis de cuantificación de los EN. Los extractos ya preparados, se

pueden preservar por un período máximo de 14 días en refrigeración a 4°C. Sin embargo, se recomienda realizar la cuantificación de EN lo más rápidamente posible por espectroscopia de absorción atómica.

Acidificar las alícuotas para metales con ácido nítrico, hasta un pH menor a 2, excepto cuando el método de cuantificación no lo recomiende o se sospeche que pueda causar la pérdida de algún constituyente. Antes de proceder con la acidificación agregar unas gotas de ácido nítrico a una pequeña porción del extracto, y si se observa cualquier indicio de precipitación, no acidificar el resto del extracto, registrar cualquier alteración observada. En este caso es necesario llevar a cabo inmediatamente la cuantificación de EN por espectroscopia de absorción atómica.

Control de calidad. Anotar todos los datos en registros y formatos adecuados, y tenerlos siempre disponibles para su consulta e inspección. Realizar por lo menos un ensayo en blanco por cada 10 extracciones o por lote si éste es menor de 10, cuidando de aplicar las mismas condiciones que en las muestras de suelos. Por no existir materiales estándar de referencia, no es posible medir la exactitud del método, por lo que deben llevarse a cabo un 20% de duplicados del total de muestras, con un mínimo de dos.

pH: El parámetro de pH obtenido durante la pruebas de movilidad, aportan una idea del efecto de esta importante variable en la movilidad de los elementos químicos, debido a que la variación del pH modifica el grado de solubilidad de los minerales, por consiguiente actúa como control geoquímico en los suelos presentes en el área de estudio, se realiza un análisis de los resultados obtenidos de pH al realizar la prueba de Movilidad. Esto se hace en base a dividir el área de estudio en 4 zonas; zona Norte, zona centro-valle Edzná, zona centro valle Yohaltún y zona Sur Escárcega. (Tabla 7).

Tabla 6. Criterio para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH

| Clasificación pH | |
|-----------------------|-----------|
| Fuertemente ácido | < 5.0 |
| Moderadamente ácido | 5.1 - 6.5 |
| Neutro | 6.6 - 7.3 |
| Medianamente alcalino | 7.4 - 8.5 |
| Fuertemente alcalino | > 8.5 |

Referencia: NOM-021-SEMARNAT-2000 / NOM-021-RECNAT-2000

Los valores de pH evidencian una tendencia ascendente (Figura 18) que van de 5.70 a 8.5 con un promedio de **7.25** en el Horizonte Superior (HA-HC₁), y de 5.55 a 9.22 con un promedio de **7.42** en el horizonte Inferior (HC-HC₂), (Tabla 8). En general el área de estudio se puede definir que el horizonte Superior (HA-HC₂) (más cercano a la superficie) está en el rango de **Neutro**, y el Horizonte Inferior (HC-HC₂) (más cercano en relación a la roca madre) está en el rango **medianamente alcalino**.

Tabla 7. Tabla de la estadística descriptiva de los resultados de los valores de pH, por Zona y Horizonte en muestras de Perfiles

| Zona | pH | | | | | | | |
|-----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Promedio | | Max | | Min | | D.E. | |
| | HA-HC1 | HC-HC2 | HA-HC1 | HC-HC2 | HA-HC1 | HC-HC2 | HA-HC1 | HC-HC2 |
| Area de Estudio | 7.25 | 7.42 | 8.51 | 9.22 | 5.70 | 5.55 | 0.851 | 1.134 |
| Norte | 6.48 | 6.42 | 7.21 | 7.16 | 5.70 | 5.74 | 0.532 | 0.609 |
| Centro-Valle Edzná | 6.78 | 6.81 | 7.16 | 7.45 | 6.09 | 5.55 | 0.387 | 0.683 |
| Centro-Valle Yohaltún | 7.87 | 8.29 | 8.51 | 9.22 | 6.39 | 6.665 | 0.637 | 0.874 |
| Sur-Escarcega | 7.89 | 8.05 | 8.45 | 9.21 | 6.84 | 6.77 | 0.914 | 1.223 |

Nomenclatura: HA-HC₁ Horizontes A y/o C₁ (horizontes que anteceden al Horizonte Superficial equivalentes en su posición vertical), HC-HC₂ Horizontes C y/o C₂ (horizontes sobreyace a la roca madre o equivalentes en su posición vertical). Max.: Máximo, Min.: Mínimo, D.E.: Desviación estándar.

Al analizar los datos de pH por zonas (promedios), se puede establecer las siguientes características: La zona Norte queda en el rango de moderadamente acida en ambos horizontes (6.48 en HA-HC₁ y 6.42 en HC-HC₂), la zona centro Valle Edzná queda en el rango neutro en ambos horizontes (6.78 en HA-HC₁ y 6.81 en HC-HC₂), la zona centro valle Yohaltún queda en el rango medianamente alcalino en ambos horizontes (7.87 en HA-HC₁ y 8.29 en HC-HC₂) y la zona Sur-Escarcega queda en el rango medianamente alcalino en ambos horizontes (7.89 en HA-HC₁ y 8.05 en HC-HC₂).

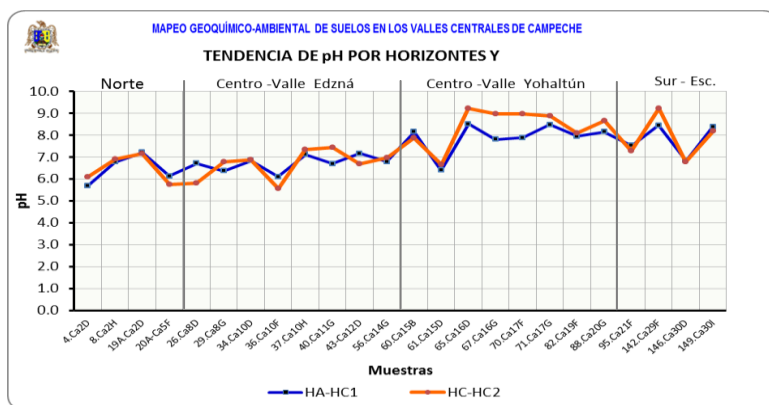


Figura 18. Tendencia de valores de pH por horizontes (HA-HC₁ y HC-HC₂) y zonas del área de estudio.

FRACCION MOVIL.

La movilidad de los elementos químicos en el área de estudio, se abordan a partir de la división en cuatro zonas; zona Norte, zona centro-valle Edzná, zona centro-valle Yohaltún y zona Sur-Escárcega. Muestras de suelos que corresponden únicamente a perfiles horizonte superior (HA ó HC1) y horizonte inferior (HB, HC ó HC2). Los elementos que se dejaron fuera de este análisis son Ca y P (Ca por falta de estándar y P por presentar valores abajo del límite de detección en la fracción móvil).

Los porcentajes más altas de movilidad, se presentan principalmente en Zn, Se y Cd en ambos horizontes (superior e inferior) y el elemento con menor movilidad es La, excepto en el horizonte inferior (Sur Escárcega) donde es Cd.

Zona Norte en la [Tabla 9](#), se presenta los resultados de la fracción móvil (%), de las muestras ; 4-Ca2D (suelo Gleysol de área natural, localidad de Bethania, Mpio. de Campeche), 8-Ca2H y 19A-Ca2D (suelo Pheozem de uso agrícola, localidad de San Pedro Comilchi y Nohakal, Mpio. de Campeche respectivamente), 20A-Ca5F (suelo Gleysol de uso agrícola, localidad de Yaxcabacal, Mpio. de Campeche). Se puede observar que los rangos en porcentaje de movilidad en el **horizonte superior** son; Zn de 1.14 a 32.48 % y Cd de 0.39 a 2.78 % y siendo La de más baja movilidad 0.00 a 0.36 %. En el **horizonte inferior** son: Zn de 2.96 a 8.59 % y Cd 0.94 a 1.17 % y La de más baja movilidad 0.00 a 0.19 % (43.553 a 98.349 mg/kg).

Zona Centro-Valle Edzná en la [Tabla 9](#), se presentan los resultados de la fracción móvil (%), de las muestras; 34-Ca10D (suelo Vertisol de uso ganadería, localidad Adolfo Ruiz Cortines, Mpio. de Campeche), 36-Ca10F (suelo Vertisol de uso agrícola, localidad de Alfredo M. Bonfil, Mpio de Campeche), 37-Ca10H (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Alfredo M. Bonfil, Mpio de Campeche), 40-Ca11G (suelo Vertisol de uso agrícola, localidad Bolonchen Cahuich, Mpio. de Campeche), 43-Ca12D (suelo Gleysol de uso agrícola, localidad de Santa Cruz de Rovira, Mpio de Champotón), 56-Ca14G (suelo Vertisol en área natural, localidad de Melchor Ocampo, Mpio de Campeche). Se puede observar que los rangos en porcentaje de movilidad en el **horizonte superior** son; Se de 0.22 a 1.57 % y Zn de 6.68 a 1.26, y es el La de más baja movilidad 0.05 a 0.37 %. En el **horizonte inferior** son: Se 0.0 a 1.87% y Zn de 0.92 a 37.12 % y es el La con la más baja movilidad 0.01 a 0.24 %

Zona Centro-Valle Yohaltún en la [Tabla 9](#), se presentan los resultados de la Fracción móvil (%), de las muestras; 60-Ca15B (suelo Vertisol de uso agrícola, localidad

San Juan Carpizo, Mpio. de Champotón), 61-Ca15D (suelo Vertisol de uso Agrícola, Cnel. Ortiz Avila, Mpio de Champotón), 65-Ca16D (suelo Vertisol en área natural, localidad de Cnel. Ortiz Avila, Mpio de Champotón), 67-Ca16G (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Nayarit de Castellot, Mpio. de Champotón), 70-Ca17F (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Yohaltún , Mpio de Champotón), 71-Ca17G (suelo Pheozem en área natural, localidad de Nayarit de Castellot, Mpio. de Champotón), 82-Ca19F (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Yohaltún, Mpio de Champotón), 88-Ca20G (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Yohaltún, Mpio de Champotón), 95-Ca21F (suelo Vertisol de uso en ganadería, localidad de Yohaltún, Mpio de Champotón). Se puede observar que los rangos en porcentaje de movilidad en el **horizonte superior** son; Se de 0.00 a 7.45 % y Zn de 1.06 a 27.80 %, y es el La de más baja movilidad 0.0 a 0.60 %. En el **horizonte inferior** son: Se 0.00 a 7.11 % y Zn de 1.06 a 9.19 % y es el La con la más baja movilidad 0.00 a 0.71 %

Zona Sur-Escárcega en la [Tabla 9](#), se presentan los resultados de la fracción móvil (%), de las muestras; Se puede observar que los rangos en porcentaje de movilidad en el **horizonte Superior** son; Se de 2.00 a 4.21 % y Zn de 1.59 a 3.39 %, y es el La de más baja movilidad 0.01 a 0.41 %. En el **horizonte inferior** son: Se de 1.64 a 3.44 % y Zn de 3.12 a 5.60 % y es el Cd con la más baja movilidad 0.18 a 0.87 %.

Tabla 8. Porcentajes de la fracción móvil de los elementos relevantes del área de estudio

| Zonas | Est. (a) | Horizonte Superior (%) | | | | | | Horizonte Inferior (%) | | | | | |
|-----------------------|----------|------------------------|------|------|------|-------|------|------------------------|------|------|------|-------|------|
| | | Cd | Cu | Pb | Se | Zn | La | Cd | Cu | Pb | Se | Zn | La |
| Norte | M (b) | 1.44 | 0.49 | 0.21 | 1.02 | 9.13 | 0.14 | 1.17 | 0.87 | 0.17 | 0.63 | 2.96 | 0.11 |
| | Min. (c) | 0.39 | 0.20 | 0.12 | 0.00 | 1.14 | 0.00 | 0.94 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.98 | 0.00 |
| | Max. (d) | 2.78 | 1.29 | 0.45 | 3.11 | 32.48 | 0.36 | 1.61 | 1.75 | 0.20 | 1.32 | 8.59 | 0.19 |
| Centro Valle Edzná | M (b) | 1.36 | 0.84 | 0.48 | 1.57 | 2.62 | 0.17 | 1.46 | 0.85 | 0.31 | 1.87 | 10.31 | 0.24 |
| | Min. (c) | 0.51 | 0.51 | 0.12 | 0.22 | 1.26 | 0.05 | 0.43 | 0.35 | 0.10 | 0.00 | 0.92 | 0.01 |
| | Max. (d) | 2.43 | 1.14 | 1.01 | 3.00 | 6.68 | 0.37 | 2.94 | 1.61 | 0.71 | 5.20 | 37.12 | 0.67 |
| Centro Valle Yohaltún | M (b) | 1.16 | 0.52 | 0.67 | 2.61 | 8.17 | 0.16 | 1.55 | 0.61 | 0.78 | 3.04 | 2.59 | 0.14 |
| | Min. (c) | 0.14 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 1.06 | 0.00 | 0.14 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 1.06 | 0.00 |
| | Max. (d) | 4.12 | 0.97 | 2.70 | 7.45 | 27.80 | 0.60 | 6.43 | 1.37 | 2.85 | 7.11 | 9.19 | 0.71 |
| Sur Escárcega | M (b) | 0.37 | 0.27 | 0.31 | 2.98 | 2.19 | 0.15 | 0.43 | 0.97 | 1.38 | 2.65 | 3.99 | 1.10 |
| | Min. (c) | 0.24 | 0.11 | 0.22 | 2.00 | 1.59 | 0.01 | 0.18 | 0.20 | 0.11 | 1.64 | 3.12 | 0.02 |
| | Max. (d) | 0.49 | 0.41 | 0.38 | 4.21 | 3.39 | 0.41 | 0.87 | 2.10 | 3.61 | 3.44 | 5.60 | 3.14 |

(a). Estadísticos, (b). Media, (c) Min: mínimo, (d): Max: Máximo

II.2.2. Caracterización mineralógica.

En este apartado se describe las fases minerales presentes en los suelos en el área de estudio, realizado a través de la técnica de Difracción de rayos X

Cada material cristalino produce un patrón de difracción único que depende de la estructura atómica. Podemos pensar que el patrón de difracción es como una huella dactilar del mismo. Dado que existe una relación biunívoca entre cada sustancia y su patrón de difracción, dicha técnica permite la identificación de sustancias cristalinas por comparación con patrones conocidos. Si tomamos en cuenta que el 95% de las sustancias sólidas son cristalinas, nos damos cuenta que el campo de aplicación de la difracción de rayos X es inmenso.

La difracción de rayos X presenta una infinidad de aplicaciones en los campos de la geología, ciencia de materiales, estudios medioambientales, química, medicina forense, industria farmacéutica... etc. Muchos tipos de materiales nanos o criptocristalinos pueden caracterizarse a partir de la difracción de rayos X como por ejemplo: productos orgánicos, inorgánicos, drogas, minerales, catalizadores, metales y cerámicas. La cantidad de información disponible dependerá en buena medida de la microestructura de la muestra (cristalinidad, imperfecciones cristalinas, tamaño de los cristales, textura); la complejidad de la estructura de los cristales (número de átomos de la celda unidad, volumen de la celda unidad) y la calidad de los datos experimentales (aspectos instrumentales, datos estadísticos).

MÉTODO

Lo primero que hay que hacer, en cualquier caso, con la muestra es secarla, esto se hace en una estufa a 35 a 40°C durante un mínimo de 24 horas. La proporción de muestra que se debe secar dependerá del propósito del análisis, en este caso se pesan 100 g. Pueden ser una cantidad suficiente para un estudio completo.

Una vez seca la muestra hay que proceder a una disgregación o molienda de la misma que permitirá su posterior estudio. Dependerá del tipo de muestra que tengamos, de si se encuentra suelta o cementada, y del tamaño de grano, pues hay que evitar triturar los granos con objeto de no falsear el tamaño de grano de los filosilicatos.

Para ello una vez molida la muestra se procede a un cuarteo, tras el cual se separa una porción de muestra de aproximadamente 2 o 3 gramos que se destina al estudio de la composición global (Polvo). Esta porción se muele hasta un tamaño de unas 400 micras.

La muestra homogénea y pulverizada fue colocada en un porta-muestras de aluminio, haciendo pasar un haz de radiación a través de ella, produciendo un espectro de difracción el cual fue comparado con patrones de difracción de estándares de fases minerales y obteniendo de esta forma las fases predominantes en las muestras.

Se emplea un difractómetro Rigaku DMAX 2200 con una radiación $K\alpha$ de Cu de 2 a 85° con intervalos de 0.02 segundos durante 5 min y una velocidad de barrido de 8.5 scan.min⁻¹. La calibración del equipo se llevó a cabo con el estándar de referencia SRM 1976 (XRD Flat-Plat Intensity).

Caracterización por difracción de rayos X (DRX)

Los suelos analizados por esta técnica representan difractogramas típicos de los suelos existentes en el área de estudio; Gleysol, Pheozem, Vertisol. Incluyendo una muestra de cristales encontrados en los suelos en la localizada de Ortiz Ávila (M-3), perteneciente al Valle de Yohaltún. ([Tabla 10](#))

En base a la descripción y características edafológicas del sitio (grupo de suelos), Se seleccionaron las siguientes muestras en base al siguiente criterio: i). suelos característicos del área de estudio; ii). Puntos de muestreo relacionados a perfiles (objetivo es identificar fase minerales en horizonte A, C2 y B, C ó C2); iii). Distribución espacial de las muestras en área de estudio.

Durante el trabajo de campo al evaluar los perfiles de los suelos en el sitio, se observan en la mayoría de ellos, la falta de desarrollo de los horizontes típicos (A, B y C) o únicamente encontrar el horizonte C, por lo cual se toman muestras de la parte superior que subyace al horizonte superficial que están más próximo al contacto con la superficie del terreno (horizonte C1). Es importante mencionar que al obtener los primeros 6 difractogramas de los horizontes C1 y C2 (Z19062, Z19063, Z19065, Z19066, Z19067, Z19068), la similitud de las curvas tenía el mismo comportamiento, por lo cual se decidió analizar únicamente el horizonte A o su correspondiente C1 (Z19134, Z19135, Z19136, Z19137).

Durante el muestreo se encontró en la localidad de Ortiz Ávila, la presencia de cristales de color blanquecino a translucido que en su momento en campo representaban una incógnita, por lo que se decidió aplicar la técnica DRX, para su identificación.

Tabla 9.- Muestras para el análisis por difracción de Rayos X.

| Id. Muestra | Coordenadas UTM | | Clave de Lab. DRX | TIPO DE SUELO |
|---------------|-----------------|---------|-------------------|---------------|
| | X | Y | | |
| 4-Ca2D.HA | 775013 | 2199976 | Z19134 | Gleysol |
| 19A-Ca6D.HA | 776987 | 2178212 | Z19135 | Pheozem |
| 36-Ca10F.HC1 | 784750 | 2160978 | Z19062 | Vertisol |
| 36-Ca10F.HC2 | | | Z19063 | |
| 43-Ca12D.HC1 | 775482 | 2148685 | Z19065 | Gleysol |
| 43-Ca12D.HC2 | | | Z19066 | |
| 56-Ca14G.HC1 | 789541 | 2139791 | Z19067 | Vertisol |
| 56-Ca14G.HC2 | | | Z19068 | |
| 70-Ca17F.HC1 | 784885 | 2124996 | Z19136 | Vertisol |
| 146-Ca30D.HC1 | 775531 | 2059954 | Z19137 | Vertisol |
| *M-3 | 776770 | 2135210 | Z19027 | Cristales |

*Muestra conformada únicamente de cristales, localizados en la localidad de Cnel. Ortiz Ávila, Mpio. De Champotón.

Los principales componentes identificados por comparación de patrones estándar en cada uno de los difractogramas son las siguientes fase minerales; cuarzo (SiO_2), caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$), beidelita ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$), esmectita ($\text{Al-Si-O-OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$), illita ($\text{K}_7\text{Al}_2 (\text{Si Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), halloysita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$) y yeso (CaSO_4) (Figuras 19, 20, 21 y 22).

La muestra 4-Ca2D.HA pertenece a la zona norte del área de estudio y corresponde a un suelo Gleysol, de la localidad de Bethania, Mpio. de Campeche; en él se identificaron las fases minerales del grupo de las arcillas (filosilicatos), como cuarzo, beidelita, caolinita, esmectita y halloysita. (Figura 19)

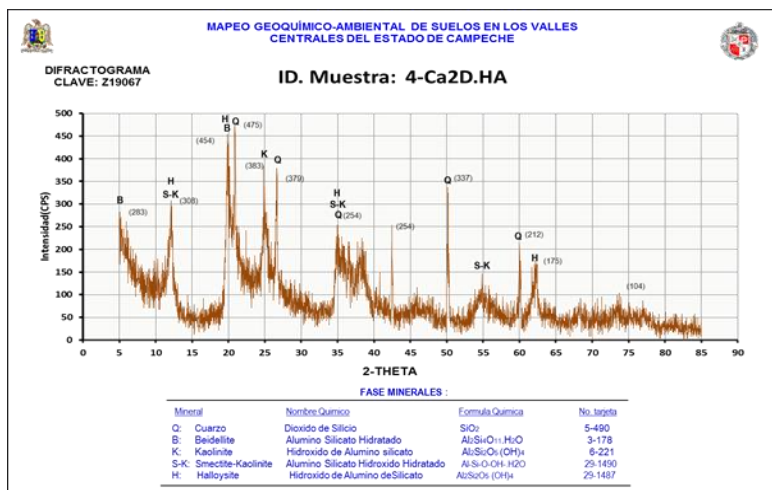


Figura 19. Difractograma correspondiente a un suelo Gleysol (horizonte HA), localidad Bethania, Mpio. de Campeche.

La muestra 19A-Ca6D.HA pertenece a la zona norte del área de estudio y corresponde a un suelo Pheozem (Figura 20), de la localidad de Nohakal, Mpio. de Campeche; en él se identificaron las fases minerales del grupo de las arcillas (Filosilicatos), como cuarzo, beidelite, caolinita, esmectita y halloysita.

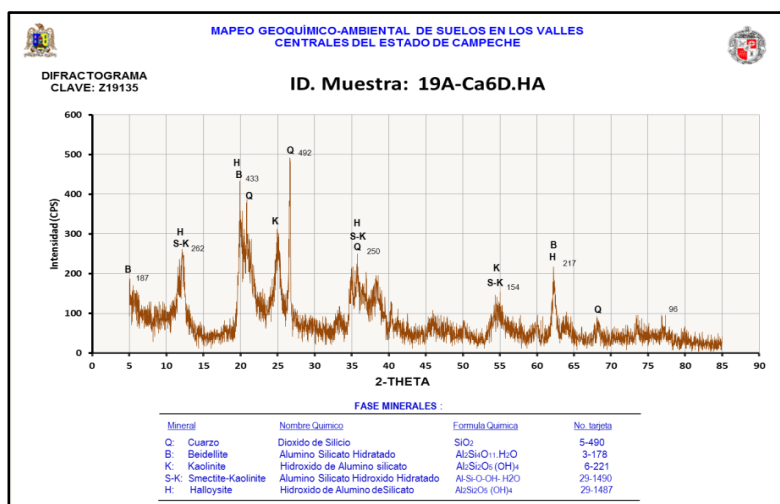


Figura 20. Difractograma correspondiente a un suelo Pheozem (horizonte HA), localidad Nohakal, Mpio. de Campeche.

La muestra 70-Ca17F.HC1 pertenece a la zona norte del área de estudio y corresponde a un suelo Vertisol (Figura 21), de la localidad de Yohaltún, Mpio. de Champotón; en él se identificaron las fases minerales del grupo de las arcillas (Filosilicatos), como cuarzo, beidelite, illita.

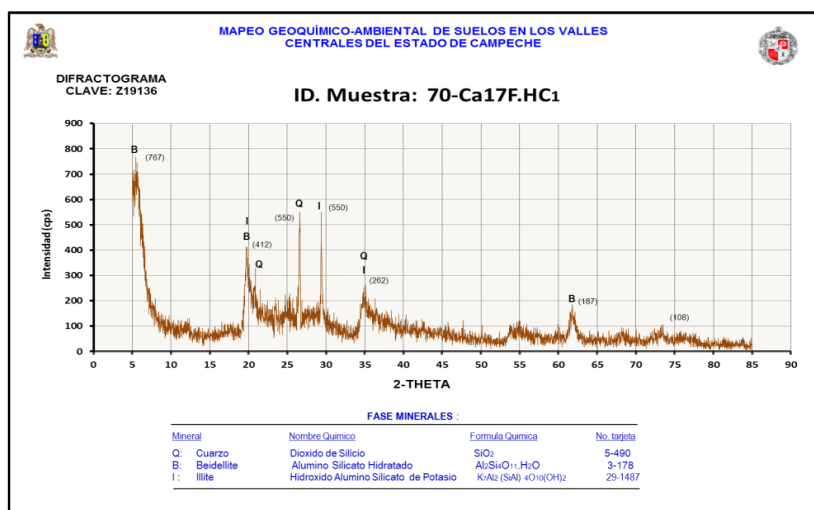


Figura 21. Difractograma correspondiente a un suelo Vertisol (horizonte HC1), localidad de Yohaltún, Mpio. de Champotón.

La muestra M3 pertenece a la zona centro-valle Yohaltún del área de estudio y corresponde a cristales (Figura 22), de la localidad de Cnel. Ortiz Avila, Mpio. de Champotón; en él se identificó el mineral yeso, relacionado a la formación Icaiché (calizas con yeso), que afuera al sur de punto de muestreo.

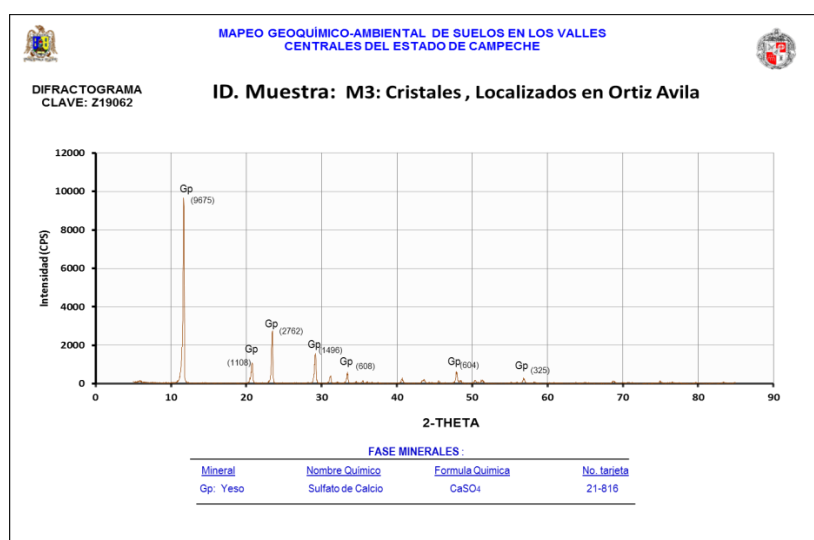


Figura 22. Difractograma de la muestra M-3, corresponde a cristales de yeso, localidad de Cnel. Ortiz Avila, Mpio. de Champotón.

El grupo de minerales antes mencionados se describe como "minerales de la arcilla". También son llamados filosilicatos (silicatos de hoja). La arcilla es el término que designa un mineral o una roca compuesta esencialmente por estos minerales. Los minerales arcillosos, son filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños (algunos en láminas hexagonales o a veces en fibras). Los minerales de arcilla poseen dos componentes

estructurales básicos: uno es el tetraedro de Silicio-Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones (2 ó 4 oxígenos y 4 ó 2 hidróxidos).

Los minerales comunes en la arcilla presente en los suelos se pueden subdividir en cuatro grupos: (1) caolín (caolinita, halloysita, dickita, nacrite), (2) esmectita (montmorillonita, nontronita), (3) illita (incluyendo mica-vermiculita), y (4) clorita (incluidos los minerales similares con una composición química variable).

En cada grupo se incluye muchas variedades por su composición y estructura, sin embargo, todos ellos son aluminosilicatos con capa tipo 1:1 o 2:1. Las propiedades de las superficies de los minerales (son zonas de gran superficie activa y con presencia de carga eléctrica) parecen ser fundamentales para la zonas de influencia y profundidad en los suelos, y por lo tanto tienen un efecto importante en las propiedades físicas y químicas del suelo.

Minerales de la arcilla, los principales productos de la meteorización y la formación del suelo, se deben a los procesos de interacción agua-roca. Los procesos de erosión (degradación) y neoformación de minerales, así como formación de minerales y sustancias amorfas órgano-minerales afectan en gran medida la formas y adsorción de elementos traza en el suelo. La afinidad de elementos traza para el suelo componentes está fuertemente influenciada por sus propiedades electroquímicas y está estrechamente relacionados con el área de superficie específica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los minerales (Kabata-Pendias, 2011).

Debido a la carga superficial que expresan, se consideran que tienden a adsorber metales pesados, los cuales con el tiempo difunden a la red cristalina. La carga superficial generalmente esta atribuida a las sustituciones isomorficas que dan lugar a la aparición de carga en láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en espacio interlaminar. Por otra parte, la existencia de cargas en las láminas se compensa, con la entrada de cationes que pueden ser intercambiados fácilmente mediante el contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes (capacidad de intercambio catiónico).

El intercambio catiónico es una propiedad fundamental de las arcillas, ya que son capaces de cambiar, fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, de los espacios interlaminares, o de otros espacios interiores de las estructuras, por iones presentes a las soluciones acuosas que las circundan (Theng, 1980).

III.3. Análisis Estadístico y Geoestadístico.

La información generada, fue integrada a través de bases de datos digitales. Las fichas de campo, controles de Laboratorio, análisis químicos y resultados analíticos se integraron a formatos de hojas electrónicas en Microsoft Excel.

Es necesario mencionar que para el análisis específico de valores de fondo se decidió no utilizar todos los 62 elementos analizados, seleccionando únicamente un grupo de 8 elementos de interés ambiental y agrícola. Sin embargo, en las estadísticas generales se reportan todos los elementos para ambas digestiones.

En este trabajo se aplicó la metodología propuesta por Chiprés *et al.*, (2008) para la elaboración de cartografía geoquímica, que se basa principalmente en el análisis estadístico y geoestadístico, denominado como EDA-SDA. La técnica EDA-SDA surgió como una preocupación de que es evidente que las decisiones ambientales sobre valores de fondo y anomalías geoquímicas no pueden ser únicamente basadas en un método meramente numérico, ya que los resultados varían en función de la técnica seleccionada.

La técnica se basa en el análisis estadístico de los resultados de las concentraciones de los diferentes elementos y en la elaboración de mapas geoquímicos de concentraciones, que son el resultado del análisis estadístico, es decir estos mapas están totalmente fundamentados en estas herramientas.

Es necesario un análisis estadístico más detallado aunado a una interpretación espacial de la información y de los resultados obtenidos. Esta labor se puede usar mediante el empleo de la técnica conocida como análisis exploratorio de datos (EDA), apoyada con las actuales técnicas de los sistemas de información geográfica (SIG), análisis espacial de datos (SDA) y cartografía geoquímica (Chiprés *et al.*, 2008).

III.3.1.- Análisis Estadístico.

Para abordar este tema de importante relevancia en el presente estudio, se parte desde el principio básico de la estadística; recopilación, análisis e interpretación de datos. Con el apoyo de las herramientas actuales Excel, Statistic 7.0 (statsoft), SPSS 19. Los cuales sirvieron para obtener la estadística descriptiva, gráficos box plots, Curvas de probabilidad normalizada, gráficas de correlación. El paquete estadístico SPSS versión 19 para Windows fue utilizado para el análisis estadístico de los resultados.

A partir de la base de datos de las concentraciones de los elementos químicos se exporto al Statistic 7.0 (Statsoft), para obtener las tablas con la estadística descriptiva

(media, mediana, desviación estándar, máximo y mínimo). Es común en los estudios geoquímicos reportar parámetros como la media y la desviación estándar, sin embargo éstos son fuertemente afectados por la presencia de outliers (Bounessah y Atkin, 2003). Dado que en los datos a manejar se incluyeron todos los valores extremos, la confiabilidad de la media y la desviación estándar como indicadores de valor central y variabilidad se ve disminuida. Por esta razón es recomendado el uso de la mediana y la MAD (*median absolute deviation*), ya que son indicadores robustos contra valores extremos y outliers, proporcionando valores más realistas de tendencia central y dispersión (Salmainen y Tarvainen, 1997; Reimann y Filzmoser 2000; Navas y Machin, 2002).

Para representar los datos agrupados por cada horizonte o capa, se emplearon las gráficas boxplots, de manera que sea posible observar las diferencias o similitudes entre diversos grupos, basándonos en los gráficos que dieron mejores resultados en el proyecto piloto del altiplano potosino (Chiprés *et al.*, 2008).

a). Gráficos Box Plots. De acuerdo a los trabajos de Chiprés *et al.*, 2008 y otros trabajos de cartografía geoquímica, los box plots son más útiles, ya que pueden mostrar características empíricas de la distribución de los datos, su dispersión, sesgo u outliers (Bounessah y Atkin, 2003), así como identificar similitudes o diferencias entre grupos y para establecer concentraciones para la elaboración de los mapas Geoquímicos (Kurlz, 1988). Los box plots proveen información gráfica que se basa en la estructura inherente de los datos sin importar su distribución y son resistentes al 5% de outliers en el grupo de datos (Reimann, 2004; Bounessah y Atkin, 2003). En ellos el grupo de datos es dividido en 4 partes iguales, empleando la mediana (línea central) y el segundo y tercer cuartil (que se conocen como bisagras), los cuales forman la caja central que contiene el 50% de los datos y a partir de la cual se extienden los bigotes. Cualquier valor más allá de éstos fue definido como outliers (Chiprés *et al.*, 2008). Cabe mencionar que el análisis estadístico una gráfica común utilizada son los histogramas que permiten observar la distribución de los datos e identificar posibles outliers, sin embargo puede fallar en mostrar subpoblaciones (Zhang *et al.*, 2005).

b). Gráficas de Probabilidad Normalizada. Otra herramienta que Chiprés *et al.*, 2008, utilizó en su estudio, obteniendo buenos resultados son las gráficas de probabilidad, las cuales también son herramientas poderosas ya que son capaces de comprimir grandes cantidades de datos, correspondientes a amplios rangos de concentraciones, en curvas relativamente simples cuya variabilidad en su figura refleja relaciones geoquímicas,

haciéndolas probablemente la herramienta de EDA más útil para establecer valores de fondo. Las gráficas de probabilidad pueden mostrar segmentos (redondeo severo de los resultados o valores bajo los límites de detección), desviaciones de la distribución normal o lognormal o la presencia de outliers (Reimann *et al.*, 2004). Sus despliegues delimitan poblaciones que tienen afinidad de origen como líneas continuas, cambiando mediante rupturas o inflexiones entre una y otra. Múltiples inflexiones pueden ser atribuidas a múltiples procesos y poblaciones, pero es un reto identificarlas apropiadamente (Reimann *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Chiprés *et al.*, 2008).

c). Gráficas de correlación. Son una herramienta gráfica que permite demostrar la relación existente entre los resultados de los diferentes medios que se muestrean y así cuantificar la intensidad de dicha relación. Son utilizadas para conocer si efectivamente existe una correlación entre dos magnitudes o parámetros de un problema. Nos ayudan a la relación de los valores obtenidos de las concentraciones de elementos entre diferentes medios o diferentes partes de un medio (Hernández *et al.*, 2008). Para este estudio se utilizó esta herramienta para comprender la relación entre los diferentes elementos de importancia ambiental y agrícola.

Es importante resaltar que a partir de las herramientas estadísticas antes descritas, podemos obtener datos que pertenecen a anomalías geoquímicas las cuales se presentan como extremos o outliers dentro de la distribución, donde la contaminación siempre es una anomalía positiva (Matschullant *et al.*, 2000). Lo anterior es de gran relevancia ya que la geoquímica ambiental está interesada especialmente en estos outliers, como indicadores de un proceso geoquímico inusual, tal como mineralización, o contaminación (agrícola o ganadera), debido a que pertenecen a otra distribución y población que se origina de un proceso diferente (Reimann *et al.*, 2004; Chiprés *et al.*, 2008).

III.3.2.- Análisis Geoestadístico.

El análisis geoestadístico radica básicamente en las técnicas de los sistemas de información geográfica (SIG), análisis espacial y cartografía geoquímica (SDA) (Chiprés *et al.*, 2008). De esta manera y a partir de los resultados del análisis estadístico es necesaria una interpretación espacial de los umbrales de fondo definidos por el análisis exploratorio de datos (EDA) con las características edafológicas, litológicas y antropogénicas del área de estudio, de manera que sea posible tratar de comprender espacialmente los procesos que influyen sobre la distribución geoquímica de los datos obtenidos de los Boxplots, de las

curvas de probabilidad normalizadas y sus rupturas aparentes entre poblaciones. es de gran importancia entender los procesos que producen o influyen sobre las distintas poblaciones representadas por los datos, mayor será la confianza en la separación de los valores de fondo y anomalías (Sinclair, 1991; Chiprés *et. al.*, 2008). De esta manera en este trabajo se empleara la técnica del EDA y el análisis espacial como herramienta de análisis de valores de fondo y anomalías geoquímicas.

Una herramienta muy importante dentro de esta técnica (SDA) es el método de interpolación, basado en la geoestadística. Su funcionamiento generalmente se basa en el principio de autocorrelación espacial, el cual establece que pares de sitios cercanos en distancia deben de tener valores similares, y conforme a la distancia aumenta entre los pares de los puntos la similitud disminuye. Más allá de cierta distancia la relación se pierde, indicando que los valores entre pares de sitios ya no están espacialmente correlacionados. La aplicación de este principio permitiría predecir valores para sitios no muestreados que se encontraran entre un conjunto de sitios conocidos (aleatorios y del mismo tipo y atributo), llevando a la interpolación de puntos (ESRI, 2003)

Esta herramienta permite crear capas continuas de valores para un atributo determinado, empleando para la predicción ya sea fórmulas matemáticas (métodos determinísticos) o modelos de correlación (estocásticos). Estos últimos permiten obtener un estimado de la confiabilidad del resultado dentro de los diferentes métodos, el presente estudio opto por trabajar con el método determinístico denominado Ponderado Inverso a la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés) (ESRI, 2003). El IDW es un interpolador determinístico exacto y de carácter local que permite crear superficies interpoladas para densidades de muestreo distribuidas de forma sistemática. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Johnston *et al.* 2001). Sus estimaciones consideran la distribución espacial como el atributo (ej. Concentraciones) de las variables, lo cual lo convierte en una mejor opción de los interpoladores meramente matemáticos, tales como las funciones polinomiales o radicales. Además es altamente eficiente con respecto a los métodos estocásticos (kriging) debido a que 1) Requiere menos tiempo de modelado, lo cual permite generar resultados en menos tiempo; 2) no necesitan que los datos sigan una distribución normal (a diferencia del kriging), lo cual es una ventaja debido a que en los estudios de impacto ambiental, es muy difícil que se cumpla esta condición. La principal desventaja del IDW frente a los métodos estocásticos es su falta de flexibilidad para evaluar condiciones específicas de las variables (ej. autocorrelación y anisotropía) y estimados de error.

Una vez definida la técnica de interpolación y los resultados obtenidos del análisis estadístico se realiza la elaboración de los mapas geoquímicos del área de estudio, los cuales proveen de información invaluable para los estudios ambientales que no pueden ser obtenidos de una simple carta geográfica, geológica y edafológica (Tao, 1998). Lo anterior adquiere una gran importancia al aplicar esta metodología en áreas sometidas a la actividad agrícola y ganadera.

Al describir la distribución espacial de un elemento, permite identificar patrones de concentración y así facilitar la toma de decisiones. Por tales motivos, a partir de los resultados de parámetros químicos, se elaboraron los respectivos mapas, empleando para ello modelos digitales de elevación, ortofotos del área de estudio, datos vectoriales y el método geoestadístico IDW, integrado mediante el software ArcView 9.3 (ESRI) (Chiprés *et al.*, 2008, Hernández *et al.*, 2008).

A continuación se describe la elaboración de los mapas geoquímicos; a través de los Boxplots se seleccionan las clases que permitirán visualizar los patrones geoquímicos en cada superficie interpolada, que han demostrado representar satisfactoriamente la variación geoquímica de un elemento (Kurlz, 1988; Reinmann 2004), incluso para mapeo de zonas semiáridas (Bounessah y Atkin, 2003). Al igual que Chiprés *et al.*, (2008), este estudio maneja 5 clases; 25 % inferior, 50 % central, 25 % superior del grupo de datos, así como outliers u outliers extremos.

Según Chiprés *et al.*, (2008), un problema común en los mapas geoquímicos (originado por la heterogeneidad del área de estudio y la densidad de muestreo) surge por la interpolación de los puntos. Se dan caso en que pequeñas variaciones (altas o bajas, en algunos caso puntuales) son enmascaradas por el resto de las muestras y no son representadas en la superficie interpolada, por lo que muchas veces es imposible crear un mapa que represente completamente y sin error los datos de campo. De esta manera se anexa al mapa interpolado un mapa que incluye las concentraciones puntuales originales (mapa de puntos), creando mediante símbolos crecientes en función de las clase obtenidas del box plot. Este mapa representa de manera directa los resultados obtenidos por sitio de muestreo, la densidad del muestreo y la concordancia con el mapa interpolado.

Finalmente la distribución de los datos se presenta mediante una curva de probabilidad normalizada (NPP), que integrada al mapa interpolado, al de puntos y a la leyenda de clases, dan origen al mapa final de cada elemento.

IV.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS RELEVANTES Y SU PATRONES GEOQUÍMICOS.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos, a partir de la metodología mencionada en el capítulo anterior propuesta por Chiprés *et al.*, (2008), como se mencionó solo se presentaran los elementos que se consideran relevantes; el criterio que se toma para la selección de estos elementos son:

a).- Elementos mayores (Macronutrientes primario y secundario) relacionados con la actividad agrícola y ganadera, principalmente en los valles centrales Edzná y Yohaltún (antiguas áreas arroceras), en el zona de estudio. Los elementos seleccionados son: **Fósforo (P) y Calcio (Ca).**

b).- Elementos potencialmente tóxicos (EPT's) y/o micronutrientes para las plantas (en base a su concentración), los EPT's son aquellos elementos considerados nocivos para el ambiente y que de acuerdo a los resultados analíticos y estadísticos se presentan en una mayor significancia estadística ($p=0.05$) en sus concentraciones. Los elementos seleccionados son: **Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn).**

c) Elemento Trazador relacionado al uso y tipo de fertilizantes en el área de estudio; **Lantano (La).**

A continuación se analizan los resultados de cada una de las herramientas aplicadas en esta metodología, identificando los valores de fondo y las anomalías geoquímicas.

IV.1.- Estadísticas Básicas.

El primer paso fue calcular las estadísticas básicas descriptivas de los elementos químicos analizados por horizontes o capas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior), las cuales se presentan en la Tabla 10 y anexo 1.

Las mediciones que se obtuvieron en las estadísticas descriptivas fueron parámetros de tendencia central como la media y la mediana, las cuales en la tabla 11, se observa que la mediana es casi siempre menor a la media y en general sus valores son muy diferentes en los horizontes superior e inferior lo cual nos señala que la mayoría representa una gráfica sesgada, en este sentido y como lo señala Chiprés *et al.*, (2008), tomaremos como medida de tendencia central más confiable la mediana. Como parámetro de dispersión obtuvimos la desviación estándar, el cual en la mayoría de los resultados fue positivo, es decir un arrastre

de la curva normal hacia la izquierda, finalmente también se obtuvieron los valores mínimos y máximos, los cuales se asocian o pueden representar potenciales outliers.

En la Tabla 10 se pueden observar las estadísticas descriptivas básicas de los elementos relevantes, obtenidas a partir de los resultados analíticos del suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior. En el anexo 3 (documento electrónico), se muestra la tabla de todos los elementos analizados en este estudio.

Tabla 10. Estadísticas básicas de los horizontes ó capas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior), solo de elementos seleccionados debido a su relevancia ambiental y agrícola. Concentración en mg/kg excepto donde se indica.

| Elemento | Suelo Superficial | | | | | | Horizonte Superior | | | | | | Horizonte Inferior | | | | | |
|---------------|-------------------|-------|-------|-------|------|------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| | n | M | Me | Min | Max | D.E | n | M | Me | Min | Max | D.E | n | M | Me | Min | Max | D.E |
| Ca (%) | 80 | 3.90 | 1.32 | 0.35 | 27.2 | 5.51 | 32 | 4.58 | 1.19 | 0.34 | 28.4 | 7.24 | 32 | 10.63 | 1.23 | 0.21 | 37.6 | 13.75 |
| P (%) | 80 | 0.03 | 0.02 | 0.003 | 0.18 | 0.02 | 32 | 0.02 | 0.01 | 0.001 | 0.13 | 0.03 | 32 | 0.006 | 0.004 | 0.001 | 0.03 | 0.006 |
| Cd | 80 | 0.73 | 0.66 | 0.18 | 1.91 | 0.33 | 32 | 0.72 | 0.68 | 0.17 | 1.96 | 0.39 | 32 | 0.44 | 0.37 | 0.06 | 1.45 | 0.30 |
| Cu | 80 | 26.47 | 25.30 | 10.70 | 48.6 | 7.39 | 32 | 24.70 | 24.35 | 14.2 | 40.8 | 6.32 | 32 | 18.19 | 19.90 | 3.33 | 29.5 | 7.20 |
| Pb | 80 | 38.11 | 36.70 | 3.35 | 114 | 19.5 | 32 | 43.60 | 38.45 | 3.44 | 113.0 | 25.65 | 32 | 35.20 | 29.40 | 1.23 | 98.2 | 26.88 |
| Se | 80 | 1.52 | 1.50 | 0.60 | 3.00 | 0.46 | 32 | 1.53 | 1.40 | 0.60 | 3.10 | 0.60 | 32 | 1.17 | 1.10 | 0.50 | 2.40 | 0.46 |
| Zn | 80 | 72.15 | 61.30 | 27.20 | 773 | 81.8 | 32 | 35.27 | 40.15 | 6.20 | 52.4 | 12.80 | 32 | 24.63 | 27.90 | 1.00 | 52.2 | 14.96 |
| La | 80 | 59.20 | 54.60 | 4.20 | 171 | 33.1 | 32 | 68.24 | 58.00 | 4.50 | 171.0 | 41.56 | 32 | 49.37 | 50.35 | 1.7 | 141 | 34.12 |

n: número de muestras, M: media, Me: mediana, Min: mínimo, Max: máximo, D.E.: Desviación Estándar

En la tabla se puede observar la comparación de los valores obtenidos de la estadística básica de suelo superficial, horizonte superior (HA ó HC1) y horizonte Inferior (HB, HC ó HC2). Al observar los resultados de la mediana como medida central de comparación, los valores no son tan contrastantes, sin embargo los coeficientes de concentración del suelo superficial contra el horizonte inferior, van desde 6.125 en fósforo, 2.197 en zinc, 1.770 en el cobre. En cuanto a la suelo superficial y horizonte superior, van desde 1.690 en fósforo, 1.1527 en el zinc y 1.071 en el lantano. La comparación entre el horizonte superior y Horizonte Inferior, van desde 3.625 en el fósforo, 1.824 en el cobre y 1.439 en el zinc. En las tres comparaciones los valores de la mediana (mayor a menor), se presentan en el siguiente orden: Suelo superficial > horizonte superior > horizonte inferior, Obviamente esto está influenciado a que las dos primeras capas están expuestas a diferentes procesos naturales (intemperismo, lixiviación, etc.) y o sobre todo a impactos antropogénicos.

Chiprés *et al.*, 2008, señala que una simple comparación de medianas parece no dar mucha información sobre una anomalía geoquímica en el altiplano, pero los valores máximos pueden proporcionar más información al respecto, al presentar potenciales outliers y por lo tanto ser indicios de poblaciones superpuestas a la población de fondo.

IV.2.- Gráficos Estadísticos.

Según Tukey (1977), el análisis exploratorio de datos puede definirse como “el conjunto de herramientas gráficas y descriptivas utilizadas para el descubrimiento de patrones de comportamiento en los datos y el establecimiento de hipótesis”. De este modo, es posible obtener una estructura explicativa de los datos a través de unas técnicas que combinan herramientas de la estadística básica (descriptivos, correlaciones, Boxplots, etc.) con el análisis multivariante avanzado. El paquete estadístico Statistic 7 (Statsoft) fue utilizado para el análisis estadístico de los resultados.

BOXPLOTS

Como se mencionó en capítulo anterior la elaboración de los boxplots a partir de los valores estadísticos de las concentraciones, son esenciales para la elaboración final de los mapas geoquímicos, el cuales son uno de los objetivos de este trabajo, debido a que los rangos de concentración fueron establecidos mediante los Box Plots (Figura 23), es decir los diferentes rangos establecidos en los mapas geoquímicos están basados en un análisis estadístico, pero es necesario mencionar que una verdadera diferenciación entre el valor de fondo y anomalía solo será posible mediante un análisis más detallado.

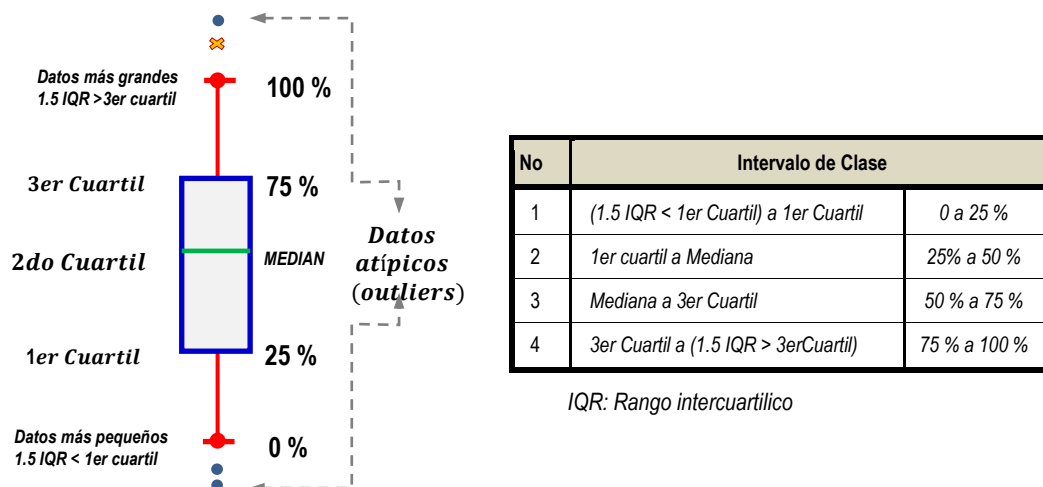


Figura 23. Elementos de los boxplots y tabla los rangos de clase (usados para la elaboración de los mapas geoquímicos).

Al comparar las medianas en la Tabla 11 y los Boxplots, se puede observar a simple vista que su valor es mayor en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm) y horizonte superior (HA ó HC2) en relación al horizonte inferior (HB, HC ó HC2) en los elementos seleccionados como relevantes, excepto el calcio y lantano/lutecio donde los valores de las medianas son

muy similares, sin embargo se incluyen en el análisis por su importancia el primero como macronutriente y el segundo como elemento trazador en el uso de fertilizantes (Figuras 24, 25, 26, 27, 28 29, 30 y 31).

Macronutrientes:

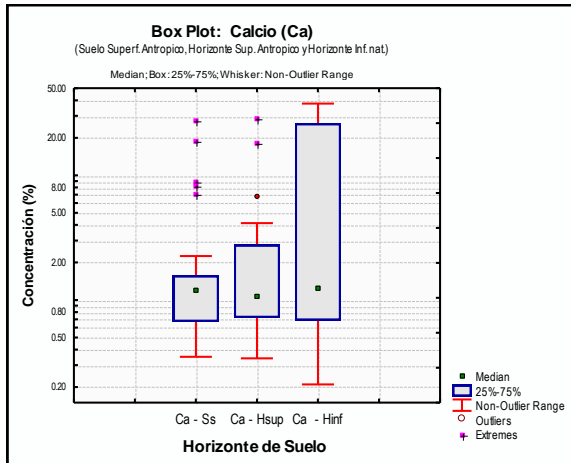


Figura 24. Box Plots de calcio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

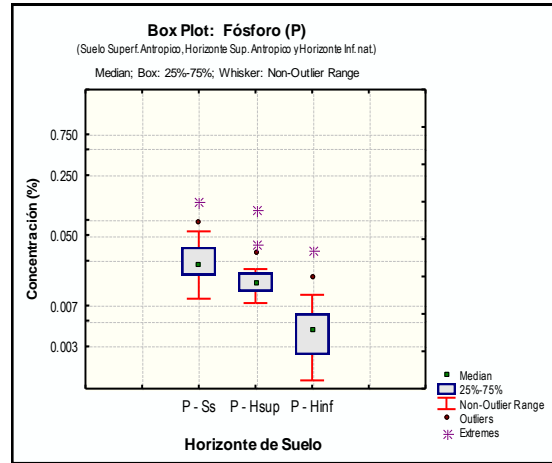


Figura 25. Box Plots de fósforo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's):

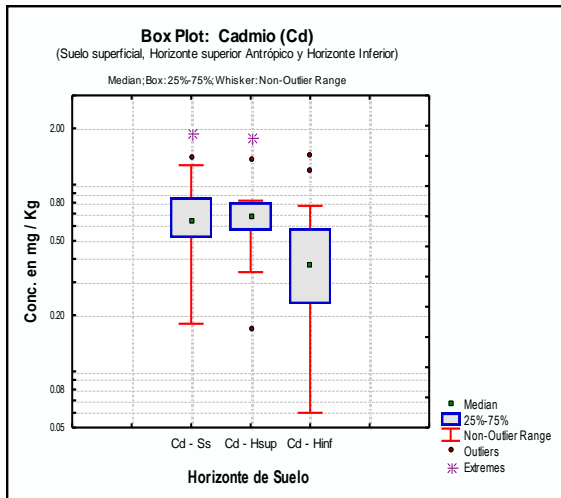


Figura 26. Box Plots de fósforo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

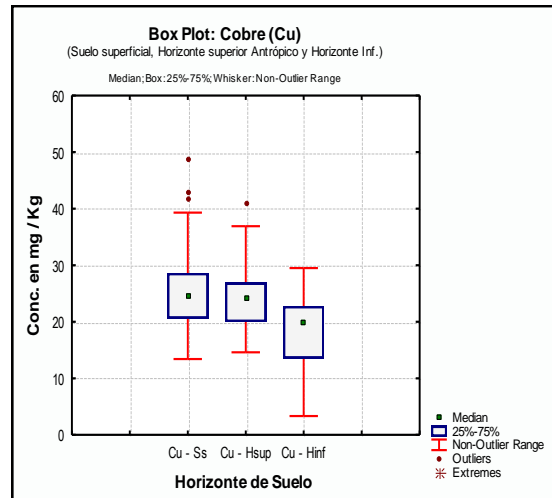


Figura 25. Box Plots de fósforo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

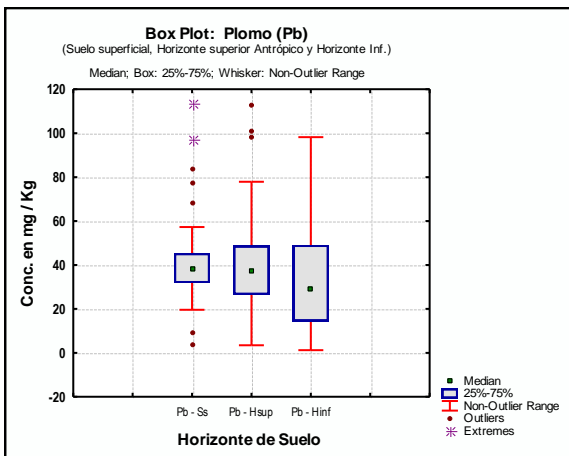


Figura 30. Box Plots de plomo por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

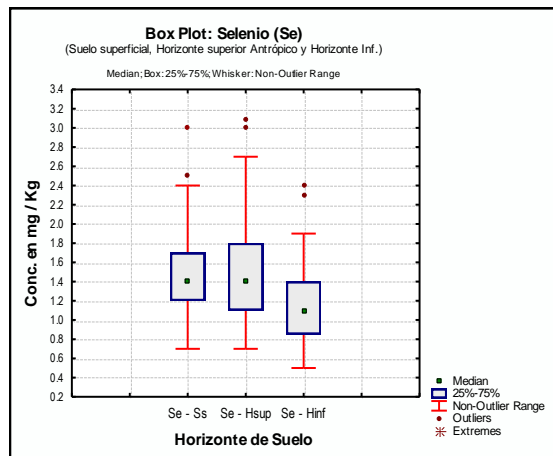


Figura 29. Box Plots de selenio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

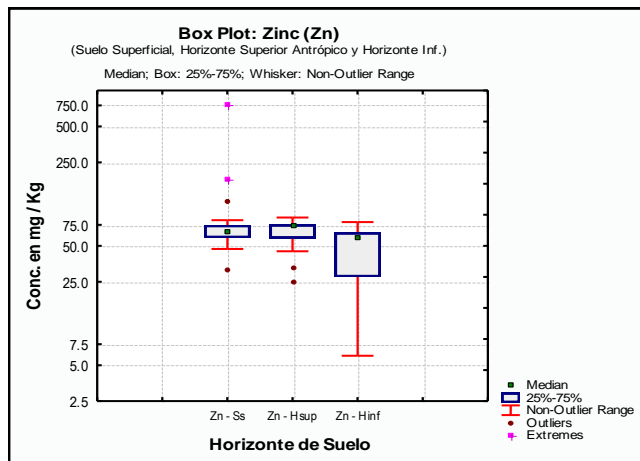


Figura 31. Box Plots de zinc por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

Trazadores de Fertilizantes:

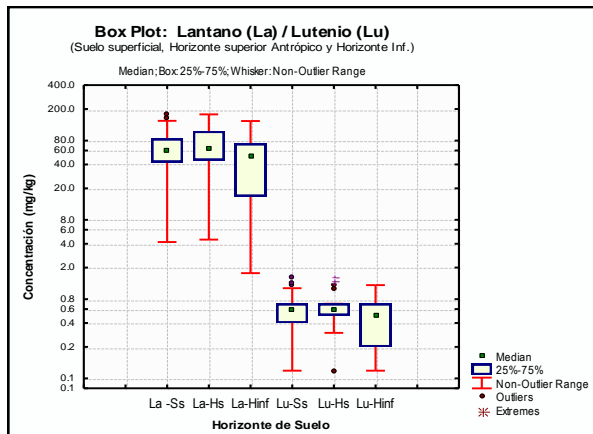


Figura 32. Box Plots de lantano/lutecio por horizontes a partir de las estadísticas básicas (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior).

CURVAS DE PROBABILIDAD NORMALIZADAS

Las gráficas de probabilidad también son herramientas poderosas ya que son capaces de comprimir grandes cantidades de datos, correspondientes a amplios rangos de concentraciones, en curvas relativamente simples cuya variabilidad en su figura puede reflejar relaciones geoquímicas, haciéndolas probablemente la herramienta del EDA más útil para establecer valores de fondo. Las graficas de probabilidad pueden mostrar segmentos (redondeo severo de los resultados o valores bajo los limites de detección), desviaciones de la distribución normal o lognormal o la presencia de outliers (Reimann *et al.*, 2004) Sus despliegues delinean poblaciones que tienen afinidad de origen como líneas continuas, cambiando mediante rupturas e inflexiones entre una y otra. Múltiples inflexiones pueden ser atribuidas a múltiples procesos y poblaciones, pero es un reto identificarlas apropiadamente (Reimann *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005).

Por tal motivo es necesaria una interpretación espacial de los umbrales de fondo definidos por el EDA con las características edafológicas, litológicas y antropogénicas del área de estudio, de manera que sea posible tratar de comprender espacialmente los procesos que influyen sobre la distribución geoquímica de los datos en las curvas de probabilidad y sus rupturas aparentes entre poblaciones. Entre más entendamos los procesos que producen o influyen sobre las distintas poblaciones representadas en los datos, mayor será la confianza en la separación de valores de fondo y anomalías (Sinclair, 1991), sobre todo si el área de estudio es muy compleja o muy extensa. En el presente trabajo se empleará la técnica del EDA y el análisis espacial como herramienta de análisis de valores de fondo para los elementos de interés ambiental seleccionados.

Dado que el sitios de estudio presenta concentraciones que no sobrepasan los valores máximos permisibles normados de EPT's (normas nacionales e internacionales), esto debido a que son un reflejo de suelos no contaminados. Los datos fueron comparados usando la información de campo para dar una mayor precisión a los grupos creados. Aquellos grupos de datos con características similares (por ejemplo material parental) y con continuidad dentro de la curva normalizada, fueron integrados en un solo grupo hasta que se observara una ruptura que pudiera ser espacialmente relacionada con otra población. Después de que todos los grupos identificados, fueron comparados entre ellos (particularmente los de las zonas agrícolas, ganaderas vs. áreas naturales), para así explicar algunos de los outliers presentes en todos los grupos, y así crear dos poblaciones básicas; valor de fondo y valores superiores arriba del límite superior de fondo.

A continuación se analizan las curvas de probabilidad de los 8 elementos seleccionados como relevantes, solamente en las capas formadas por el suelo superficial (1mx1mx5cm) y horizonte superior (HA ó HC1), debido a que se considera el material que se encuentra mas cerca de la superficie, es decir los datos representarían los valores de concentración actuales en la superficie del área de estudio.

El método estadístico aplicado para el análisis demuestra que a través del contenido elementos traza, refleja en función de su uso la modificación del paisaje geoquímico del área de estudio (principalmente por la actividad agrícola), sin embargo, es importante mencionar que los suelos de los valles centrales del Edo. de Campeche (Edzná y Yohaltún) no presentan un impacto significativo por las actividades antropogénicas (contaminación).

Para el calcio (Figura 32), en la gráfica de probabilidad es posible observar cuatro grupos principales en en ambas capas; en el suelo Superficial de 0.35 a 2.81% , 3.47 a 7.19 % y 11.12 a 18.70 % . En el horizonte superior 0.34 a 1.79%, 2.18 a 6.89% y 12.10 a 20.30 %. El primer grupo corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio principalmente en la partes centrales de los valles donde predominan suelos desarrollados como Vertisoles y Gleysoles, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. El segundo grupo de ambas capas se distribuyen en las partes cercanas a los margenes de los valles donde afloran la roca madre (calizas de la formación Icaché). Los terceros grupos de ambas capas se asocian a suelo Pheozem y de uso natural.

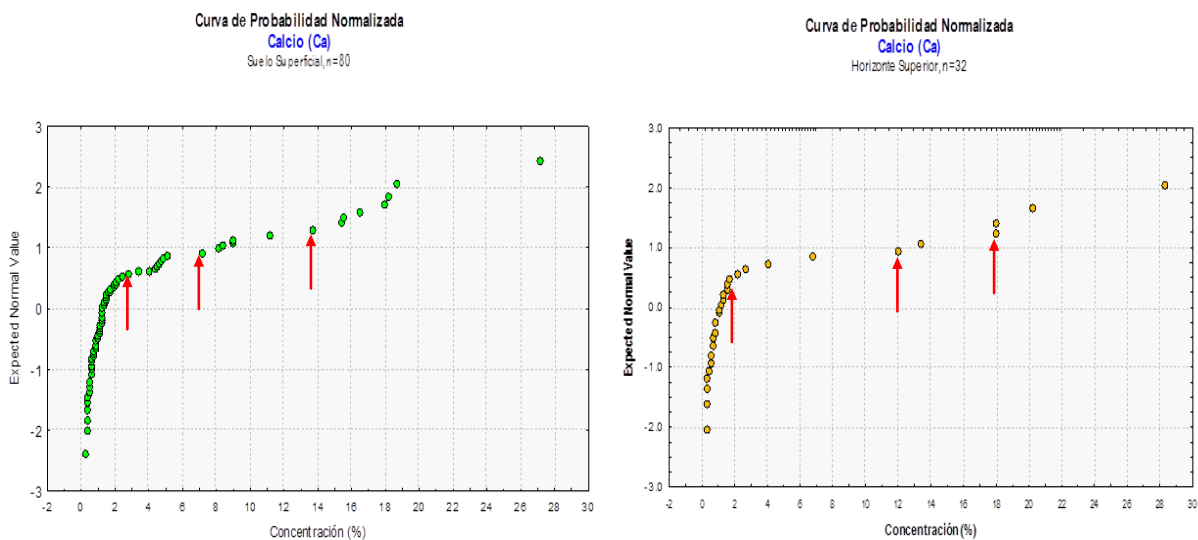


Figura 33. Curva de probabilidad normalizada del elemento Ca (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales.

Para el fósforo (Figura 33), en la gráfica de probabilidad es posible observar cuatro grupos principales en en ambas capas; en el suelo superficial de 0.009 a 0.055 % y 0.072 a

0.177 %. En el horizonte superior 0.008 a 0.024% y 0.032 a 0.039%. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio principalmente en la partes, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. El caso del segundo grupo del suelo superficial se relaciona a área donde se practica la quema de zonas naturales para cambiar su vocación natural a agrícola (ej. localidad de Nohakal, Mpio. de Campeche).

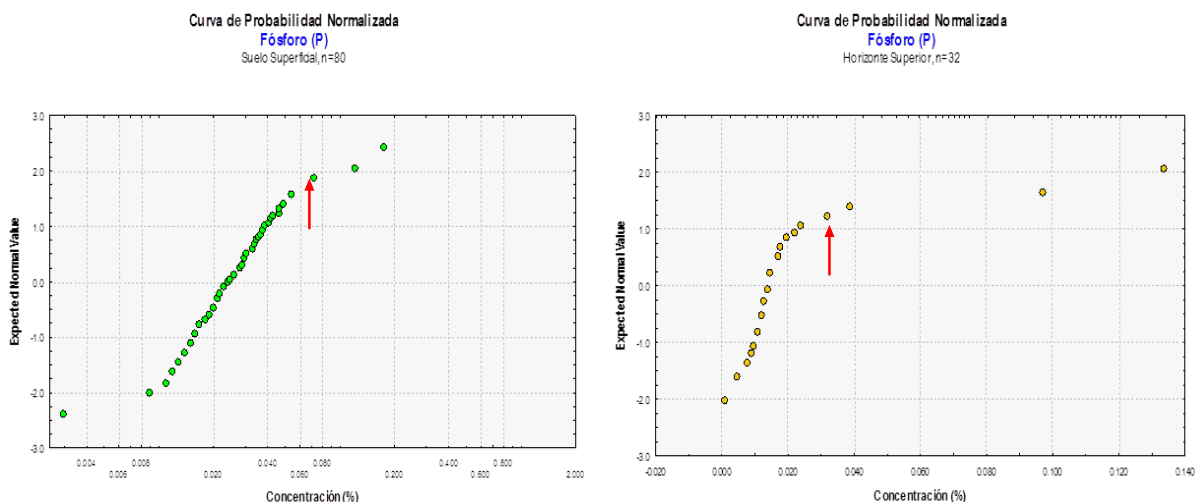


Figura 34. Curva de probabilidad normalizada del elemento P (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales).

Para el Cadmio (Figura 32), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de cinco grupos principales en ambas capas; en el suelo superficial de 0.26 a 1.01 mg/kg, 1.27 a 1.40 y 1.54 a 1.67 mg/kg. En el horizonte superior 0.34 a 0.93 mg/kg y 0.93 a 1.37 mg/kg. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio principalmente en la partes, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Los valores más altos se asocian a suelos tipo Pheozem y a zona Norte donde las actividades agrícolas son mas intensas.

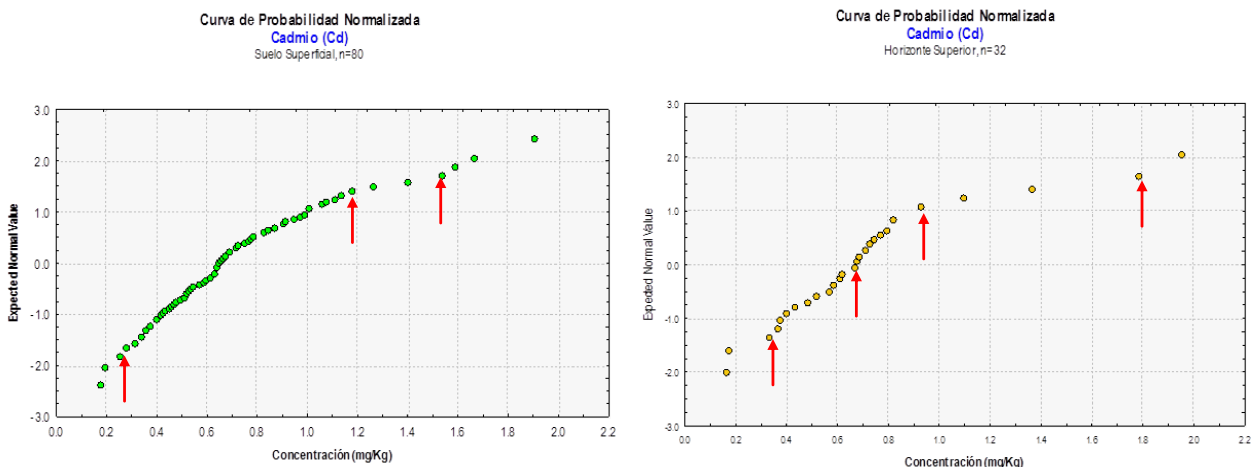


Figura 35. Curva de probabilidad normalizada del elemento Cd (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales).

Para el cobre (Figura 35), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de seis grupos principales en en ambas capas; en el uelo superficial de 13.40 a 29.70 mg/kg, 31.00 a 34.80 y 35.6 a 36.20 mg/kg. En el horizonte superior 14.20 a 15.80 mg/kg y 19.20 a 26.90 y 29.00 a 31.60 mg/kg. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Sin embargo, los valores de las concentraciones que están arriba del límite de valor de fondo, se asocian a las actividades agrícolas en la zona Norte del área de estudio (localidades como Cayal, Nohakal y San Pedro Comilchi, Mpio de Campeche).

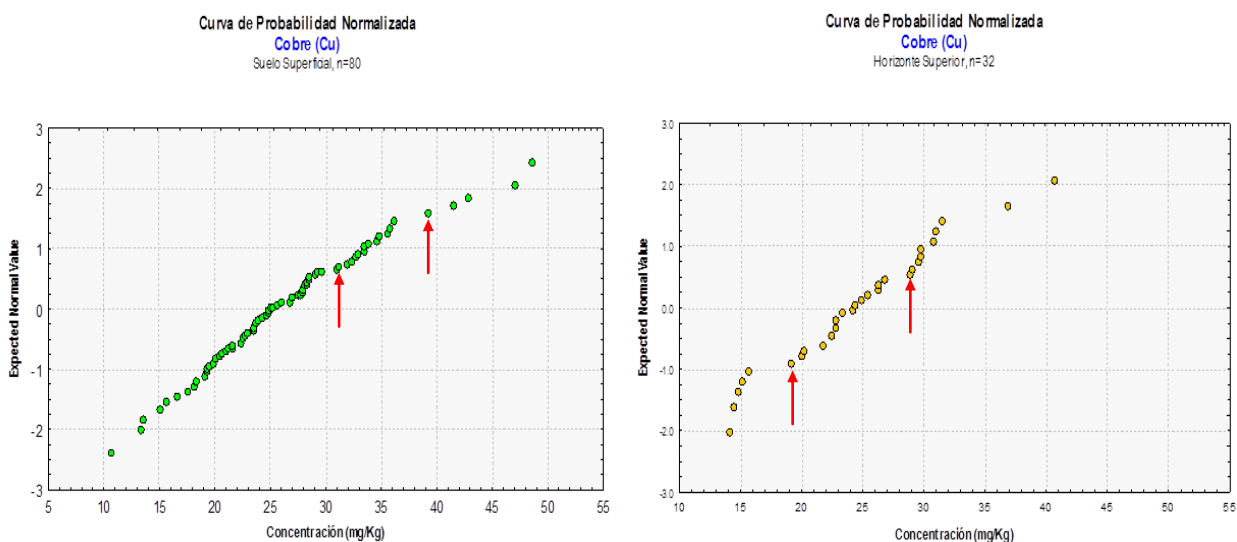


Figura 36. Curva de probabilidad normalizada del elemento Cu (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales).

Para el plomo (Figura 36), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de seis grupos principales en en ambas capas; en el suelo superficial de 8.51 a 11.80 mg/kg, 16.00 a 58.90 y 66.30 a 87.20 mg/kg. En el horizonte superior 3.44 a 14.70 mg/kg y 21.80 a 48.70 y 77.90 a 101.00 mg/kg. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Sin embargo, los valores de las concentraciones que están arriba del límite de valor de fondo, se asocian a las actividades agrícolas en la zona Norte del área de estudio (ej. localidades como Cayal, Nohakal y San Pedro Comilchi, Mpio. de Campeche y Arellano, Santa Cruz de Rovira en el Mpio de Champotón).

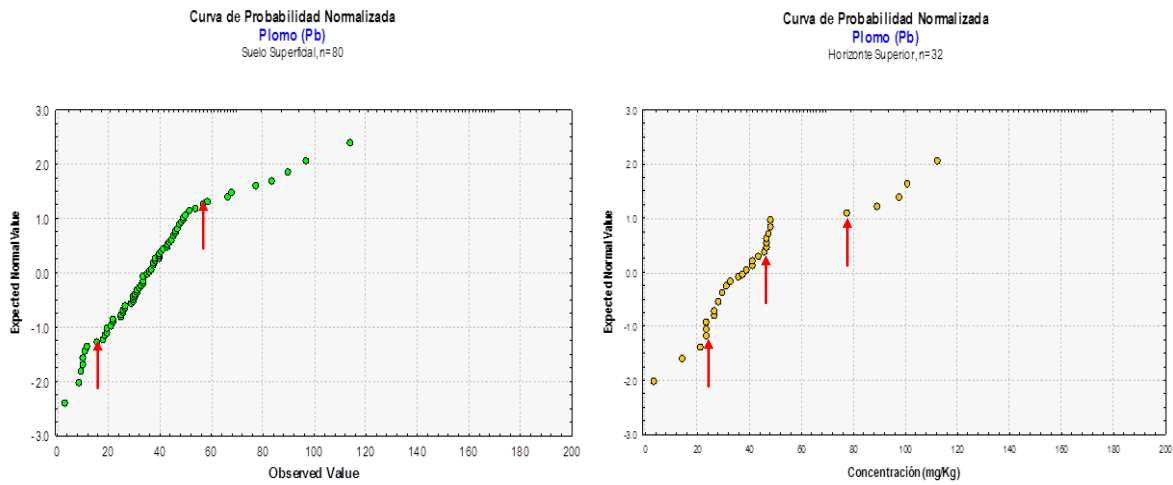


Figura 37. Curva de probabilidad normalizada del elemento Pb (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales.

Para el selenio (Figura 37), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de seis grupos principales en en ambas capas; en el suelo superficial de 0.60 a 1.0 mg/kg, 1.10 a 2.00 y 2.20 a 3.00 mg/kg. En el horizonte superior 0.60 a 1.00 mg/kg y 1.10 a 1.80 y 2.20 a 3.10 mg/kg. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área de estudio, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Sin embargo, los valores de las concentraciones que están arriba del límite de valor de fondo, se asocian a las actividades agrícolas en la zona Norte del área de estudio localidades como Cayal, Nohakal y San Pedro Comilchi Mpio. de Campeche y en la parte centro Oeste en las localidades del y Arellano, Santa Cruz de Rovira en el Mpio de Champotón.

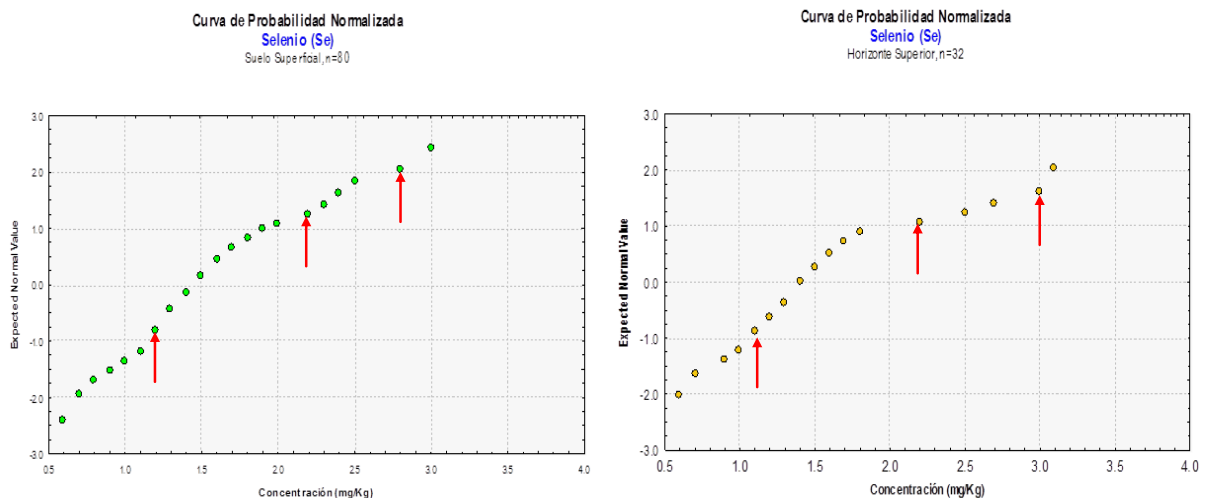


Figura 38. Curva de probabilidad normalizada del elemento Se (suelo superficial y horizonte superior), las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales.

Para el zinc (Figura 38), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de cuatro grupos principales en en ambas capas; en el suelo superficial de 31.40 a 85.90 mg/kg y 120.00 a 182.00 mg/kg. En el horizonte Superior 45.00 a 77.10 mg/kg y 83.30 a 86.30 mg/kg. Ambos grupos de rangos corresponde a valores que se distribuyen en toda el área

de estudio, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Sin embargo, los valores de las concentraciones que están arriba del límite de valor de fondo, se asocian a las actividades agrícolas en la zona Norte del área de estudio localidades como Cayal, Nohakal y San Pedro Comilchi y en el Mpio de Campeche y en la parte centro Oeste en las localidades del y Arellano, Santa Cruz de Rovira en el Mpio de Champotón.

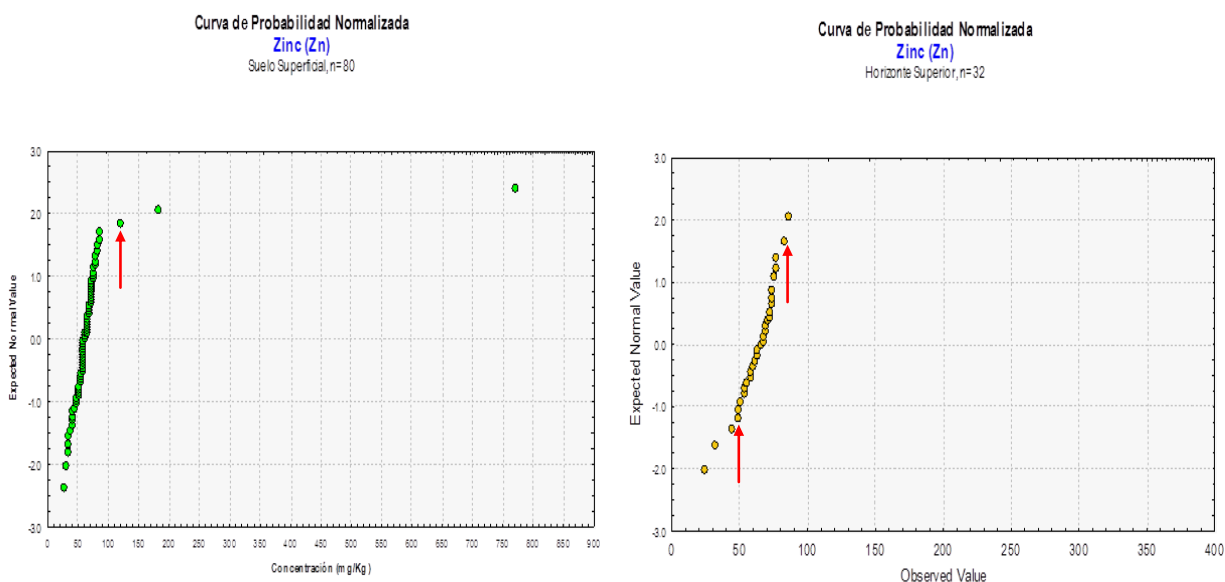


Figura 39. Curva de probabilidad normalizada del elemento Zn en el suelo Superficial y Horizonte Superior, las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales.

Para el lantano (Figura 39), en la gráfica de probabilidad es posible observar un total de seis grupos principales en en ambas capas; en el suelo superficial de 9.2 a 18.6 mg/kg, 24.0 a 98.9 y 109.0 a 125.0 mg/kg. En el horizonte sperior 24.0 a 76.9 mg/kg y 86.4 a 107.0 y 130.00 a 171.0 mg/kg. Ambos conjuntos de grupos corresponden a valores que se distribuyen en toda el área de estudio principalmente en la partes, tanto en las muestras del suelo superficial y horizonte superior. Sin embargo, los valores de las concentraciones que están arriba del límite de valor de fondo, se asocian a las actividades agrícolas en la zona Norte del área de estudio donde se usan intensamente agroquímicos (fertilizantes), localidades como Cayal, Nohakal y San Pedro Comilchi, Mpio de Campeche, donde se siembra diferentes variedades de frutales (ciruela, mangos, papaya, sandía, limón), y en localidades como Arrellano y Santa Cruz de Rovira Mpio de Champotón se siembra caña de azúcar.

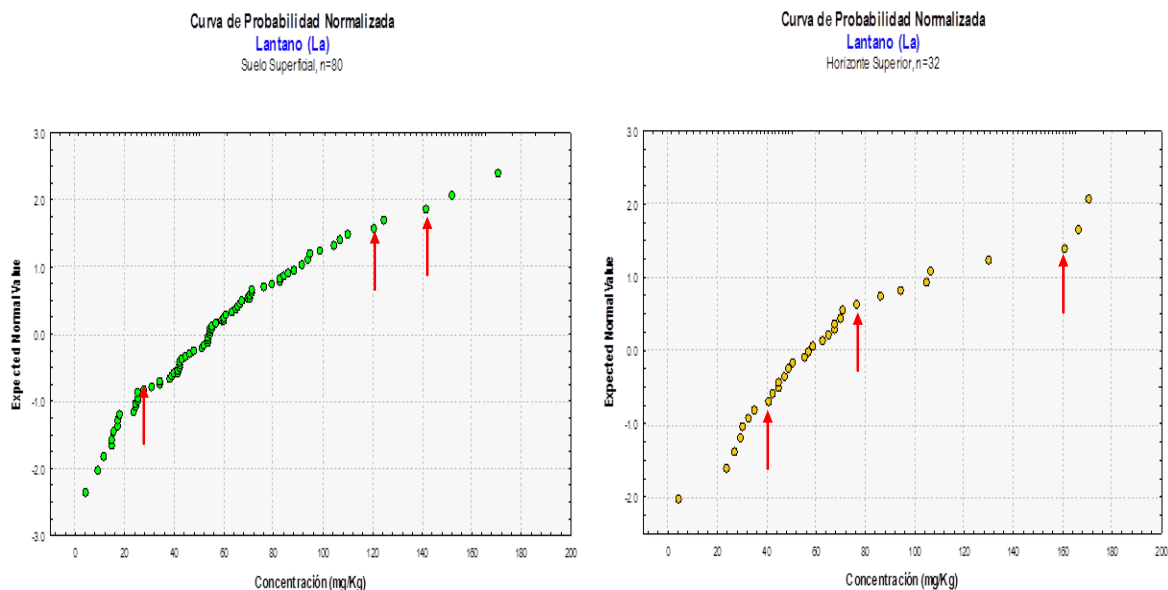


Figura 40. Curva de probabilidad normalizada del elemento Lantano en el suelo Superficial y Horizonte Superior, las flechas indican los puntos de ruptura o inflexión entre las poblaciones principales.

Como se menciona anteriormente, en el área de estudio se observa (en base a las Curvas de Probabilidad normalizadas), que los grupos de población de las concentraciones de los elementos relevantes (Ca, P, Cd, Cu, Pb, Se, Zn y La), sus valores son típicos de valores de fondo y no obstante a presenta la [Tabla 12](#), los valores de fondo y línea base del área de estudio.

Tabla 11. Rango de valores de fondo de las concentraciones de los elementos químicos relevantes (gráficas de probabilidad normalizada).

| Elem. | Valores de Fondo | Valores arriba del límite superior del valor de fondo, asociadas a actividades antrópicas** |
|-------|---------------------------|---|
| | | mg/kg |
| *Ca | 0.34 a 2.81 | 3.47 a 20.30 |
| *P | 0.009 a 0.039 | 0.072 a 0.177 |
| Cd | 0.26 a 1.4 | 0.54 a 1.67 |
| Cu | 13.4 a 34.8 | 35.6 a 36.2 |
| Pb | 3.44 a 58.9 | 66.3 a 101.0 |
| Se | 0.6 a 2.0 | 2.2 a 3.1 |
| Zn | 31.4 a 86.3 | 120 a 182.0 |
| La | 9.2 a 76.9 (86.4 a 125.0) | 130.0 a 171.0 |

* Concentración en %

** Agricultura y ganadería

GRÁFICAS DE CORRELACIÓN.

Como tercera herramienta del análisis estadístico se realizaron correlaciones (Scatterplots) entre alguno de los 8 elementos. Un análisis de correlación de Pearson (removiendo los valores extremos identificados en el boxplot) permite observar asociaciones significativas entre horizontes superior e inferior para varios elementos (Tabla 13 y Figuras 40 a 47), principalmente para la asociación de los elementos relevantes (Ca, P, Cd, Cu, Pb, Se, Zn y La), con las mineralizaciones locales pero sin que se pudiese explicar más del 80% de las concentraciones por la asociación entre estos dos horizontes (empleando el coeficiente de determinación). El análisis de correlación entre elementos permite observar nuevamente la asociación entre aquellos relacionados con la mineralización del área de estudio, tanto en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2) como en el suelo superficial (1m x1m x 5cm) y horizonte superior (HA ó HC1). Esto indica que los factores naturales juegan un papel importante sobre los resultados obtenidos y que además existe un componente no asociado a la geología o mineralizaciones que puede estar influyendo sobre estos mismos resultados, pudiendo ser de carácter antropogénicos.

Tabla 12. Correlación de Pearson de los elementos relevantes, comparando el horizonte inferior (HB, HC ó HC2) contra suelo superficial y horizonte superior (HA ó HC1)

| Hinf vs. Ss. (a) | r | Ca | P | Cd | Cu | Pb | Se | Zn | La |
|--------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.428 | 0.939 | 0.442 | 0.253 | 0.791 | 0.718 | 0.039 | 0.715 |
| Hinf. Vs. Hsup (b) | r | Ca | P | Cd | Cu | Pb | Se | Zn | La |
| | | 0.702 | 0.926 | 0.445 | 0.384 | 0.862 | 0.753 | 0.708 | 0.795 |

(a). Hinf : Horizonte inferior, Ss: Suelo superficial. (b). Hinf: horizonte inferior, Hsup: Horizonte superior

p= 0.05

Los ocho elementos relevantes (Ca, P, Cd, Cu, Pb, Se, Zn y La), estos se contrastaron entre el horizonte inferior contra el suelo superficial y horizonte inferior para evaluar la correlación de las capas expuestas a la actividades antropogénicas contra el substrato más profundo (más alejado de estas actividades), presenta una correlación positiva entre ellos (Tabla 13). Los valores más altos de correlación en la comparación del Horizonte Inferior contra el Suelos Superficial, se observaron en el P con un coeficiente de $r = 0.939$, Pb con un coeficiente de $r = 0.791$., La con un coeficiente de $r = 0.715$ y Se con un coeficiente de $r = 0.718$. En la comparación del horizonte inferior contra el Horizonte superior, las correlaciones más altas se observan en P con un coeficiente de $r = 0.926$, Pb con un coeficiente de $r = 0.862$., La con un coeficiente de $r = 0.795$ y se con un coeficiente de

$r = 0.753$, La con un coeficiente de $r = 0.715$ y Se con un coeficiente de $r = 0.753$, Zn con un coeficiente de $r = 0.708$ y Ca con un coeficiente de $r = 0.702$. Cabe señalar que los elementos se correlacionan débilmente con las propiedades del suelo, pero algunas correlaciones significativas detectadas son en la comparación entre el horizonte inferior y suelo superficial; Ca con un coeficiente de $r = 0.428$, Cd con un coeficiente de $r = 0.442$, Cu con coeficiente de $r = 0.253$ y Zn con un coeficiente de $r = 0.039$. En la comparación del horizonte inferior contra el horizonte superficial únicamente el Cd tiene un coeficiente de $r = 0.445$.

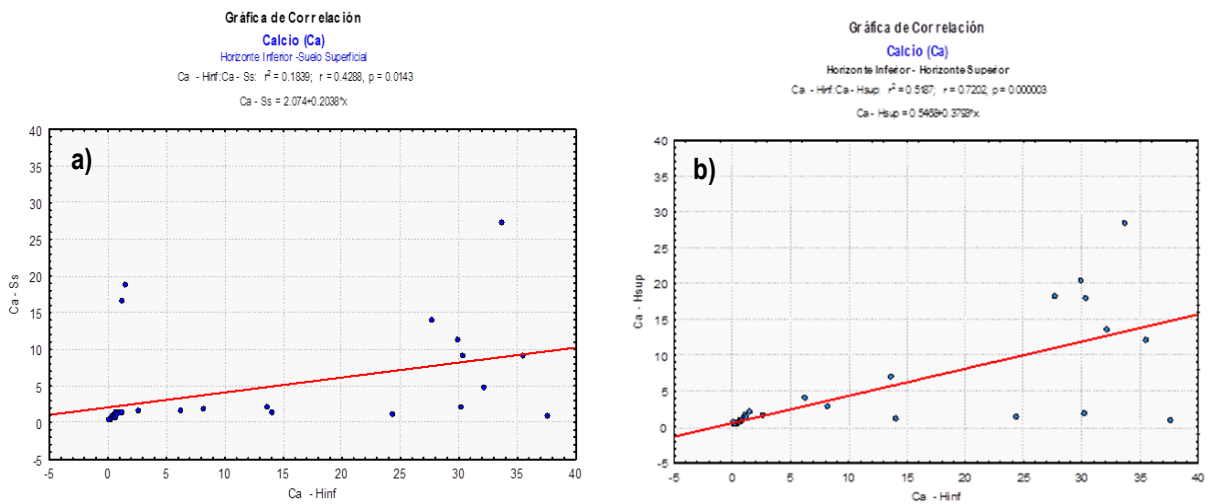


Figura 41. Graficas de correlación del calcio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

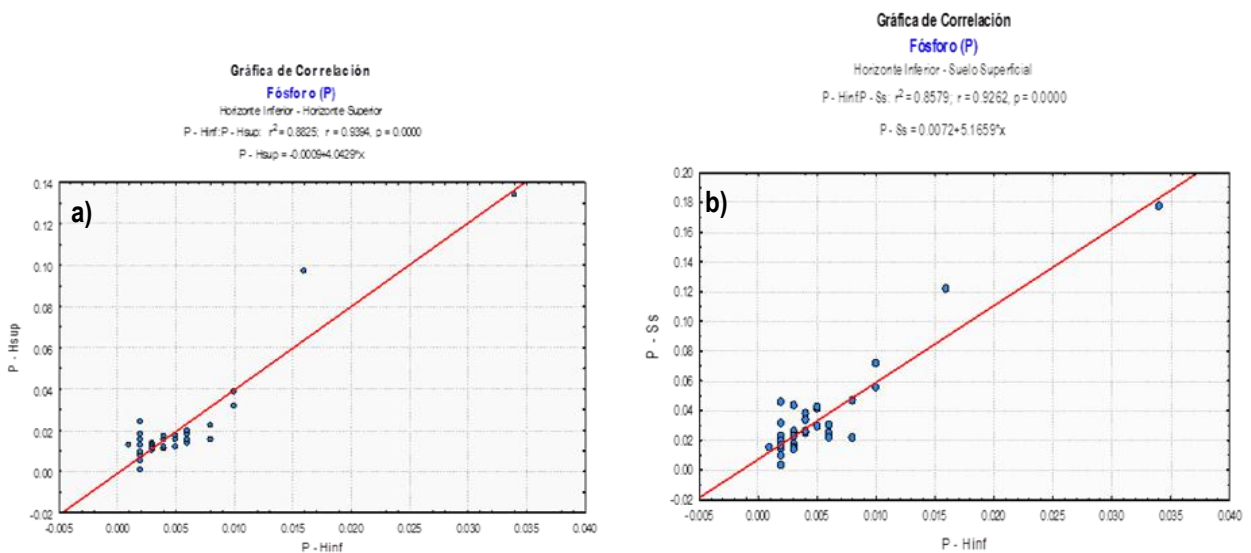


Figura 42. Graficas de correlación del calcio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

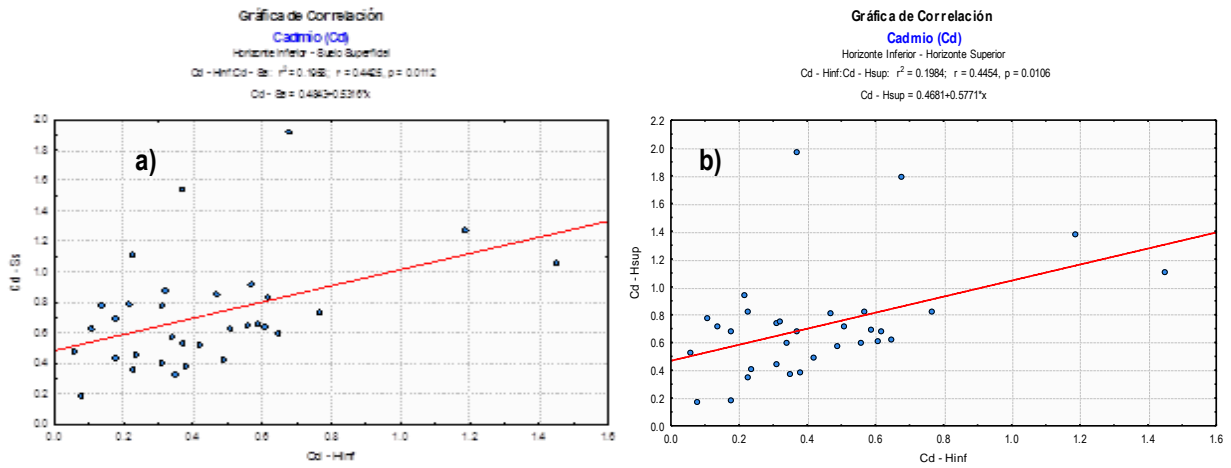


Figura 43 Graficas de Correlación del cadmio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

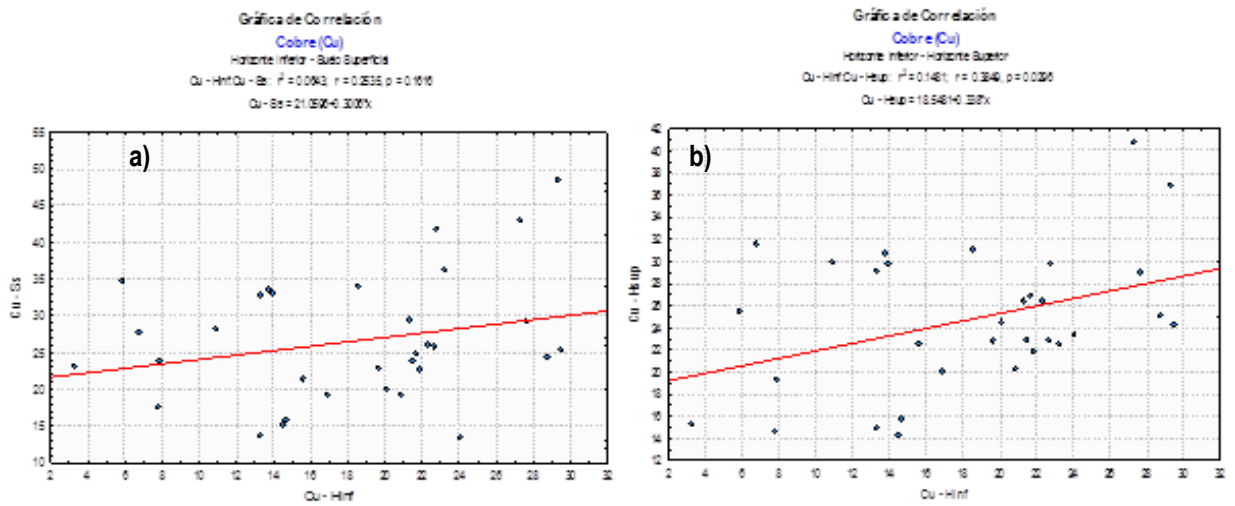


Figura 44. Graficas de correlación del cobre: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

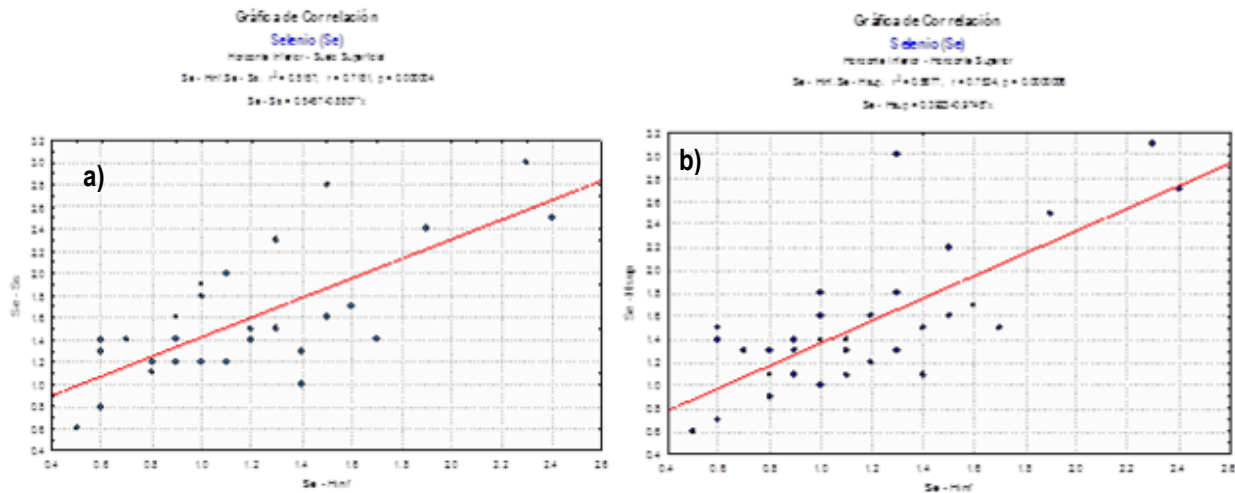


Figura 45. Graficas de correlación del selenio: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

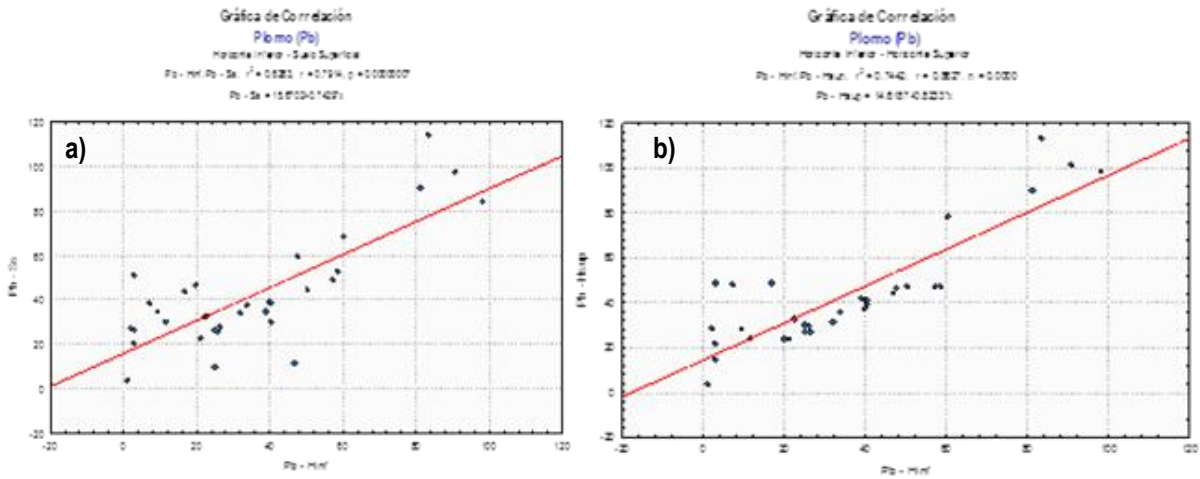


Figura 46. Gráficas de correlación del plomo: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

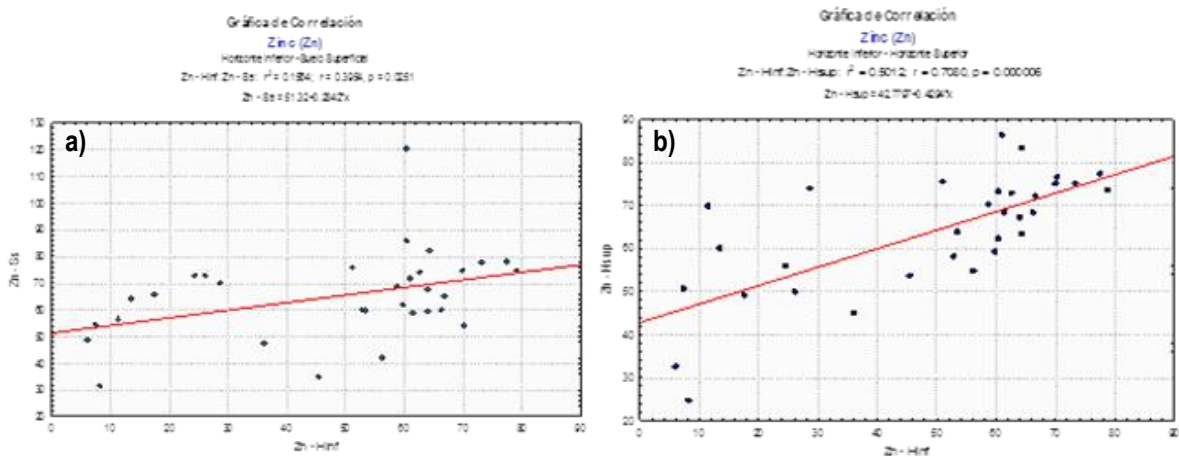


Figura 47. Gráficas de correlación del Zinc: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

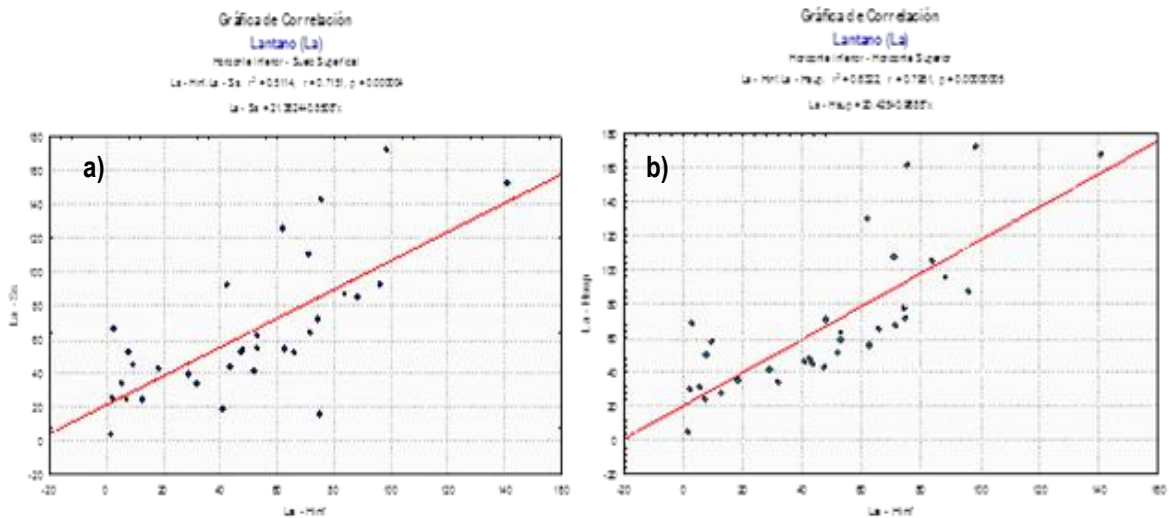


Figura 48. Gráficas de correlación del Lantano: a) horizonte inferior contra suelo superficial y b) horizonte inferior contra horizonte superior.

IV.3.- Cartas Geoquímicas.

El sistema de información geográfica utilizado en la elaboración de los diferentes mapas ha sido el Arcgis 9 (Arcmap 9.3). Para la creación de los mapas de distribución de los elementos fue utilizado el sistema de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted, Inverso de la distancia ponderada) a partir de los datos de concentración analizados en los diferentes puntos de muestreo. Dicha interpolación es realizada a través de una combinación de tipo lineal de los datos de que se disponen, promediados con un peso que es función del inverso de la distancia. Esto significa que a mayor cercanía del punto de muestreo disponible al punto a interpolar, mayor influencia tendrá dicho dato en su cálculo.

Y a partir de las cartas geoquímicas presentadas, es posible tener un panorama de distribución de los elementos (Chiprés *et al.*, 2008). Sin embargo, es difícil establecer a partir de ellas los rangos de fondo que representan la concentración natural o “normal” de los elementos para así poder identificar las anomalías regionales. Para lograr este objetivo, Chiprés *et al.*, (2008), señala que es necesario un análisis más detallado como el que se obtiene a partir de **EDA-SDA**, que involucra un análisis estadístico y espacial de los datos. Para los capas del suelo superficial se pudo realizar lo antes dicho, no obstante, dada la poca cantidad de datos obtenidos de las capas del horizonte superior y horizonte inferior el análisis EDA-SDA, se ve limitado su potencial.

Como un objetivo de este trabajo es identificar las zonas de posible riesgo (anomalías geoquímicas) y paisaje geoquímico, a través de la elaboración de los mapas geoquímicos y de esta manera poder detectar y visualizar las zonas de posible riesgo, sea naturales o antropogénicas (Chiprés *et al.*, 2008).

En este apartado se presentan los mapas geoquímicos que fueron elaborados de acuerdo a las características de los Box plots como se menciono anteriormente, ya que han demostrado representar satisfactoriamente la variación geoquímica de un elemento (Kurtz, 1998; Reimann 2004), incluso para mapeo de zonas semiáridas (Bounessah y Atkin, 2003; Chiprés *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2008). Por lo anterior los Mapas de línea base se definieron usando los rangos obtenidos a través de los Box Plots (hasta el 5to Rango).

Solo se realizaron los mapas de línea base de suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior, para 8 elementos analizados, en las figuras desde la 39 a la 61,

corresponden a los elementos determinados principalmente como relevantes; calcio (Ca), fósforo (P), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), selenio (Se), zinc (Zn) y lantano (La).

Es importante mencionar que los resultados de las concentraciones de los elementos químicos obtenidos del área de estudio, no reflejan que se trate de un sitio contaminado por las actividades antropogénicas actuales y antiguas a las que se ha sometido el área. Sin embargo en la elaboración de los mapas se representan las concentraciones más altas obtenidas, las cuales se describen a continuación y se pueden observar en cada uno de los mapas.

Calcio: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **calcio** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 48, 49 y 50), los rangos mas altos de 26.1 a 37.6 % y de 0.503 a 11.90 %. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; horizonte inferior > horizonte superior > suelo superficial. La distribución tiene un patrón similar entre las 3 capas; en la zona Norte del área de estudio aparece principalmente en las localidades de San Antonio Cayal y Nilchi Mpio. de Campeche. En el valle de Edzná en la parte Oeste, en la localidad de Santa Cruz de Rovira (capa del suelo superficial). En el valle de Yohaltún las localidades Nayarit de Castellot, Kikab y Guadalupe, Mpio. de Champotón. En cambio los rangos de concentraciones mas bajas de 0.210 a 0.745 % y 0.746 a 1.31 %, tienen una mayor significancia en el horizonte superior, observandose en las localidades de Adolfo Ruiz Cortines, San Francisco, Tixmucuy en el Mpio. de Campeche

Fósforo: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **fósforo** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 51, 52 y 53), los rangos mas altos de 0.100 a 1.340 % y de 0.340 a 0.100 %. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; suelo superficial > horizonte superior > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan principalmente en 2 zonas: En la capa del suelo superficial en las localidades de Nohakal, Mpio. de Campeche (zona Norte) y Nuevo Michoacán, Kikab, Nayarit de Castellot, Mpio de Champotón (valle de Yohaltún) . En el horizonte superior se observa las mismas localidades con un área de menores dimensiones. En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 0.001 a 0.018 % y 0.019 a 0.024 %, tiene una mayor significancia en el horizonte inferior abarcando prácticamente la totalidad de área de estudio y en menor proporción el horizonte superior.

Cadmio: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **cadmio** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 54, 55 y 56). Los rangos mas altos de 1.44 a 1.96 mg/kg y de 0.87 a 1.44 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; suelo superficial > horizonte superior > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores mas altos), se reflejan principalmente en 3 zonas: En la capa del suelo superficial en la localidades de Emiliano Zapata, Cayal y Nohakal, Mpio. de Campeche (zona Norte) y Santa Cruz de Rovira, Mpio de Champotón (valle de Yohaltún). En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 0.06 a 0.52 mg/kg y 0.53 a 0.68 mg/kg , presenta una mayor significancia en el horizonte inferior predominando en la mayoría de sus localidades.

Cobre: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **cobre** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 57, 58 y 59). Los rangos mas altos de 43.33 a 48.60 mg/kg y de 31.15 a 43.00 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; suelo superficial > horizonte superior > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan principalmente en 2 zonas: En la capa del suelo superficial en las localidades de Bethania, Emiliano Zapata, Cayal y Nohakal, Mpio. de Campeche (zona Norte) y Ortiz Avila y Kikab, Mpio de Champotón (valle de Yohaltún). En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 3.33 a 21.45 mg/kg y 21.46 a 25.30 mg/kg, presenta una mayor significancia en el horizonte inferior predominando en la mayoría de sus localidades.

Plomo: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **plomo** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 60, 61 y 62). Los rangos mas altos de 43.33 a 48.60 mg/kg y de 31.15 a 43.00 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; horizonte superior > suelo superficial > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan principalmente en 2 zonas: En la capa del horizonte superior en las localidades; Emiliano Zapata y Nohakal, Mpio. de Campeche (zona Norte) y Santa Cruz de Rovira, Mpio. de Champotón (valle de Yohaltún). La capa del suelo superficial además de las localidades antes mencionadas aparece en Cayal, Mpio de Campeche (zona Norte). La Capa del horizonte inferior en la localidad de Melchor Ocampo, Mpio. de Campeche (valle de Yohaltún). En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 1.23 a 27.50 mg/kg y 27.51 a 38.45 mg/kg , presenta una mayor significancia de estos valores en el horizonte inferior (predominando 2 zonas); en las localidades de Guadalupe, Cnel. Ortiz Avila,

Salinas de Gortari, Mpio de Champotón (valle de Yohaltún) y Bethania, Nilchi y Cayal (zona Norte).

Selenio: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **selenio** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 63, 64 y 65). Los rangos más altos de 2.4 a 3.1 mg/kg y 1.7 a 2.4 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; horizonte superior > suelo superficial > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan principalmente en 3 zonas: En la capa del horizonte superior y suelo superficial en las localidades; Emiliano Zapata, Nohakal, Rancho el Pentágono en el Mpio. de Campeche (zona Norte) y Santa Cruz de Rovira en el Mpio. de Champotón (valle de Edzná). En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 0.5 a 1.2 mg/kg y 1.3 a 1.5 mg/kg, presenta una mayor significancia de estos valores en el horizonte inferior, en las 3 zonas; Zona norte, Valle Edzná y Yohaltún.

Zinc: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **zinc** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 66, 67 y 68). Los rangos más altos de 86.30 a 773.00 mg/kg y de 73.75 a 86.30 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; suelo superficial > horizonte superior > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan principalmente en 2 zonas: En la capa del suelo superficial en las localidades; parte central del valle Edzná en las localidades de Bonfil, Melchor Ocampo, Tixmucuy del Mpio. de Campeche. En la parte Oeste de la zona Norte en las localidades de Pocyaxum y Nohakal, Mpio. de Campeche. La capa del Horizonte superior se observan manchas más dispersas en las localidades de Emiliano Zapata, Rancho San Roberto, Mpio. de Campeche (zona Norte). En Bonfil, Mpio. de Campeche (valle Edzná) y Cnel. Ortiz Avila, Yohaltún Mpio. de Champotón (valle de Yohaltún). En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 6.00 a 55.20 mg/kg y 55.21 a 67.65.45 mg/kg, presenta una mayor significancia de estos valores en el horizonte inferior predominando en las 3 zona; Norte, Valle Edzná y Valle Yohaltún.

Lantano: El Paisaje Geoquímico que se observa en la distribución de las concentraciones de **lantano** en los valles de Edzná y Yohaltún (Figuras 69, 70 y 71). Los rangos más altos de 141.00 a 171.00 mg/kg y 81.65 a 141.00 mg/kg. Se reflejan con una mayor significancia en el siguiente orden; horizonte superior > suelo superficial > horizonte inferior. La distribución de las concentraciones (valores más altos), se reflejan

principalmente en las 3 zonas: En la capa del horizonte superior en las localidades; Emiliano Zapata y Nohakal (Rancho el Pentágono) Mpio. de Campeche (zona Norte) y Santa Cruz de Rovira, Nuevo Pénjamo y Yohaltún Mpio. de Champotón (valle de Yohaltún). La capa del suelo superficial aparece en las localidades antes mencionadas con manchas de menor dimensión. En cambio la capa del horizonte inferior refleja la misma distribución de la capa del horizonte superior. En cambio los rangos de concentraciones más bajas de 1.70 a 41.85 mg/kg y 41.86 a 58.00 mg/kg, se observa una mayor significancia de estos valores en el horizonte inferior, con una distribución de las concentraciones en la parte central de las 3 zonas (Norte, valle de Edzná y Yohaltún).

Cabe mencionar que solo se realizaron los mapas de líneas base (suelo superficial y horizonte superior) para los 8 elementos seleccionados como relevantes calcio (Ca), fósforo (P), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), selenio (Se), zinc (Zn) y lantano (La), en las figuras 48, 49, 51, 52, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 69 y 70. Y los mapas Puntuales de las concentraciones para el horizonte inferior en las figuras 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68 y 71, para los mismos elementos de suelos de la región.

Los elementos Cd, Pb y Se, se encuentran actualmente normados en nuestro país, estos mismos elementos aunado al Cu y Zn se encuentran normados por otros países debido a que están considerados como elementos potencialmente tóxicos. Los elementos como el La, Ca y P no se encontró referencia de contenidos en suelos agrícolas, sin embargo, el La se utilizó los valores de fondo de suelos agrícolas en el mundo, referidos por Kabata-Pendias (2011). En los casos del Ca y P se usó para comparar los valores obtenidos se usaron los valores de los estudios realizados en el Altiplano Potosino por Chiprés (2008) y en San Luis de la Paz por Hernández (2008) (Tabla 14).

Prácticamente los 5 elementos (Cd, Cu, Pb, Se y Zn) tanto en el Suelos superficial, Horizonte Superior y horizonte Inferior sus valores máximos no sobrepasan los valores de referencia (nacionales e internacionales). Pero en cambio los 6 elementos (Cd, Cu, Pb, se, Zn y La), mantienen una similitud a los valores de fondo de los suelos agrícolas del mundo, lo que confirma que los suelos de los valles centrales del Edo. de Campeche (Edzná y Yohaltún), no se encuentran impactados por actividades antrópicas.

Tabla 13. Valores de la media, mediana, mínimo y máximo de concentraciones de los elementos relevantes en los diferentes horizontes (suelo superficial, horizonte superior y horizonte inferior), del área de estudio comparados contra los valores de referencia ambientales de distintos países.

TABLA COMPARATIVA DE ELEMENTOS TRAZA Y MAYORES, CORRESPONDIENTE A LAS MUESTRAS DE SUELOS DE LOS VALLES EDZNÁ-YOHATÚN EN EL EDO. DE CAMPECHE

| Suelos de Campeche - Elementos Relevantes | | | | | | | | | | | | | Valores de Referencia: Suelos del Mundo, Estudios y Normatividad | | | | | | |
|---|--------------------------|--------|--------|---------|---------------------------|--------|--------|---------|---------------------------|--------|-------|---------|--|--------|-----------------------------|--------------------|-----------|--------|----------|
| Elem | Suelo Superficial (n=80) | | | | Horizonte Superior (n=32) | | | | Horizonte Inferior (n=32) | | | | Valor Fondo | | Valor de fondo y HA (mg/Kg) | | LMP EPT's | | |
| | M | Me | Min | Max | M | Me | Min | Max | M | Me | Min | Max | Prom | Max | Atliplano Potosino | San Luis de la Paz | NOM-147 | CANADA | ALEMANIA |
| Cd | 0.725 | 0.655 | 0.180 | 1.910 | 0.721 | 0.675 | 0.170 | 1.960 | 0.438 | 0.370 | 0.060 | 1.450 | 0.34 | 1.10 | 0.18-1.5 | 0.10-0.75 | 37 | 1.4 | 3 |
| Cu | 26.470 | 25.300 | 10.700 | 48.600 | 24.697 | 24.350 | 14.200 | 40.800 | 18.194 | 19.900 | 3.330 | 29.500 | 38.38 | 109.00 | 7.0 - 35.0 | 7.0-50.0 | --- | --- | 100 |
| Pb | 38.111 | 36.700 | 3.350 | 114.000 | 43.601 | 38.450 | 3.440 | 113.000 | 35.204 | 29.400 | 1.230 | 98.200 | 23.33 | 32.00 | 5.0-25.0 | 10.0-50.0 | 400 | 70 | 100 |
| Se | 1.518 | 1.500 | 0.600 | 3.000 | 1.531 | 1.400 | 0.600 | 3.100 | 1.169 | 1.100 | 0.500 | 2.400 | 0.30 | 0.70 | 2.88 | 0.5-20 | 390 | 1 | 10 |
| Zn | 72.150 | 61.300 | 27.200 | 773.000 | 63.728 | 67.650 | 24.7 | 86.300 | 48.784 | 59.300 | 6.000 | 79.000 | 69.52 | 89.00 | 25-125 | 40.0-160 | --- | 200 | 300 |
| La | 59.196 | 54.600 | 4.200 | 171.000 | 68.241 | 58.000 | 4.500 | 171.000 | 49.369 | 50.350 | 1.700 | 141.000 | 29.83 | 37.00 | | | --- | --- | --- |
| % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | 3.902 | 1.315 | 0.350 | 27.200 | 4.577 | 1.190 | 0.340 | 28.400 | 10.625 | 1.225 | 0.210 | 37.600 | --- | --- | 0.146 | 0.160 | --- | --- | --- |
| P | 0.030 | 0.025 | 0.003 | 0.177 | 0.021 | 0.015 | 0.001 | 0.134 | 0.006 | 0.004 | 0.001 | 0.034 | --- | --- | 0.059 | 0.04 | --- | --- | --- |

M: Media, Min: valor mínimo; Max: Valor máximo, Prom.: promedio. Suelo Superficial : muestra obtenida de la superficie del terreno en 1 m x 1m x 5 cm. Horizonte Superior: muestra de los perfiles correspondientes a los HA ó HC1. Horizonte Inferior. Muestra de los perfiles correspondiente a los HB, HC ó HC2. Valor de Fondo: Kabata-Pendias, Alina. Trace elements in soils and plants (4th ed. Pag. 41 y 42, 2011), suelos agrícolas. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Kloe (1980), Mitteilungen des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs und Forschungsanstalten

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

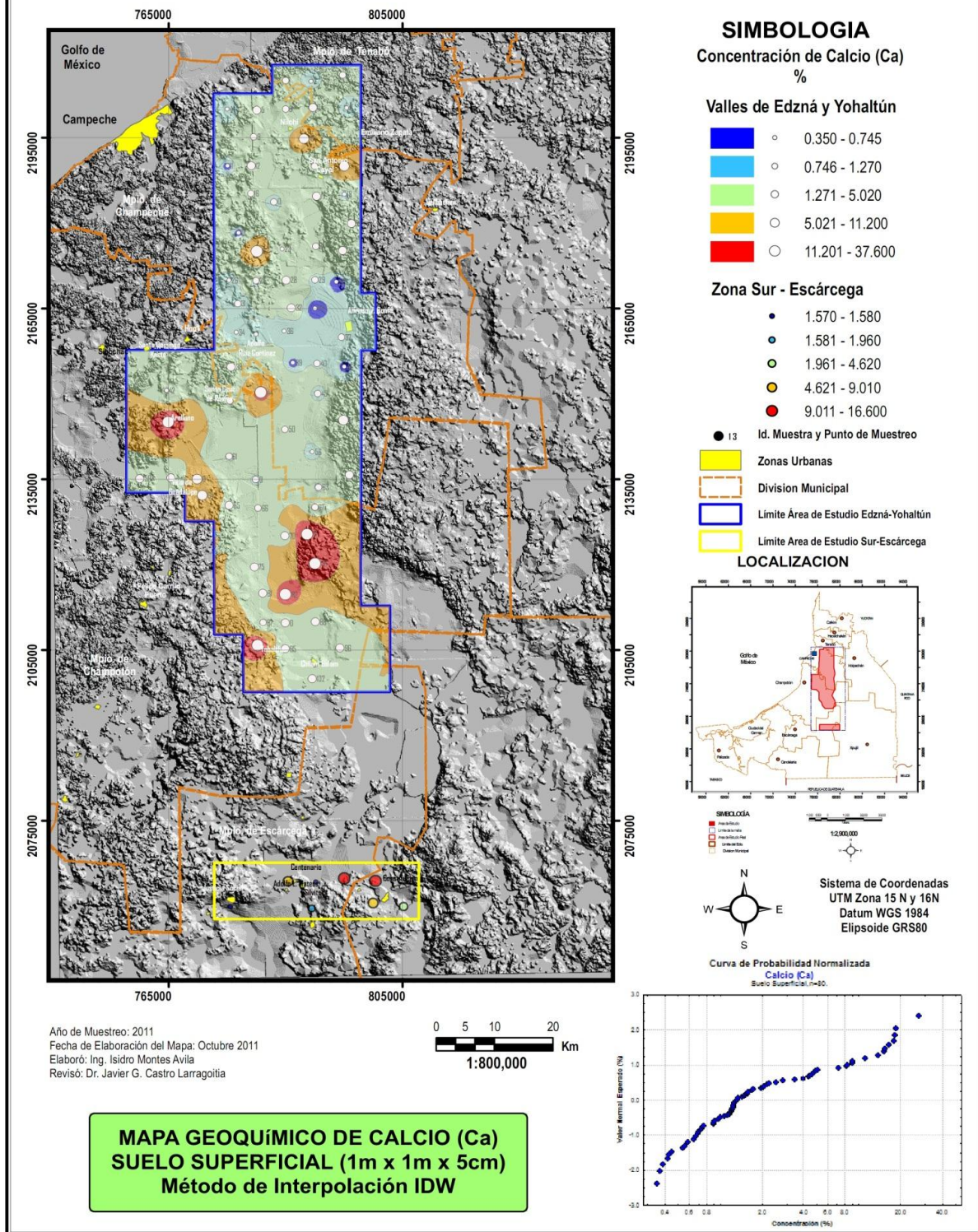


Figura 49. Mapa geoquímico de calcio en el suelo superficial (1mx1mx5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

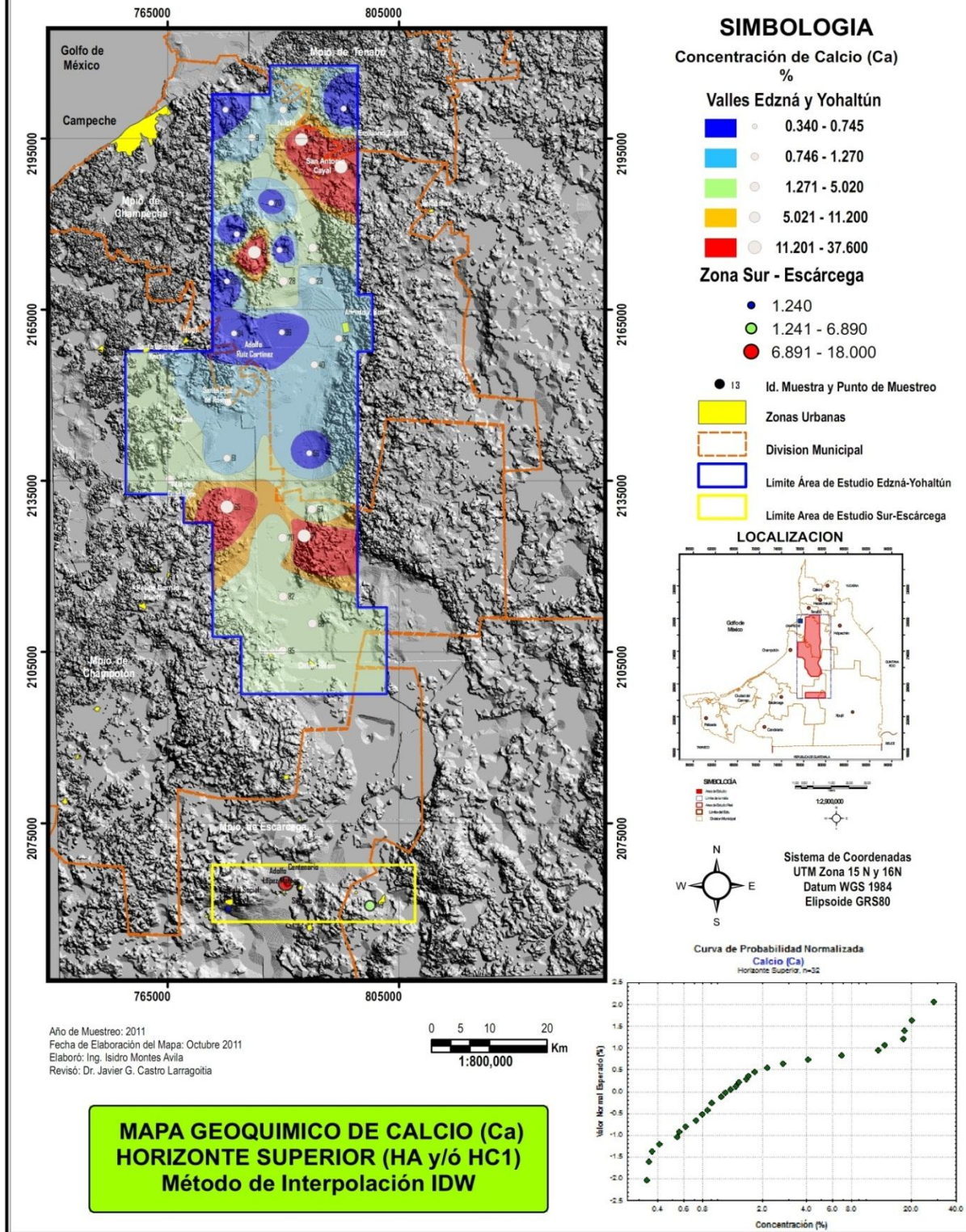


Figura 50. Mapa geoquímico de calcio en el horizonte superior (HA ó HC1), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

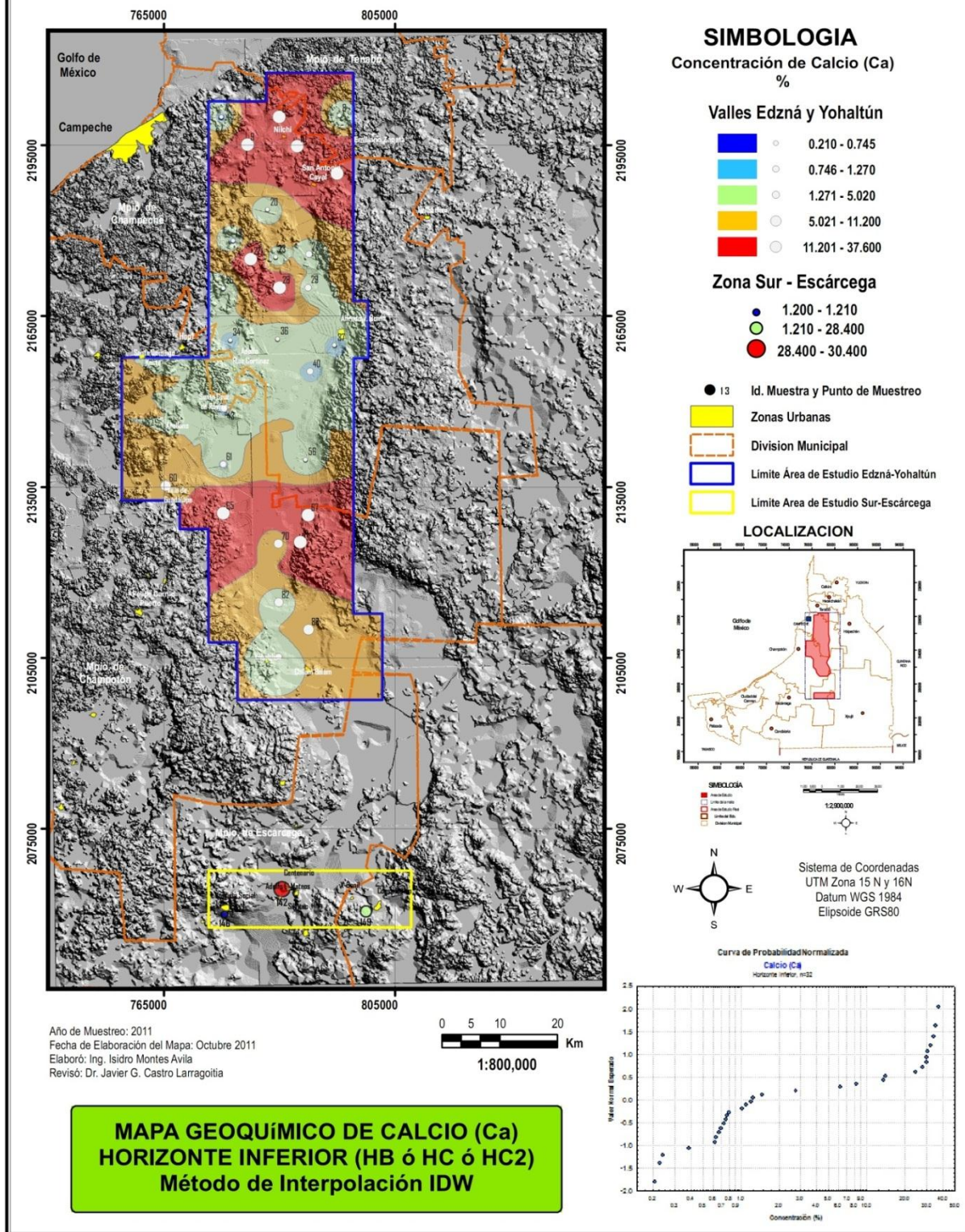


Figura 51. Mapa geoquímico de calcio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

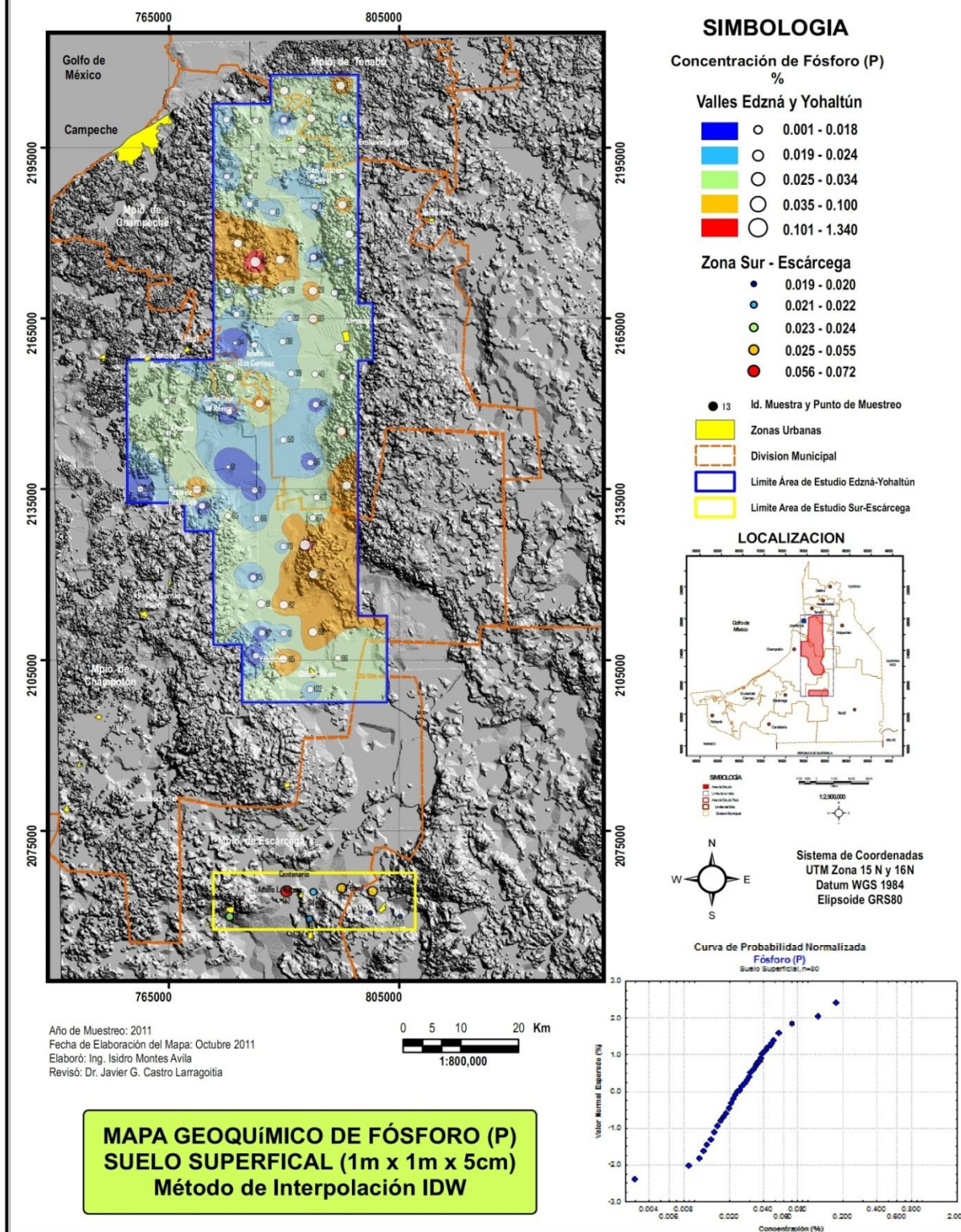


Figura 52. Mapa geoquímico de fósforo en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

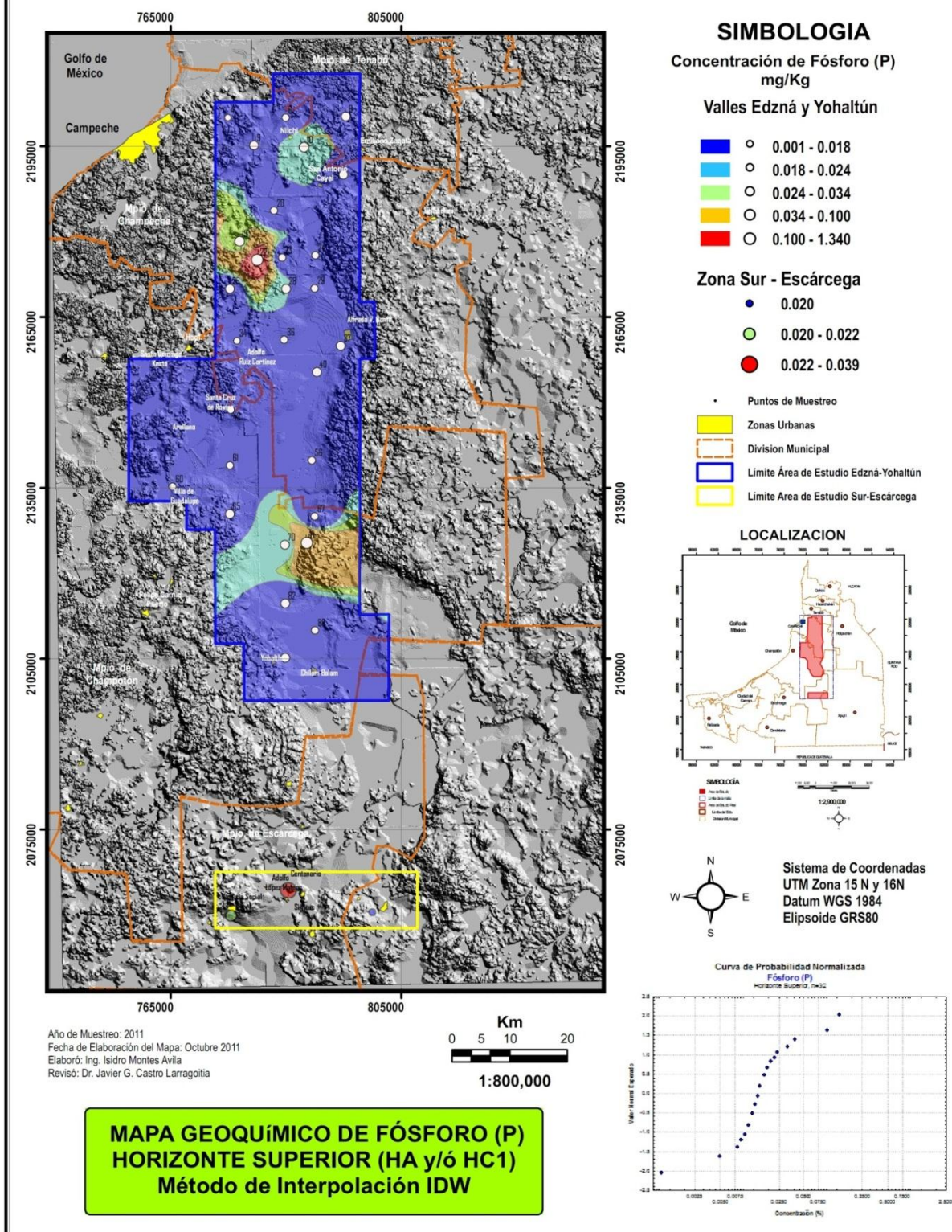


Figura 53. Mapa geoquímico de fósforo en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

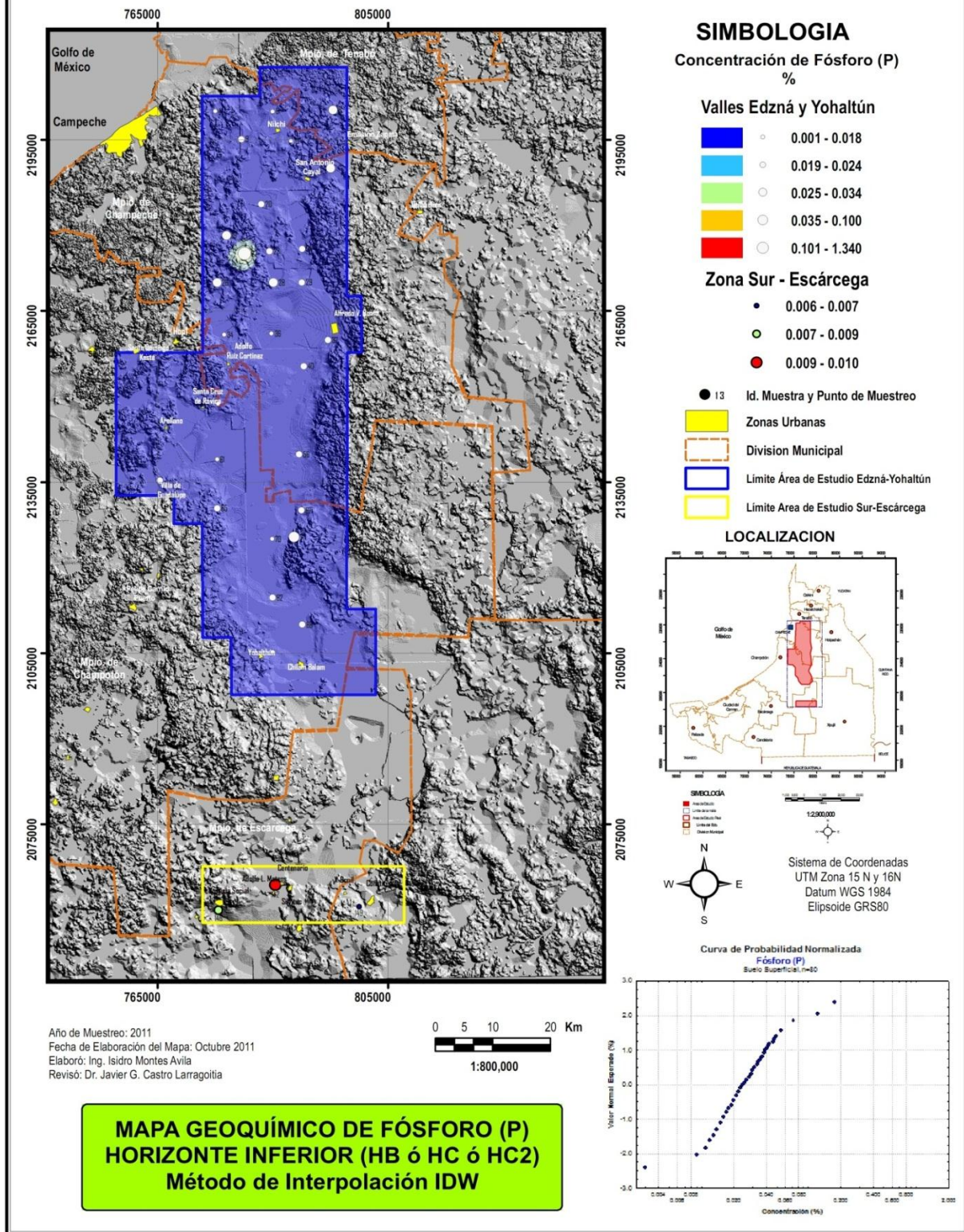


Figura 54. Mapa geoquímico de fósforo en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

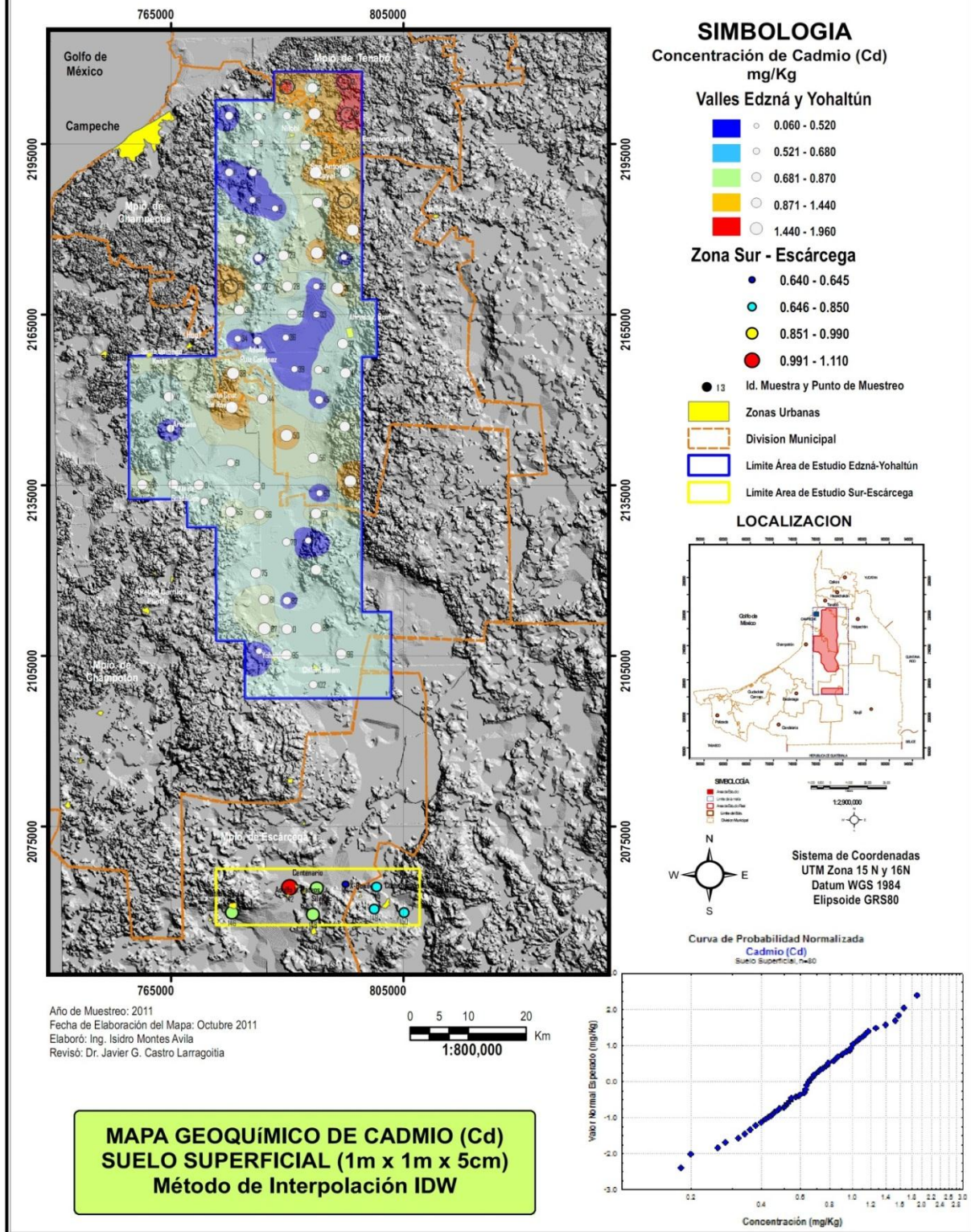


Figura 55. Mapa geoquímico de cadmio en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

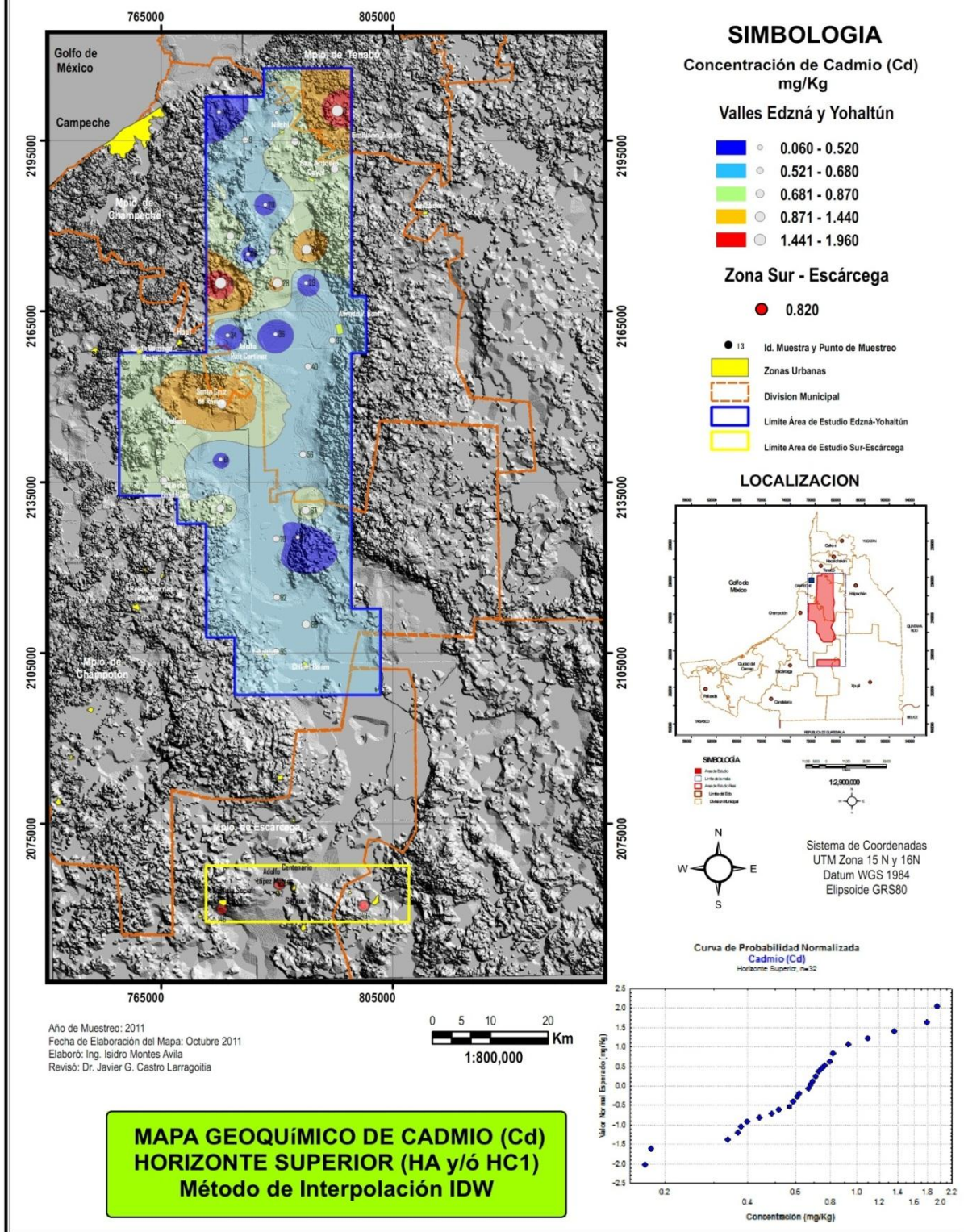


Figura 56. Mapa geoquímico de cadmio en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

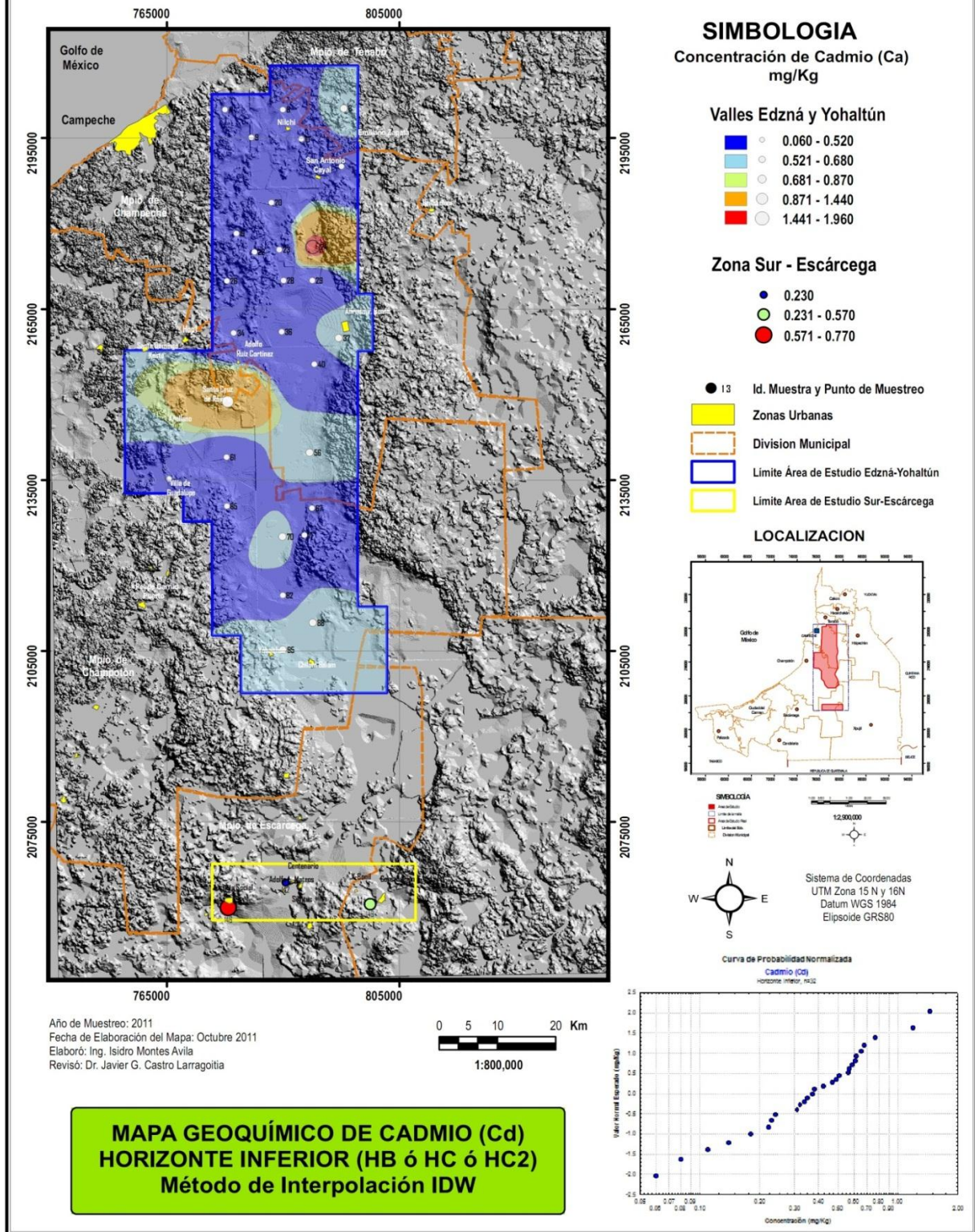


Figura 57. Mapa geoquímico de cadmio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

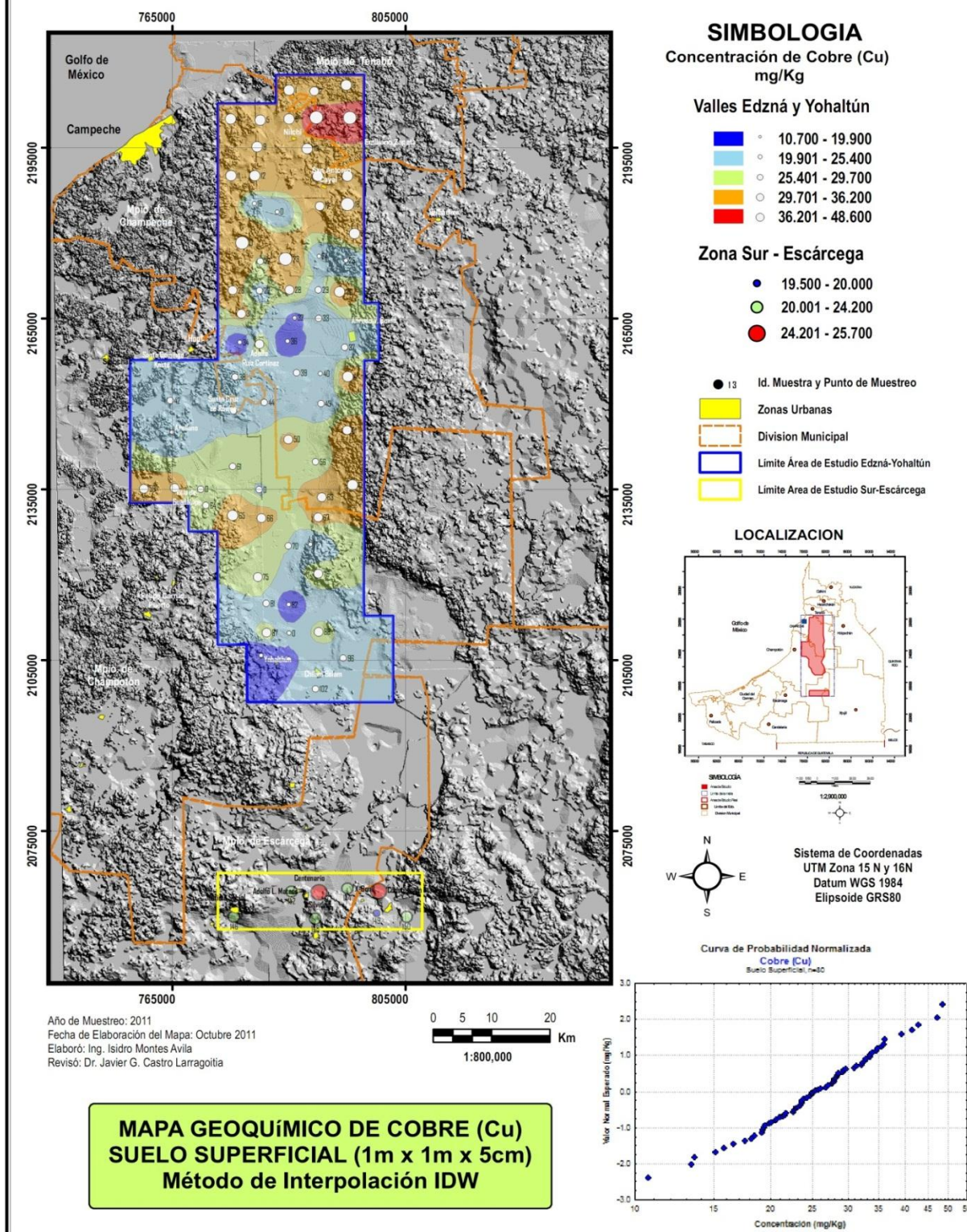


Figura 58. Mapa geoquímico de cobre en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

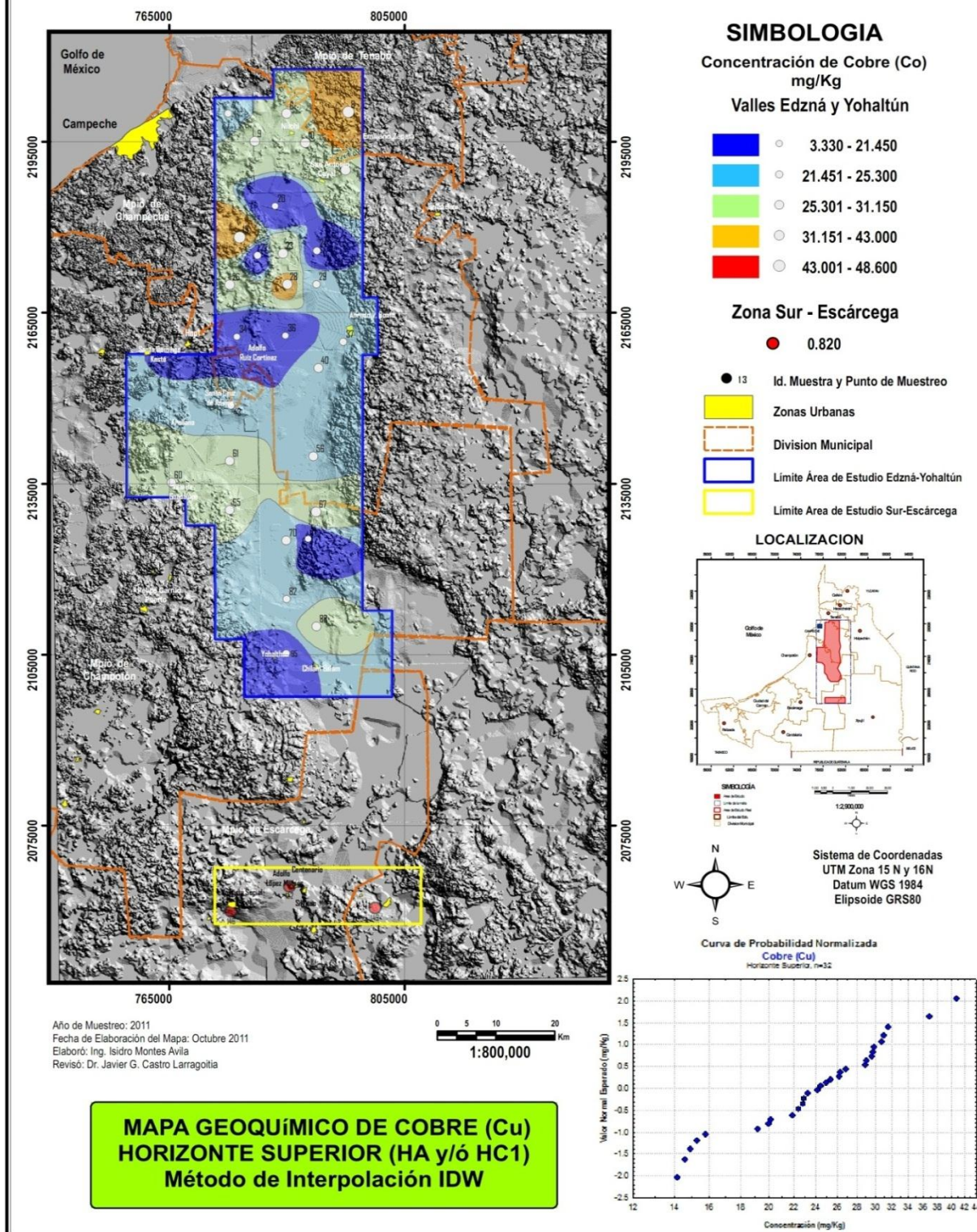


Figura 59. Mapa geoquímico de cobre en el horizonte superior (HA ó HC1), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

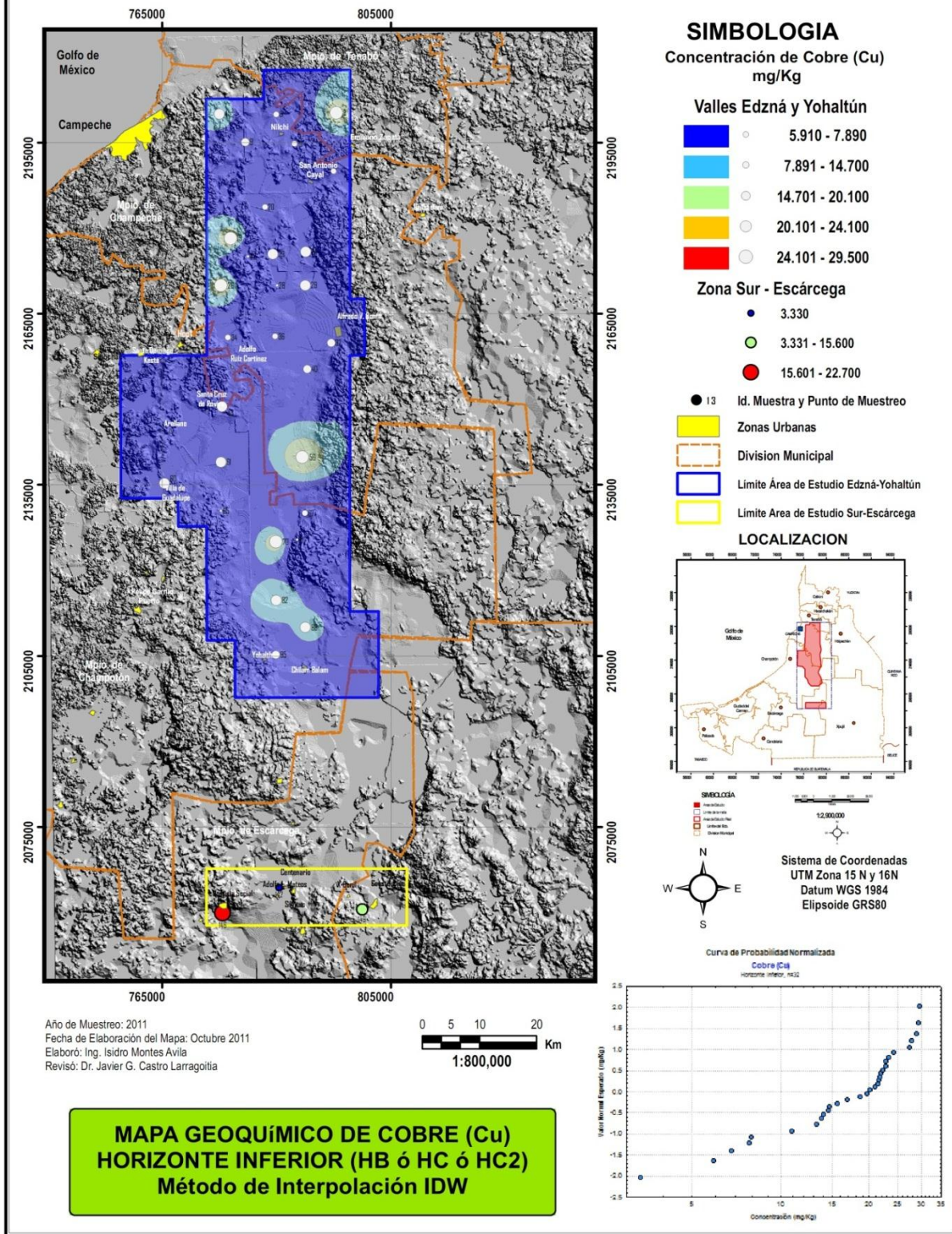


Figura 60. Mapa geoquímico de cobre en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

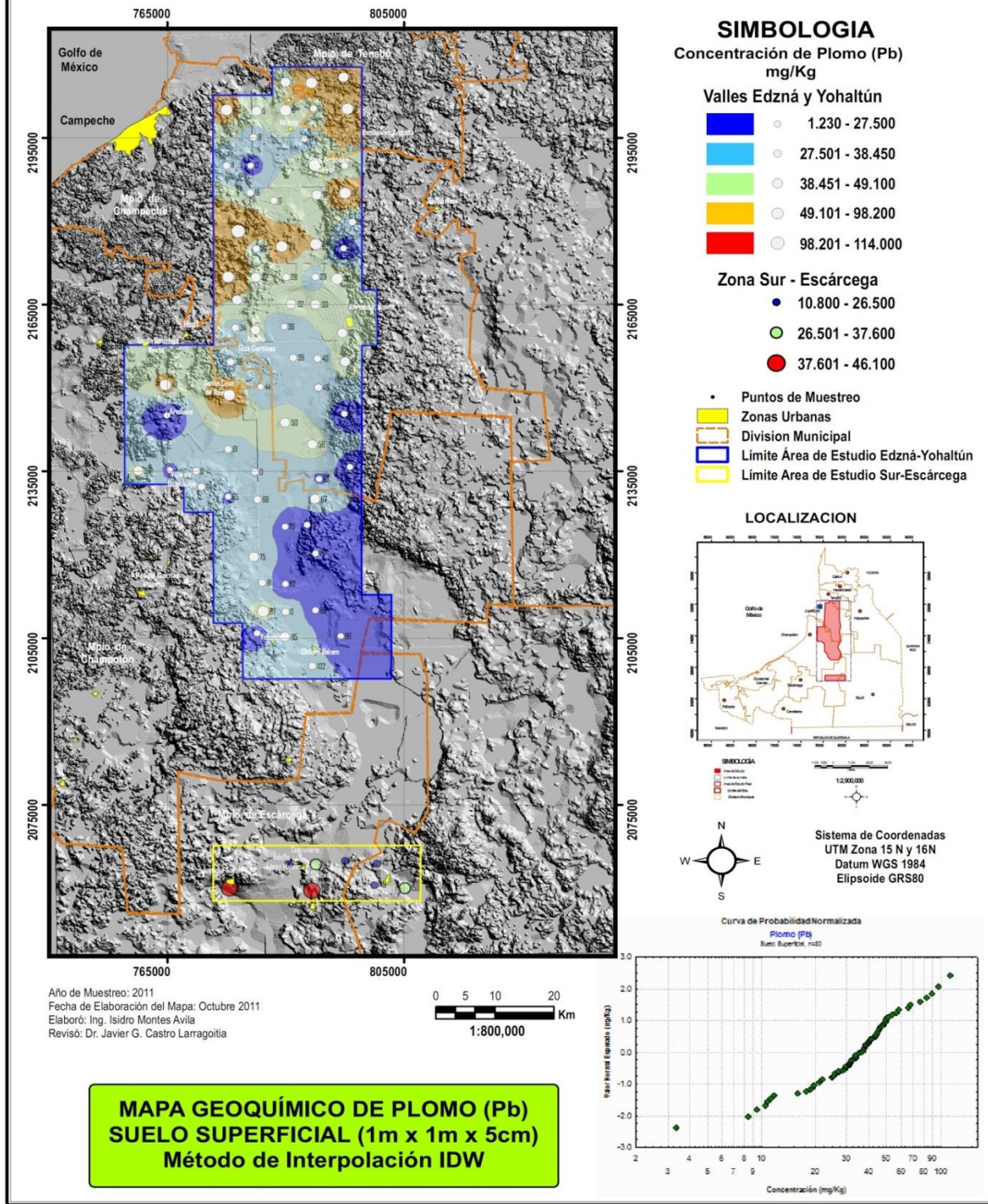


Figura 61. Mapa geoquímico de plomo en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

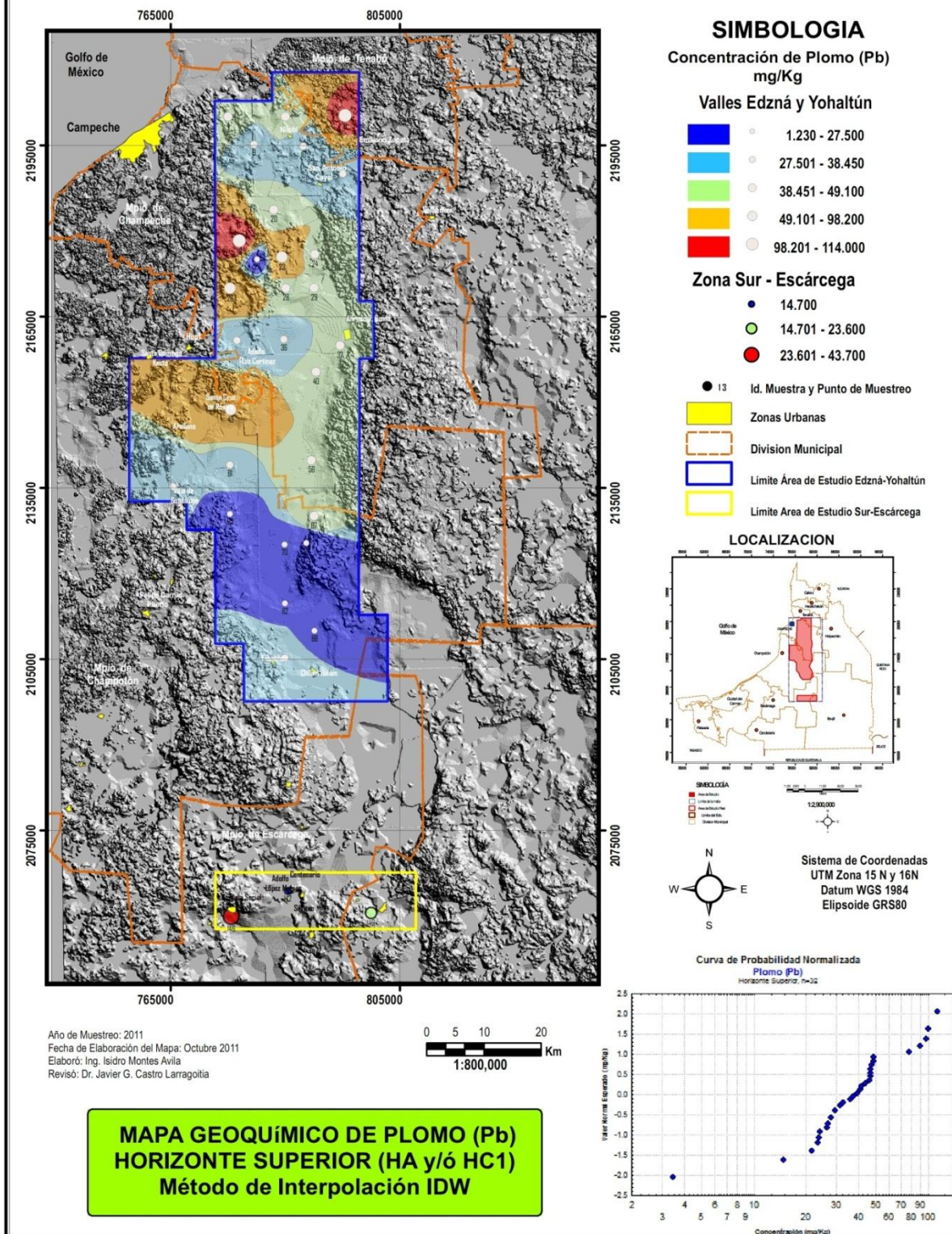


Figura 62. Mapa geoquímico de plomo en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

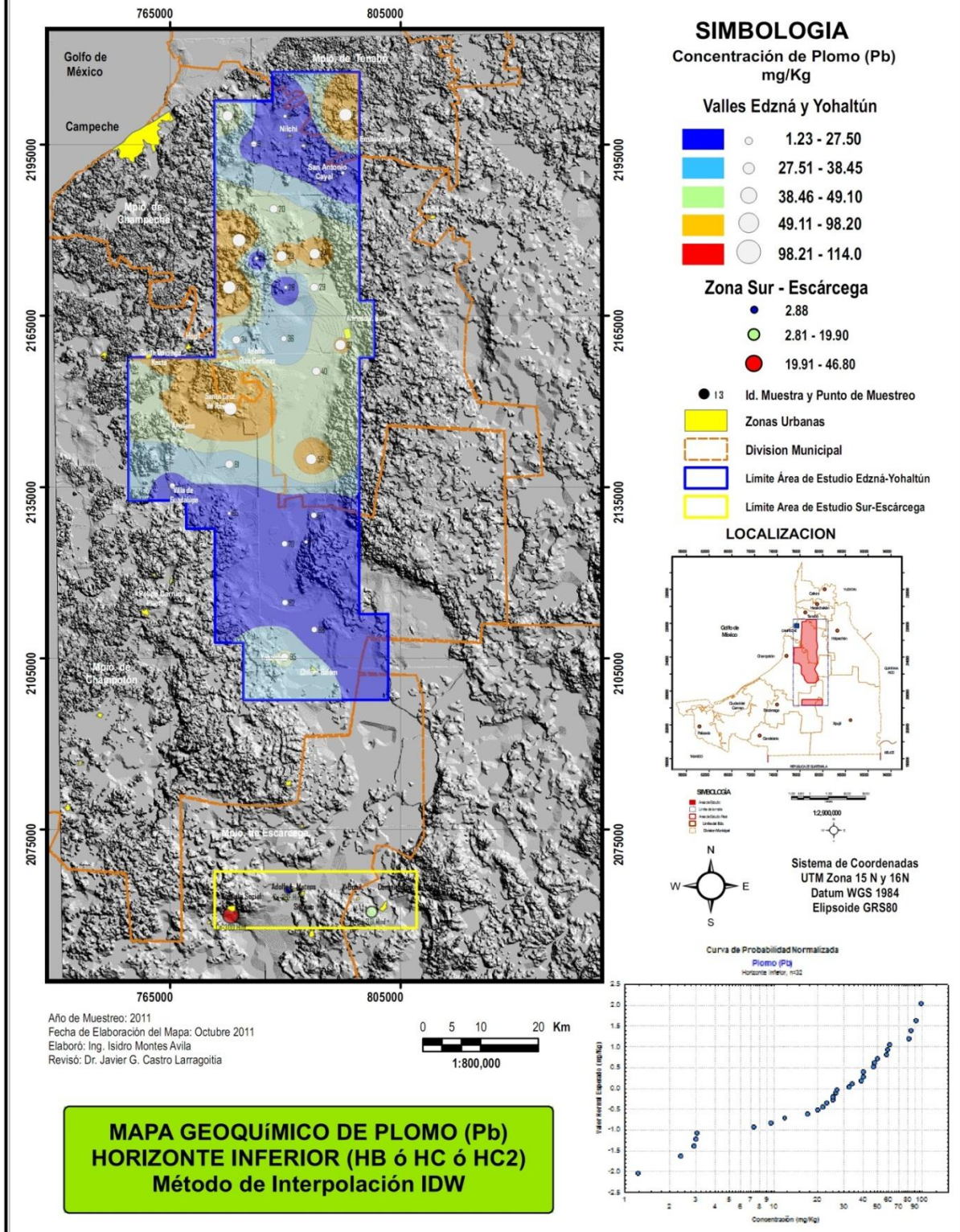


Figura 63. Mapa geoquímico de plomo en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

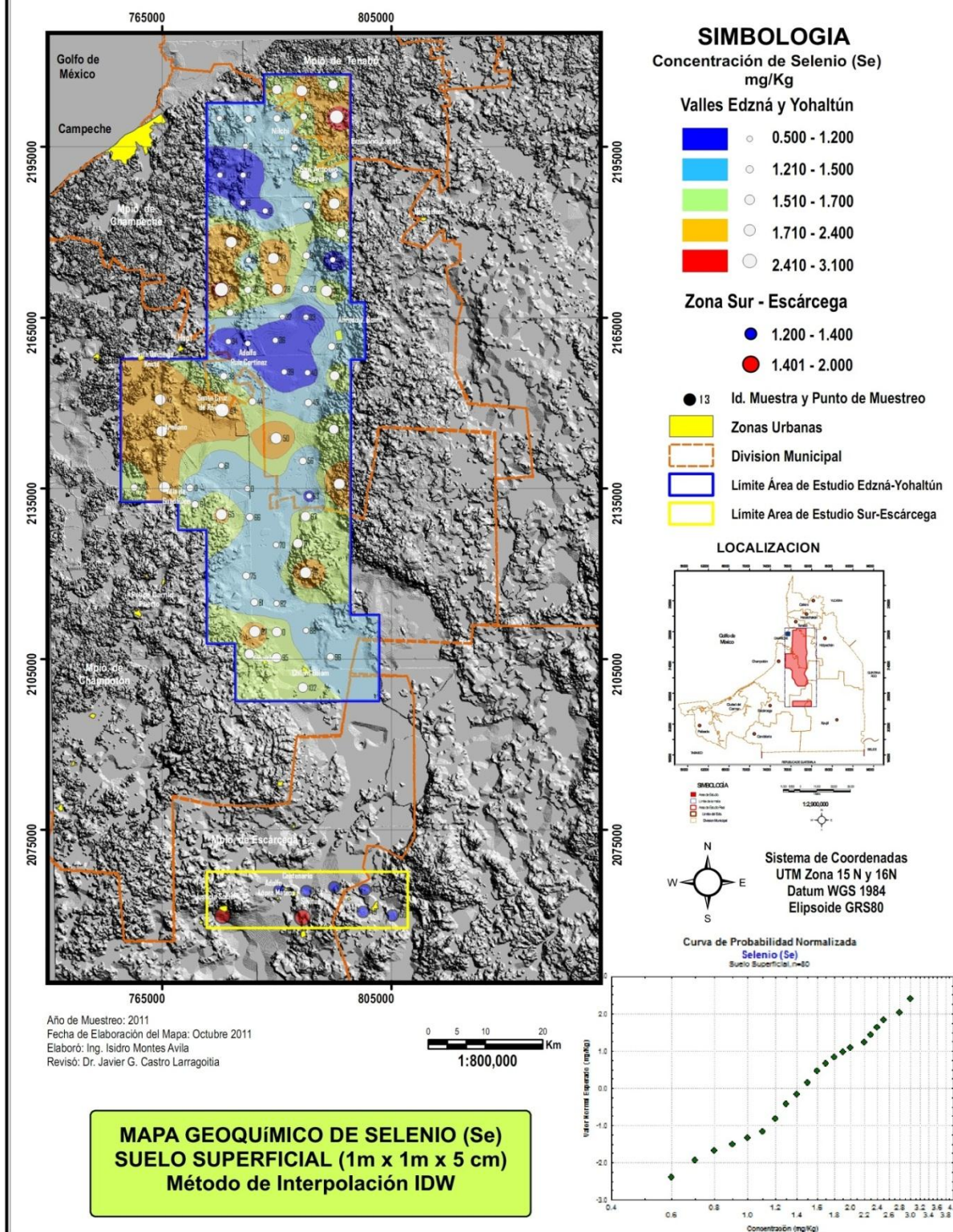


Figura 64. Mapa geoquímico de selenio en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

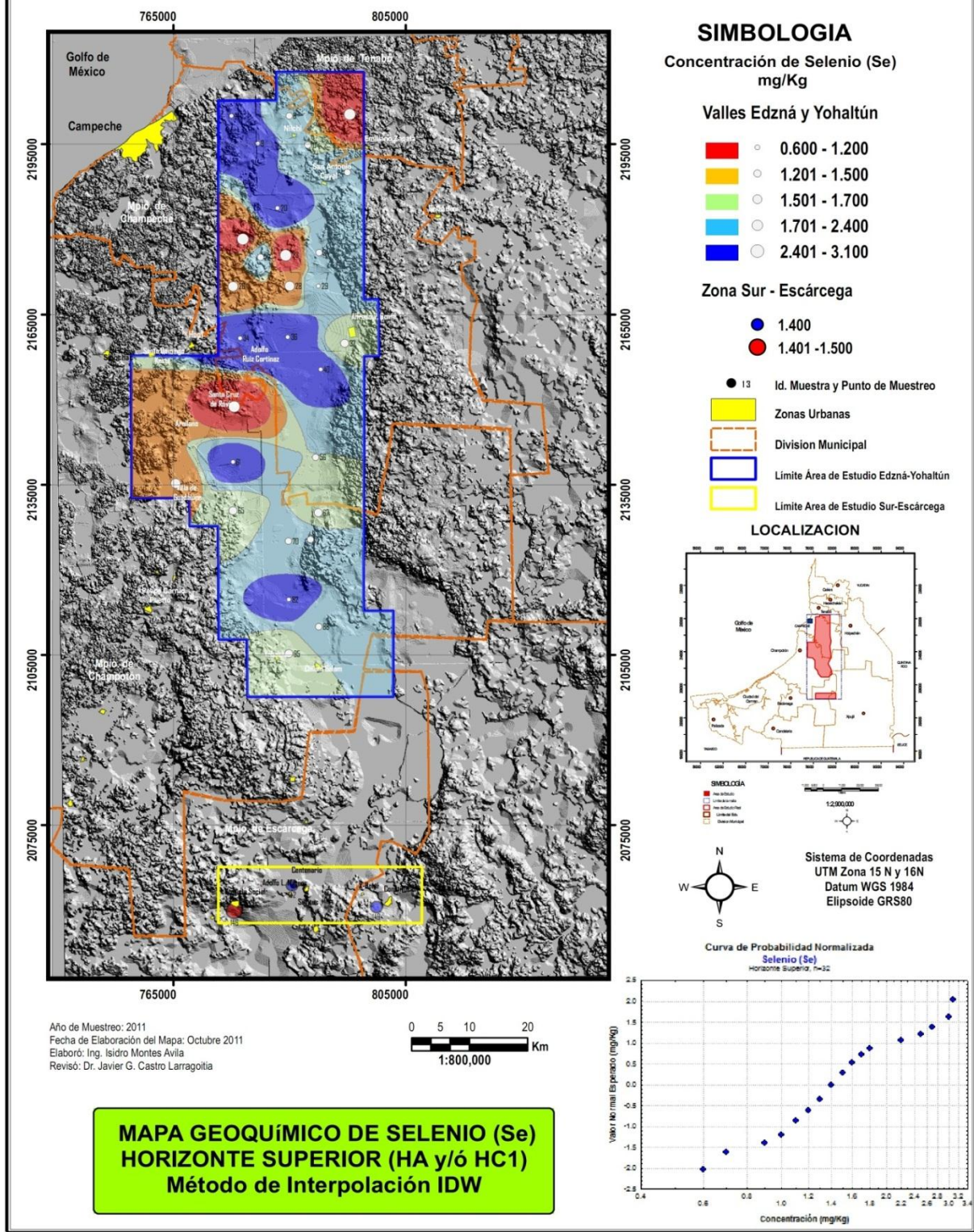


Figura 65. Mapa geoquímico de selenio en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

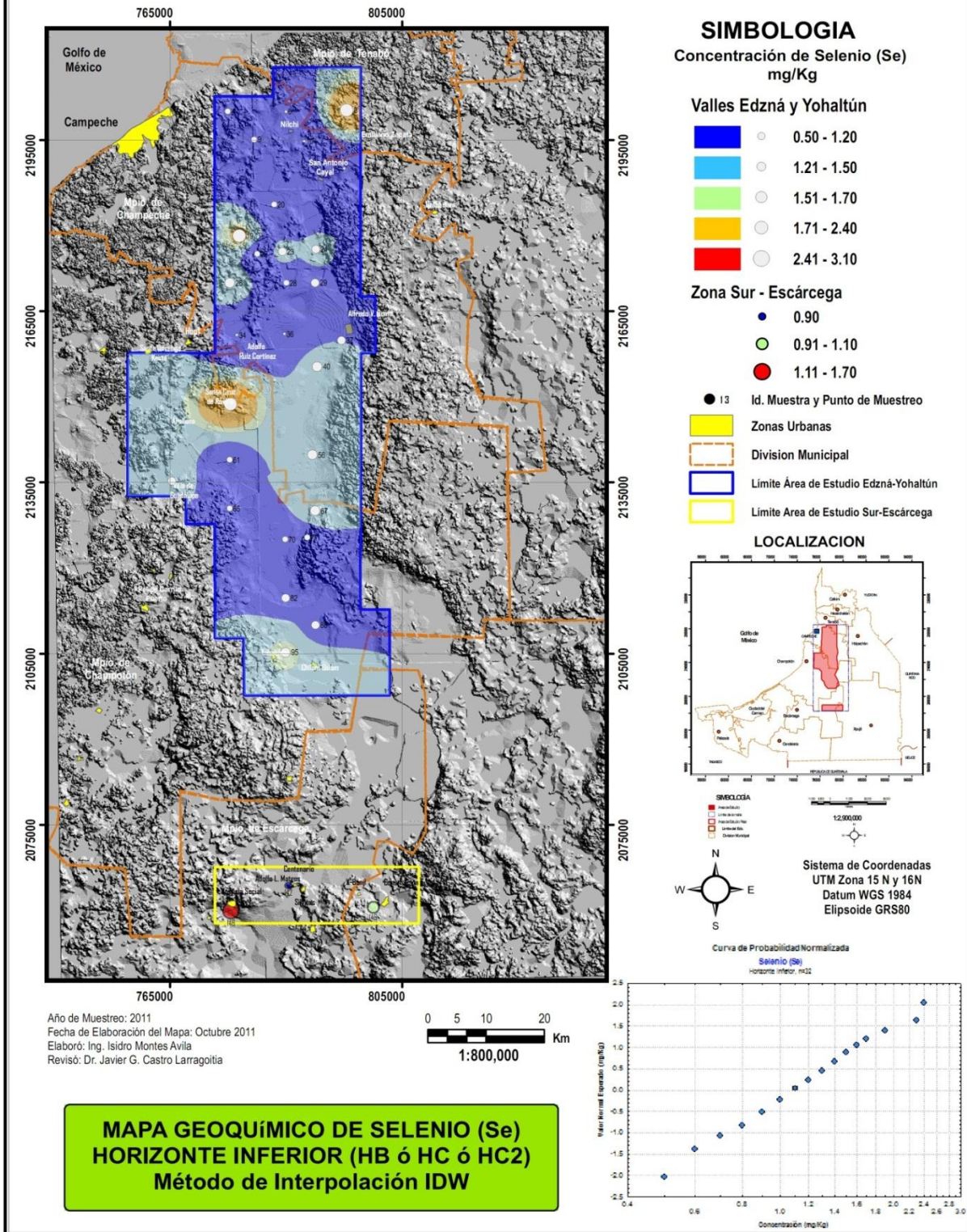


Figura 66. Mapa geoquímico de selenio en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

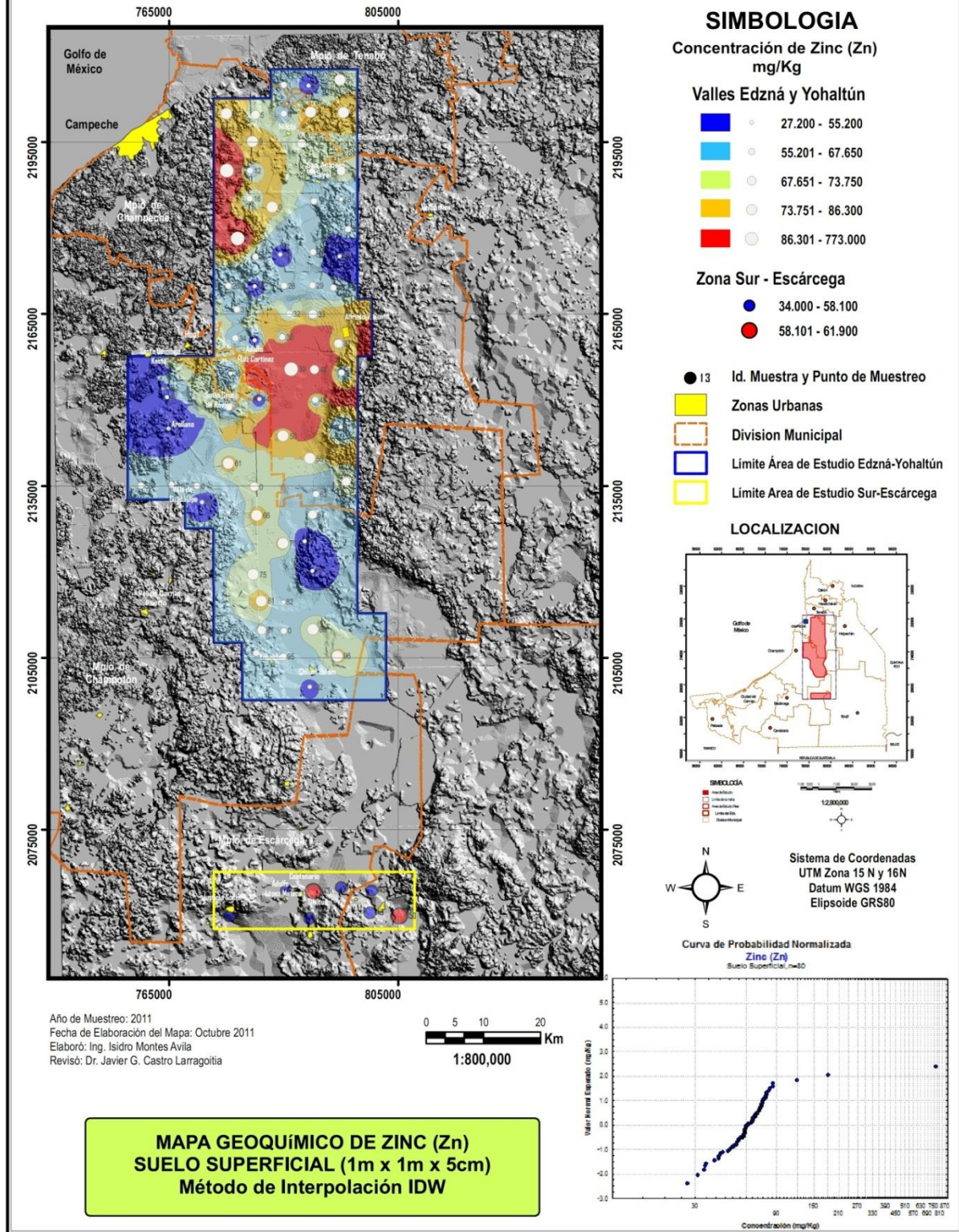


Figura 67. Mapa geoquímico de zinc en el suelo superficial (1m x 1m x 5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

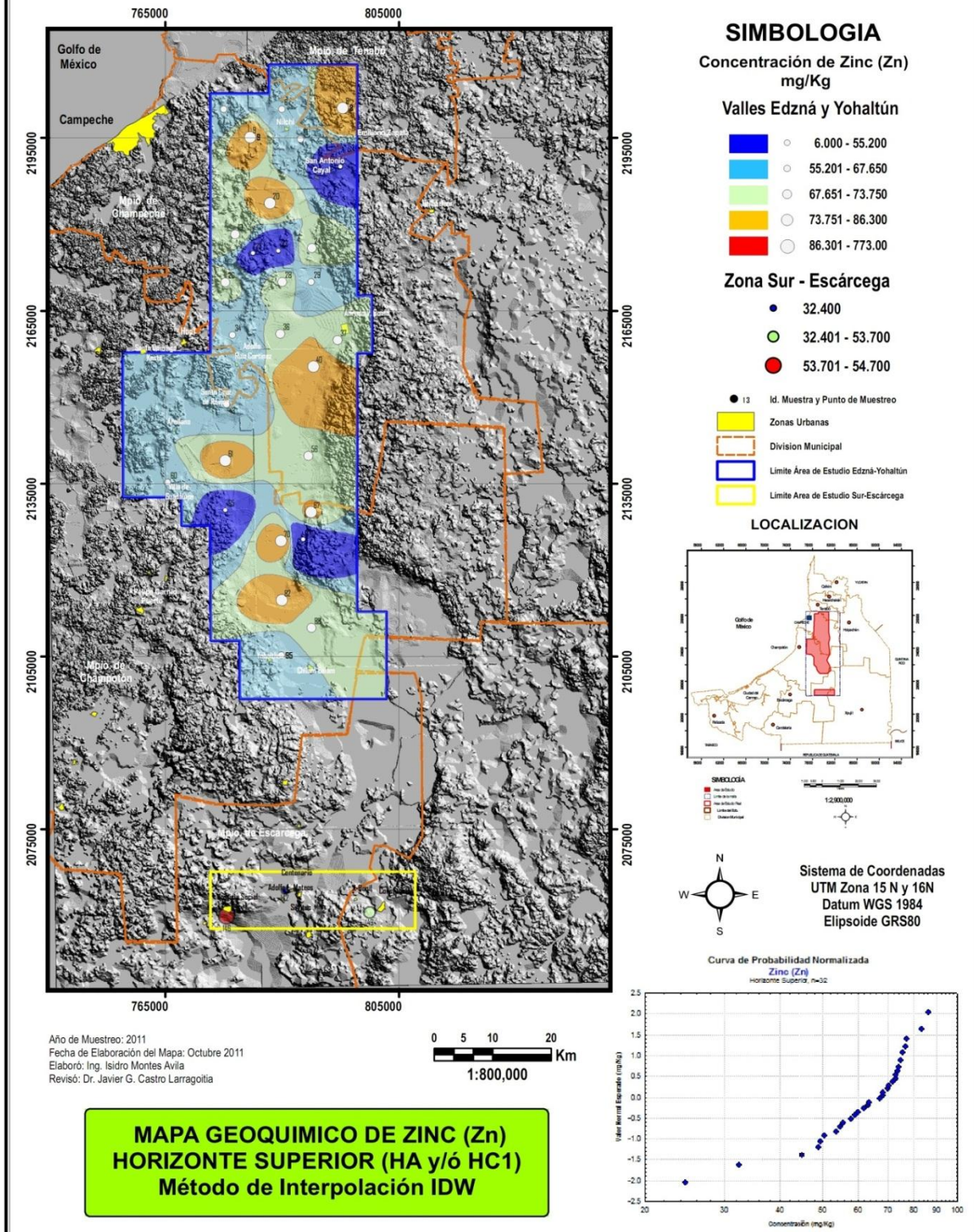


Figura 68. Mapa geoquímico de zinc en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

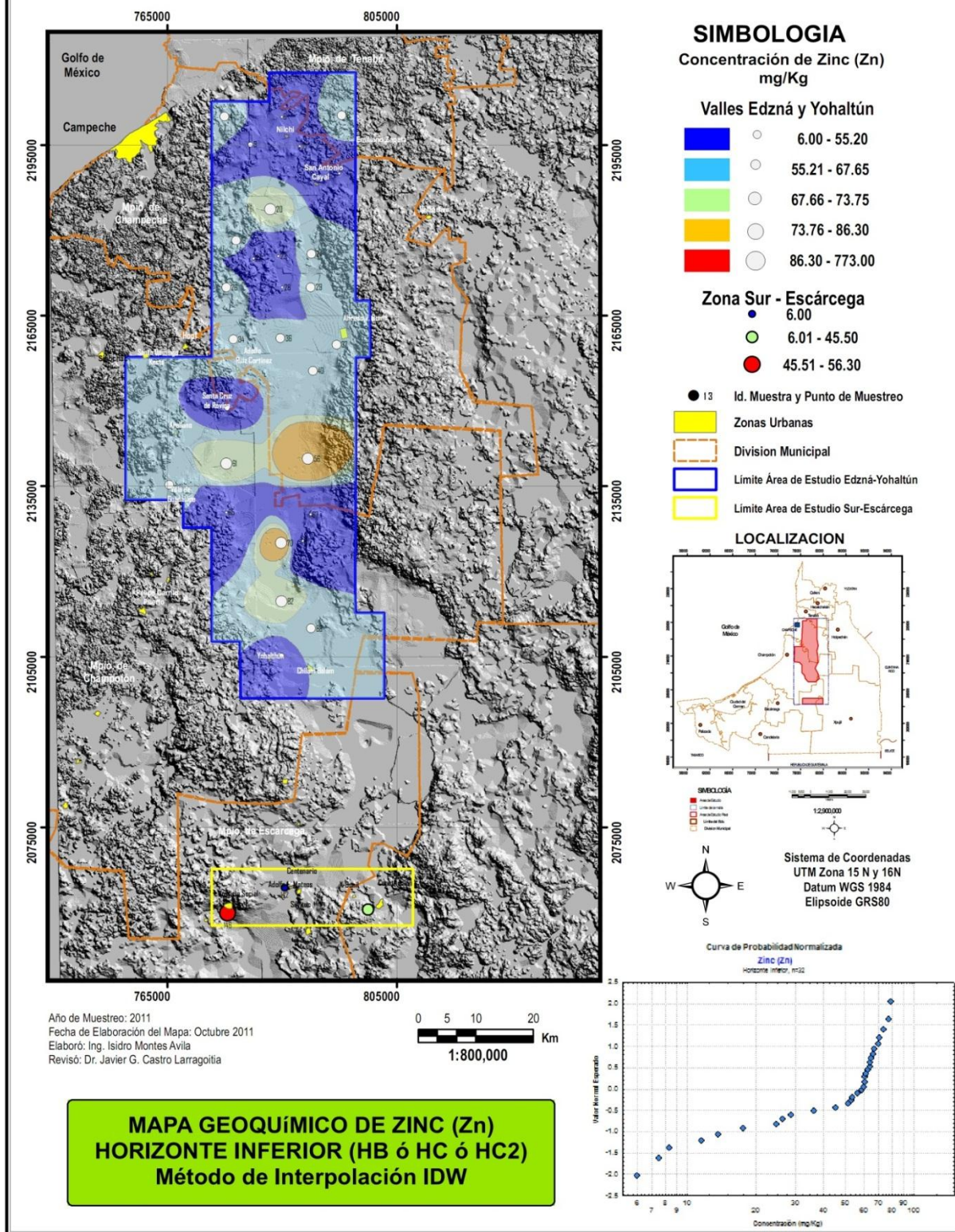


Figura 69. Mapa geoquímico de zinc en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

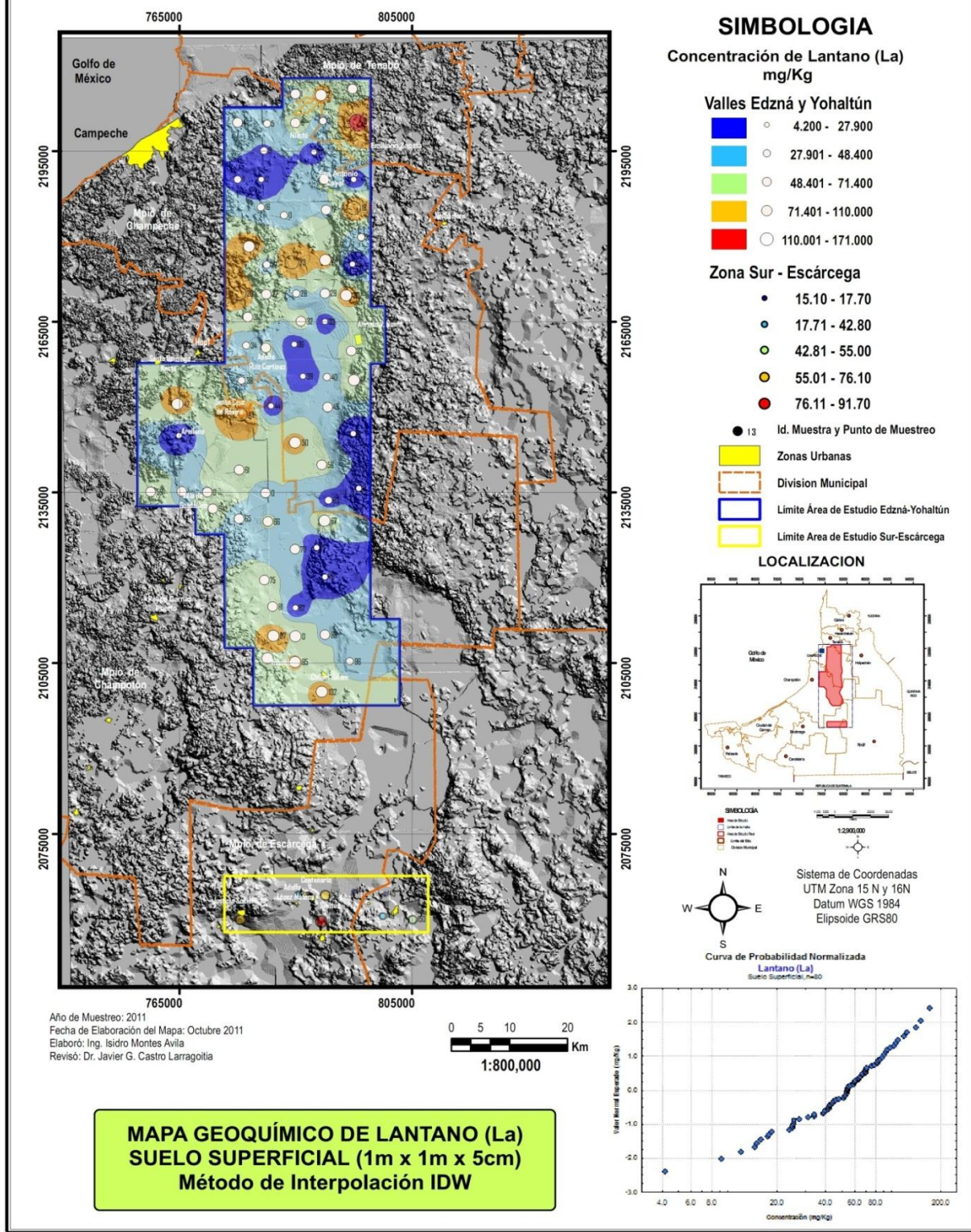


Figura 70. Mapa geoquímico de lantano en el suelo superficial (1mx1mx5cm), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

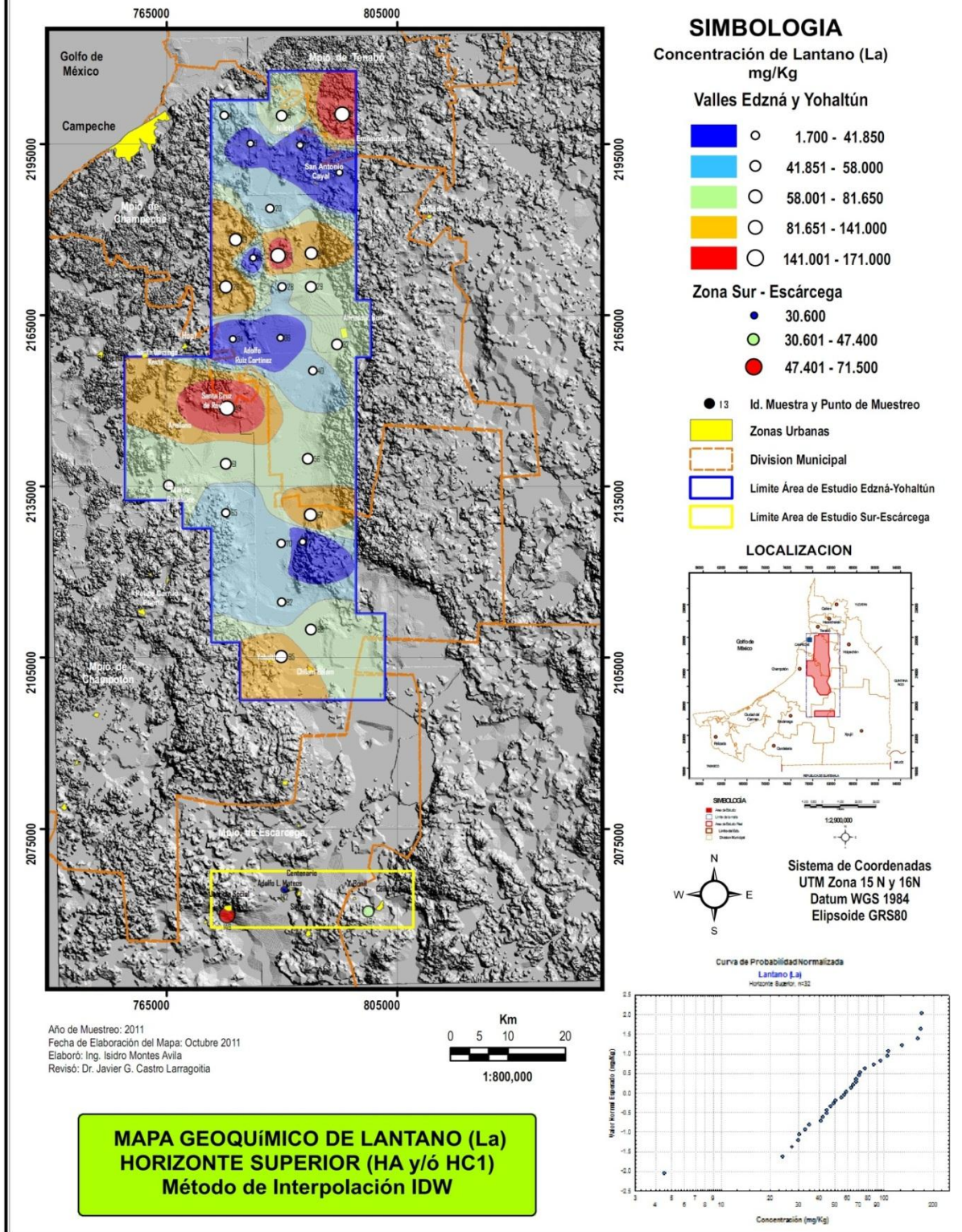


Figura 71. Mapa geoquímico de lantano en el horizonte superior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

Valles Centrales del Edo. de Campeche Edzná y Yohaltún

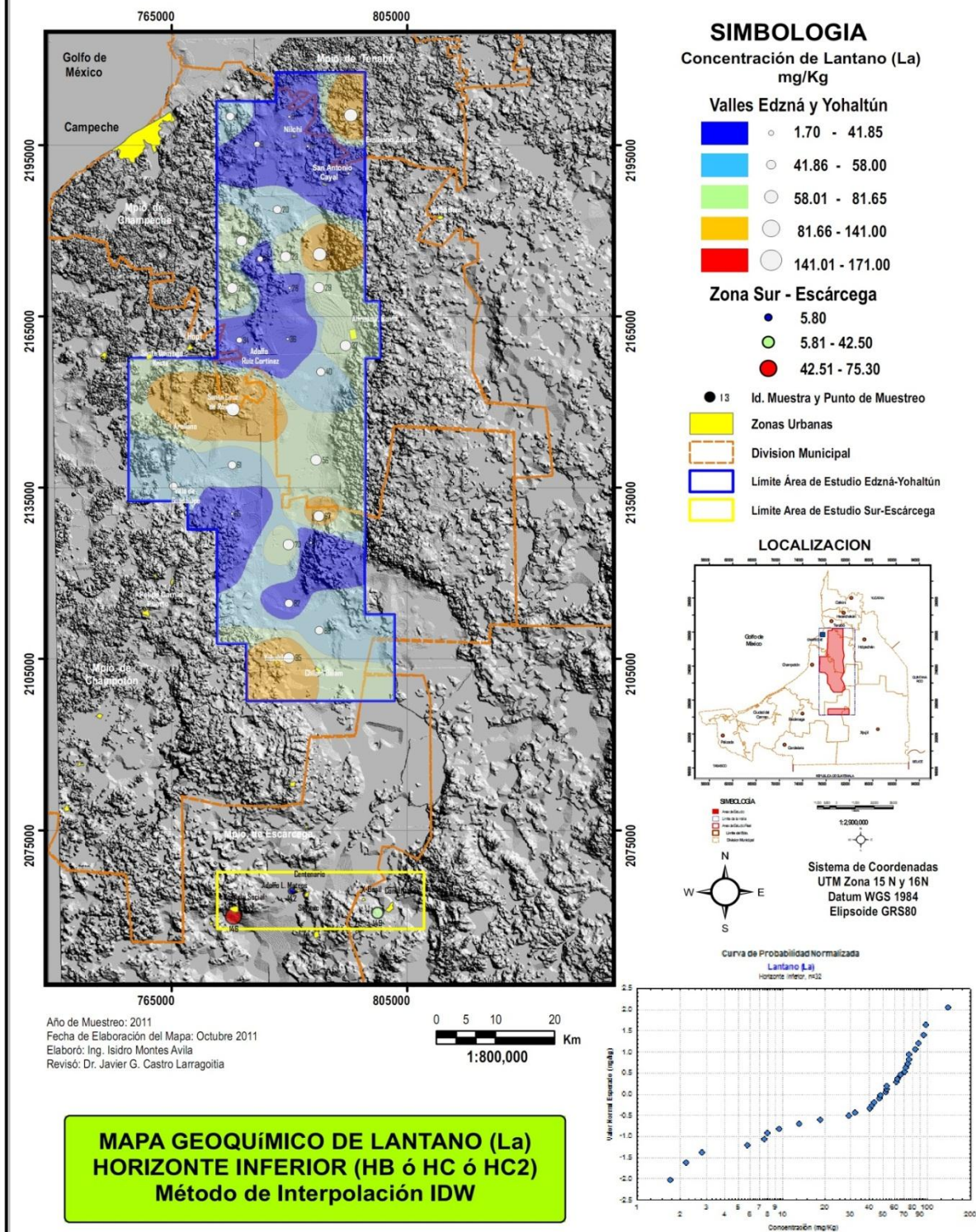


Figura 72. Mapa geoquímico de lantano en el horizonte inferior (HB, HC ó HC2), en los valles centrales del Edo. de Campeche.

V.- DISCUSIÓN.

Se ha desarrollado, a través de un estudio geoquímico escala regional, en los valles centrales Edzná y Yohaltún del estado de Campeche, en el cual se identificaron y caracterizaron los diversos tipos de suelo, considerando el marco natural y su uso donde han sido sometidos principalmente a actividades agrícolas y ganaderas, y así establecer los valores de fondo y líneas base que conforman el paisaje geoquímico actual.

Durante la etapa de muestreo, era de gran importancia la identificación de los diferentes tipos de suelo, en los valles de Edzná y Yohaltún. Utilizando la Clasificación WRB 2000 (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo), se identificaron los siguientes grupos: Pheozem (44%), Vertisol (39%), Gleysol (9%), Luvisol (5%), Leptosol (2%) y Nitisol (1%) (Figura 72 y anexo 2)

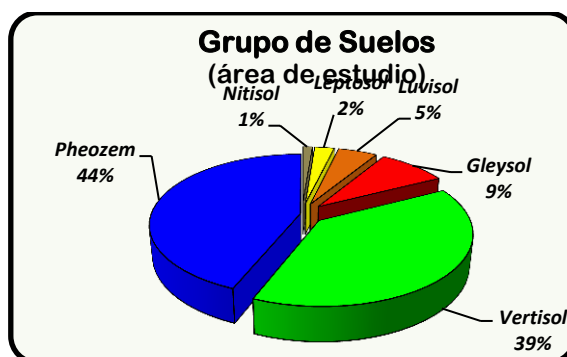


Figura 73. Gráfico sobre la distribución de los diferentes grupos de suelos en el área de estudio.

Los resultados de la caracterización mineralógica del sitio, a través de técnica de difracción por rayos X, permiten identificar las fases mineralógicas que están presentes en los suelos del área de estudio, formados principalmente por minerales del grupo de las arcillas (Filosilicatos), como cuarzo, beidelita, caolinita, esmectita y halloysita ([subcapítulo II.2.2](#)), estos minerales juegan un rol importante en la distribución espacial de las concentraciones de los elementos traza, dando forma al paisaje geoquímico del sitio.

La aplicación de técnica de extracción de la fracción móvil, con la simulación del agua meteórica (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), aporta importante información sobre la movilidad de los elementos traza. Los resultados obtenidos de esta prueba, presentan el siguiente comportamiento en movilidad, $Zn > Se > Cd > Cu > Pb > La$. ([Tabla 15](#)).

Tabla 14. Movilidad de los elementos químicos relevantes en base al promedio en %, en el área de Estudio (por zonas y horizontes).

| ZONAS | Horizonte Superior | | | | | | Horizonte Inferior | | | | | |
|--------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-------|
| | MOVILIDAD | | | | | | MOVILIDAD | | | | | |
| Norte | La | Pb | Cu | Se | Cd | Zn | La | Pb | Se | Cu | Cd | Zn |
| | 0.14 | 0.21 | 0.49 | 1.02 | 1.44 | 9.13 | 0.11 | 0.17 | 0.63 | 0.87 | 1.17 | 2.96 |
| Centro Valle de Edzná | La | Pb | Cu | Cd | Se | Zn | La | Pb | Cu | Cd | Se | Zn |
| | 0.17 | 0.48 | 0.84 | 1.36 | 1.57 | 2.62 | 0.24 | 0.31 | 0.85 | 1.46 | 1.87 | 10.31 |
| Centro Valle de Yohaltún | La | Cu | Pb | Cd | Se | Zn | La | Cu | Pb | Cd | Zn | Se |
| | 0.16 | 0.52 | 0.67 | 1.16 | 2.61 | 8.17 | 0.14 | 0.61 | 0.78 | 1.55 | 2.59 | 3.04 |
| Sur Escárcega | La | Cu | Pb | Cd | Zn | Se | Cd | Cu | La | Pb | Se | Zn |
| | 0.15 | 0.27 | 0.31 | 0.37 | 2.19 | 2.98 | 0.43 | 0.97 | 1.10 | 1.38 | 2.65 | 3.99 |

En la zona de estudio los elementos que presenta mayor movilidad es el zinc en ambos horizontes, este elemento comúnmente su inmovilización en los suelos está muy controlada por el fósforo y arcillas (Kumpiene *et al.*, 2008). Kabata-Pendias y Krakowiak (1998) calcula que la fracción arcilla controla hasta un 60% de Zn en los suelos. Al parecer, hay dos mecanismos diferentes de Zn absorción: una en medio ácido en relación con los sitios de intercambio catiónico, y el otro en medio alcalino que es considerada como la quimisorción y es muy influenciado por ligandos orgánicos. Este último mecanismo es factible que esté actuando en la movilidad del Zn en el área de estudio.

Para el presente trabajo se puso en práctica la metodología propuesta por Chiprés *et al.*, (2008), basada principalmente en la Técnica EDA-SDA, que permite establecer y visualizar espacialmente los patrones mostrados por las herramientas estadísticas. La aplicación de esta metodología fue capaz de identificar áreas específicas con zonas por encima o por debajo de los valores de fondo que se asocian a las actividades actuales.

Las actividades agrícolas y ganaderas aunadas a las propiedades edafológicas de los suelos (composición mineralógicas, pH, adsorción, etc.) juegan un papel importante sobre los patrones de distribución de elementos químicos en los valles centrales del Edo. de Campeche de esta manera, y dado el diseño de muestreo, los valores de fondo tienen como es lógico una fuerte componente natural (en este caso arcillas). A pesar de esta posible situación, los rangos de fondo obtenidos son una referencia útil (y hasta el momento la única) que refleja el estado geoquímico natural de los suelos. Al comparar los resultados obtenidos en de los valles centrales en el Estado de Campeche, con otros valores de referencia normativos (nacionales e internacionales), es posible apreciar que se encuentran por debajo de las concentraciones promedio de algunos EPT's, y muy similares a los valores de fondo de los suelos agrícolas del mundo lo cual es un indicio de que el área de estudio es una zona geoquímicamente que no presenta impacto antropogénicos (contaminación).

Las herramientas estadísticas que son la base de este estudio para la selección de los elementos relevantes, determinación de los valores de fondo y elaboración de los mapas geoquímicos las usadas principalmente son: Estadísticas descriptivas, Box Plots y gráficas de probabilidad Normalizadas.

En los suelos, los elementos traza proceden fundamentalmente del material original, mientras que la edafogénesis puede llegar a concentrarlos o a diluirlos; por tanto, el rango de un determinado elemento traza en los suelos de una región puede variar en función de los factores y procesos edafogénéticos que la han afectado a lo largo de su historia, así como por la dinámica general del medio con el que el suelo interacciona como sistema abierto. El rango de concentraciones obtenido por la interacción de todos estos factores y procesos se denomina población de fondo de un determinado elemento traza.

Los mapas de línea base (suelo superficial y horizonte superior) y horizonte inferior, presentan valores altos (arriba del límite superior de valores de fondo), que son descritas anteriormente por cada uno de los elementos relevantes. Como se ha mencionado la interpolación que realiza el software utilizado, es un método probabilístico, en ese sentido es importante tener presente que las distribuciones de las concentraciones, en la mayoría de los casos se expanden más de lo que es la localización puntual de las muestras que arrojan dichos valores, para el presente trabajo los valores máximos (arriba del límite superior de valor de fondo) en la zona de estudio se asocian a dos principales proceso que a continuación se mencionan:

- 1.- Distribución de concentraciones de elementos relacionadas con los procesos naturales (geológico y edafológicos): Calcio (Ca), Su patrón de distribución en el área de estudio se observa asociado a los márgenes de los valles donde los factores de intemperismo y transporte modelan el paisaje actual en dirección hacia el centro del valle Yohaltún y en la parte Norte del área de estudio se asocia a los afloramientos de rocas calizas de la Formación Icaiché.
- 2.- Distribución de concentraciones de elementos relacionados con procesos Antropogénicos, en el sitio se han usado Los fertilizantes de manera extensiva para añadir o reabastecer nutrientes agotados o que de alguna otra manera faltan en el suelo agrícola. Debido a la gran variedad de suelos y de cultivos se

han formulado muchos tipos diferentes de fertilizantes. Después de su aplicación, los fertilizantes aportan algunos elementos traza como Cd, Cu, Pb, Se, Zn y La. Si por el momento no significa un problema de contaminación si es importante monitorea el control de la aplicación de estos agroquímicos ([ver anexo 5](#)). El caso del P se puede relacionar su origen a ambas fuentes; en la parte norte (ej. Nohakal), se encontraron relacionadas a la actividad agrícola y en el valle de Yohaltún (ej. Nayarit de Castellot), al aporte natural.

Los elementos Cd, Pb y Se, actualmente en nuestro país se encuentran normados, estos mismos elementos y los restantes (Cu y Zn) se encuentran normados por otros países, debido a que la mayoría de ellos se consideran como elementos potencialmente tóxico, sin embargo las concentraciones obtenidas del muestreo de los valles centrales del Edo. de Campeche (Edzná y Yohaltún), no sobrepasan los Límites Máximos Permisibles (LMP) ([Tabla 14](#)). En el caso de Ca y P, considerados por su importancia agrícola no se cuenta con referencias (nacionales e internacionales) que permitan realizar una comparación.

V.1.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El material original (calizas formación Icaiché y Chichen Izta) y el grado de evolución de los suelos (ej. Pheozem, Vertisol y Gleysol) son los principales factores que condicionan los valores de fondo de los elementos trazas en los suelos de los Valles Centrales Edzná y Yohaltún en el Edo. de Campeche.

Los suelos que predominan en el área de estudio son seis, listados en orden de su distribución: Pheozem (44%), Vertisol (39%), Gleysol (9%), Luvisol (5%), Leptosol (2%) y Nitisol (1%).

A través de la Difracción por rayos X, se identificó la presencia de fases minerales como Caolín, montmorillonita, illita y halloysita del grupo de las arcillas (filosilicatos) favorecen la fijación de los metales y disminuyendo la movilidad de los mismos. Sin embargo, sería interesante observar a través de la microscopía electrónica como estas fases están relacionadas con los elementos traza.

Las concentraciones en elementos traza por encima el límite superior de la población de fondo, si bien implican una tendencia a la contaminación, no necesariamente implican toxicidad. Así, los suelos en los valles centrales, con concentraciones por encima del límite superior de la población de fondo están relacionadas a las actividades agrícolas actuales en las zonas sometidas estas actividades (ej. Nohakal, Cayal, Arellano, Santa Cruz de Rovira, entre otros)

En la Técnica Analítica el presente estudio empleó la digestión parcial, básicamente por sus objetivos ambientales y de salud, representando las concentraciones de mayor interés en estas áreas, siendo además la técnica de digestión más difundida entre instituciones, lo cual facilitaría su implementación a lo largo del país, además de que la digestión parcial es también la técnica contemplada en la legislación ambiental mexicana (aunque esta solo considera el uso de ácido nítrico).

Los resultados obtenidos de movilidad presentan al zinc (Zn) y selenio (Se) como los elementos trazas más móviles (fracción móvil), en ambos horizontes prevalece el siguiente tendencia de más a menos móvil; $Zn > Se > Cd > Cu > Pb > La$. En el horizonte inferior de zona norte presenta el valor promedio más alto con 9.13 % en el Zn y La con valor promedio más bajo de 0.14%, en cambio en el horizonte inferior se observa que el valor promedio más alto se encuentra en la Zona Centro-Valle de Edzná con 10.31% y La con un valor promedio más bajo en la zona Norte con un valor de 0.11 %. Sin embargo, en base a las observaciones en campo, principalmente en los suelos vertisoles donde aparecen grietas profundas, que indican infiltraciones de agua de lluvia a los substratos inferiores, lo que posiblemente facilite el transporte de elementos químicos que se encuentran en la superficie, es recomendable realizar un estudio de movilidad (perfil de concentración) a detalle, que permita conocer el comportamiento traza en el área de estudio.

Los valores de fondo obtenidos en el área de estudio, así como los valores que sobrepasan el límite superior de fondo que están asociadas a las actividades agrícolas en la zona de estudio siendo la zona Norte y centro Oeste (Valle de Edzná), donde actualmente los suelos son sometidos a esta actividad, los valores de fondo fueron determinados a través análisis en las curvas de probabilidad normalizadas , junto con el análisis espacial de datos de los diferentes grupos de poblaciones expuestas en dichas gráficas, hasta obtener grupos más generales relacionados principalmente por litología y tipo de suelo, se presentan en la Tabla 12 del capítulo IV.2.

De acuerdo con los resultados antes mencionados, así como, lo reportado por Chiprés *et al.*, (2008) en su estudio piloto en el Altiplano Potosino, se considera que las herramientas con mejores resultados y fácil manejo del método EDA son los Boxplots (por la determinación de rangos de concentración y visualización de Outliers) y la curvas de probabilidad Normalizadas (obtención de valores de fondo y anomalías).

Para la elaboración de las cartas geoquímicas se utilizó el Software Arcgis 9 (Arcmap 9.3), usándose el método determinístico Inverse Distance Weighting (IDW) (ESRI, 2003) a diferencia de los propuesto por Chiprés *et al.*, (2008), donde se utiliza el método Kriging ordinario (OK), sin embargo se realizaron algunas pruebas usando ambos métodos y se consideró adecuado el IDW por su eficiencia y capacidad para genera resultados adecuados y confiables para los fines de este estudio.

Una alternativa para la explicación de la presencia de elementos traza (ej. tierras raras entre otros) en el área de estudio, pudiera relacionarse al punto de impacto del meteorito Chicxulub, ya que la distribución espacial de los elementos traza que se observa en los mapas geoquímicos, presentan un patrón de norte a sur, aunque en tiempo y espacio son completamente diferentes, seria interesante considerar esta y todas las posibles hipótesis que expliquen coherentemente fuente y origen posiblemente relacionados a los paisajes geoquímicos en el área.

Finalmente los seis elementos traza analizados (Cd, Cu, Pb, Se, Zn y La), sus valores fueron comparados contra valores de referencia nacionales e internacionales (México, Canadá y Alemania), ninguno sobrepasa los límites máximos permisible lo cual no indica de que el sitio no está contaminado, sin embargo se recomienda realizar estudios a escala local, para caracterizar las zonas sometidas a intensa actividad agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahams, P.W., 2002. Soils: their implications to human health. *Sci. Total Environ.* 291, 1-32.
- Adriano, D.C., 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York.
- Berzunza Pinto, Ramón, Monografía del Estado de Campeche, ed. Concordia, 1991.
- C. Bini et al., 2010. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy. *Journal of Geochemical Exploration* 109 (2011) . Page 125–133
- Chiprés, J.A., 1998. Cartografía geoquímica multiescalar de valores de fondo y líneas base en el Altiplano Potosino, SLP, México. Tesis de Doctorado, Programa Multidisciplinario de Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Consejo de Recurso Minerales (COREMI), 2002. Monografía Geológico–Minera del Estado de Campeche (Primera edición, abril 2002).
- Dana, S., E. & Ford E., Williams. 1981. Tratado de Mineralogía. 580-582, 696-697, 741-744.
- Darnley A.G., Björklund A., Bølviken B., Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., Steenfelt A., Tauchid M., Xuejing X. 1995. A global geochemical database for environmental and resource management. Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP Project 259. UNESCO Publishing, Paris, France.
- Darnley, A., 1997. A global geochemical reference network: The foundation for geochemical baselines. *J. Geochem. Explor.* 90, 1-5.
- Darnley, A.G., 1995a. International geochemical mapping, a review. *J. Geochem. Explor.* 55, 5-10.
- Diez, O. M., 2006. Valores de fondo de elementos traza en suelos de la provincia de Granada. Tesis de Doctorado. Universidad de Granada, Departamento de Edafología y Química Agrícola
- Gobierno del Estado de Campeche, Atlas del Estado de Campeche, edición 1997
- Hernández H., C., 2008. Cartografía Geoquímica-Ambiental en el Municipio de san Luis de la Paz, Estado de Guanajuato. Tesis de maestría. Programa de Geología Aplicada, CIEP Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2008. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, climas y tipos de suelos, escala 1:1'000,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Censo de Población y Vivienda, México, 2010.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Guía del Estado de Campeche México, 1998.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), XI Censo General de Población y Vivienda, 2010.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- J. Bech et al., 2010. Pedogeochemical mapping of Al, Ba, Pb, Ti and V in surface soils of Barcelona Province (Catalonia, NE Spain): Relationships with soil physicochemical properties. *Journal of Geochemical Exploration* 109 (2011). page 26–37
- J. Bech et al., 2010. *Journal of Geochemical Exploration* 109 (2011). Page 104–112
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press, London.
- M.T. Guillén et al., 2010. Environmental geochemical mapping of Huelva municipality soils (SW Spain) as a tool to determine background and baseline values. *Journal of Geochemical Exploration* 109 (2011). page 59–69
- Merian E. 1991. Metals and their Compounds in the Environment; Occurrence, Analysis and Biological Relevance.
- Navidi W., 2006. Estadística para Ingenieros y Científicos.
- NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones Técnicas que deberá contener la Cartografía y la Clasificación para la elaboración de los Inventarios de Suelos.
- NOM-021-SEMARNAT-2000: Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo Y Análisis.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, 2009. Guía para la Descripción de Suelos. FAO, Roma.

- Otero, N., Vitoria, L., Soler, A.; Canals, A. (August 2005). Fertilizer characterization: Major, trace and rare earth elements *Applied Geochemistry*, Volume 20, Issue 8, Pages 1473-1488
- Plant, J., Smith, D., Smith, B., Williams, L., 2001. Environmental geochemistry at the global scale. *Appl. Geochem.* 16, 1291-1308.
- Rantitsch, G., 2004. Geochemical exploration in a mountainous area by statistical modeling of polypopulational data distributions. *J. Geochem. Explor.* 82, 79-95.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Sci. Total Environ.* 346
- Salminen, R. (Chief-editor), Batista, M.J., Bidovec, M., et al. 2005. *Geochemical Atlas of Europe. Part 1 – Background Information, Methodology and Maps.* Geological Survey of Finland..
- Salminen, R., Gregorauskiene, V., 2000. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. *Appl. Geochem.* 15, 647-653.
- Salminen, R., Tarvainen, T., 1997. The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected elements and geological materials in Finland. *J. Geochem. Explor.* 60, 91-98.
- Selinus, O., Frank, A., 2000. Medical Geology in: Moller, L. (Ed.), *Environmental Medicine.* Joint Industrial Safety Council, Stockholm, pp. 164-182 (Chapter 10).
- Servicio Geológico Mexicano, 2010. *Panorama Minero del Estado de Campeche*
- Tania Volké Sepúlveda, Juan A. Velasco Trejo y David A. de la Rosa Pérez ,2005 ; *Suelos contaminados por metales y metaloides : muestreo y alternativas para su remediación.*
- Tisdale L., S., & Nelson L. W., 1977. *Fertilidad de Suelos y Fertilizantes*
- V. Mrvić et al., 2010. Pedogeochemical mapping and background limit of trace elements in soils of Branicevo Province (Serbia). *Journal of Geochemical Exploration* 109 (2011). Page 18–25
- Vázquez, R.G., 2007. Movilización de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la rizósfera de *viguiera dentata*, una especie vegetal tolerante, de suelos de Villa de la Paz, Matehuala, S.L.P.
- Verma, S.P. (2005). *Estadística Básica para el Manejo de datos Experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría).* Universidad Autónoma de México, México, D.F., 186 p.

ANEXOS.

Anexo 1. Tabla de resultados de estadísticas descriptivas básicas.

Anexo 1.1 Estadística descriptiva del suelo superficial (1m x 1m x 5cm), concentración en mg/kg excepto donde se indica.

| Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E | Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E |
|---------------|----|---------|--------|-------|-------|--------|-----------|----|----------|-------|-------|-------|----------|
| <i>Al (%)</i> | 80 | 4.928 | 5.24 | 0.63 | 7.38 | 1.471 | <i>In</i> | 80 | 0.062 | 0.06 | 0.02 | 0.12 | 0.023 |
| <i>Ca (%)</i> | 80 | 3.902 | 1.315 | 0.35 | 27.2 | 5.509 | <i>La</i> | 80 | 59.196 | 54.6 | 4.20 | 171 | 33.138 |
| <i>Fe (%)</i> | 80 | 2.949 | 2.89 | 0.36 | 7.05 | 1.199 | <i>Li</i> | 80 | 29.066 | 29.45 | 5.10 | 62.6 | 12.762 |
| <i>K (%)</i> | 80 | 0.394 | 0.3 | 0.1 | 1.1 | 0.217 | <i>Lu</i> | 80 | 0.545 | 0.50 | 0.10 | 1.50 | 0.274 |
| <i>Mg (%)</i> | 80 | 0.480 | 0.46 | 0.08 | 1.21 | 0.244 | <i>Mn</i> | 80 | 1425.125 | 1195 | 135 | 5880 | 1075.231 |
| <i>Na (%)</i> | 80 | 0.018 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.009 | <i>Mo</i> | 80 | 0.856 | 0.72 | 0.13 | 3.33 | 0.540 |
| <i>P (%)</i> | 80 | 0.030 | 0.0245 | 0.003 | 0.177 | 0.023 | <i>Nb</i> | 80 | 0.435 | 0.30 | 0.100 | 1.60 | 0.382 |
| <i>S (%)</i> | 80 | 0.053 | 0.045 | 0.01 | 0.162 | 0.028 | <i>Ni</i> | 80 | 47.484 | 41.8 | 14.8 | 132 | 21.812 |
| <i>Ag</i> | 80 | 0.130 | 0.1085 | 0.026 | 0.539 | 0.079 | <i>Pb</i> | 80 | 38.111 | 36.7 | 3.35 | 114 | 19.508 |
| <i>As</i> | 80 | 4.808 | 3.40 | 0.50 | 15.00 | 3.499 | <i>Pr</i> | 80 | 13.849 | 13.1 | 1.00 | 38.2 | 7.507 |
| <i>B</i> | 80 | 10.400 | 6.00 | 1.00 | 46.00 | 10.350 | <i>Rb</i> | 80 | 39.473 | 39.6 | 8.00 | 76.4 | 14.801 |
| <i>Ba</i> | 80 | 163.061 | 147.5 | 44.1 | 641 | 90.282 | <i>Sb</i> | 80 | 0.454 | 0.26 | 0.02 | 2.17 | 0.389 |
| <i>Be</i> | 80 | 2.198 | 2.20 | 0.30 | 4.20 | 0.729 | <i>Sc</i> | 80 | 6.694 | 7.3 | 0.6 | 11.4 | 2.627 |
| <i>Bi</i> | 80 | 0.434 | 0.325 | 0.03 | 4.2 | 0.505 | <i>Se</i> | 80 | 1.518 | 1.50 | 0.60 | 3.00 | 0.456 |
| <i>Cd</i> | 80 | 0.725 | 0.655 | 0.18 | 1.91 | 0.332 | <i>Sm</i> | 80 | 10.284 | 9.70 | 0.80 | 27.80 | 5.431 |
| <i>Ce</i> | 80 | 134.351 | 123.00 | 8.71 | 625 | 90.085 | <i>Sn</i> | 80 | 2.225 | 2.225 | 0.37 | 4.13 | 0.816 |
| <i>Co</i> | 80 | 16.224 | 15.05 | 2.4 | 52.3 | 8.960 | <i>Sr</i> | 80 | 61.074 | 51.65 | 7.80 | 224 | 47.881 |
| <i>Cr</i> | 80 | 61.675 | 58.5 | 6.2 | 167 | 31.800 | <i>Tb</i> | 80 | 1.279 | 1.20 | 0.10 | 3.50 | 0.680 |
| <i>Cs</i> | 80 | 2.481 | 2.47 | 0.33 | 6.15 | 1.020 | <i>Th</i> | 80 | 13.134 | 13.15 | 1.00 | 27.1 | 7.303 |
| <i>Cu</i> | 80 | 26.470 | 25.3 | 10.7 | 48.6 | 7.387 | <i>Tl</i> | 80 | 0.506 | 0.50 | 0.07 | 1.27 | 0.210 |
| <i>Dy</i> | 80 | 7.843 | 7.60 | 0.697 | 20.7 | 4.081 | <i>Tm</i> | 80 | 0.593 | 0.60 | 0.10 | 1.60 | 0.305 |
| <i>Er</i> | 80 | 4.338 | 4.20 | 0.40 | 11.3 | 2.219 | <i>U</i> | 80 | 0.295 | 0.20 | 0.10 | 1.10 | 0.220 |
| <i>Eu</i> | 80 | 1.758 | 1.70 | 0.10 | 4.50 | 0.896 | <i>V</i> | 80 | 44.900 | 41 | 4.00 | 147 | 30.391 |
| <i>Ga</i> | 80 | 13.143 | 14.6 | 0.85 | 19.8 | 4.015 | <i>Y</i> | 80 | 44.179 | 42.2 | 4.06 | 114 | 22.938 |
| <i>Gd</i> | 80 | 9.028 | 8.55 | 0.7 | 24.6 | 4.792 | <i>Yb</i> | 80 | 3.721 | 3.45 | 0.40 | 10.00 | 1.859 |
| <i>Hf</i> | 80 | 0.861 | 0.85 | 0.20 | 2.00 | 0.379 | <i>Zn</i> | 80 | 72.150 | 61.3 | 27.2 | 773 | 81.785 |
| <i>Ho</i> | 80 | 1.550 | 1.50 | 0.10 | 4.10 | 0.807 | <i>Zr</i> | 80 | 32.273 | 7.6 | 62.8 | 34.2 | 12.301 |

Anexo 1.2. Estadística descriptiva del horizonte superior (HA ó HC1), concentración en mg/kg excepto donde se indica.

| Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E | Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E |
|---------------|----|---------|--------|-------|-------|---------|-----------|----|----------|-------|------|--------|----------|
| <i>Al (%)</i> | 32 | 5.478 | 5.88 | 0.63 | 7.66 | 1.663 | <i>In</i> | 32 | 0.069 | 0.07 | 0.02 | 0.12 | 0.023 |
| <i>Ca (%)</i> | 32 | 4.577 | 1.19 | 0.34 | 28.4 | 7.241 | <i>La</i> | 32 | 68.241 | 58 | 4.50 | 171.00 | 41.564 |
| <i>Fe (%)</i> | 32 | 3.428 | 3.31 | 0.37 | 7.15 | 1.354 | <i>Li</i> | 32 | 31.938 | 31.55 | 4.80 | 62.10 | 13.036 |
| <i>K (%)</i> | 32 | 0.302 | 0.25 | 0.1 | 0.9 | 0.178 | <i>Lu</i> | 32 | 0.628 | 0.6 | 0.10 | 1.50 | 0.324 |
| <i>Mg (%)</i> | 32 | 0.508 | 0.43 | 0.08 | 1.36 | 0.314 | <i>Mn</i> | 32 | 1709.844 | 1060 | 177 | 7290 | 1704.086 |
| <i>Na (%)</i> | 32 | 0.031 | 0.02 | 0.01 | 0.15 | 0.028 | <i>Mo</i> | 32 | 0.960 | 0.71 | 0.18 | 3.39 | 0.710 |
| <i>P (%)</i> | 32 | 0.021 | 0.0145 | 0.001 | 0.134 | 0.026 | <i>Nd</i> | 32 | 60.311 | 51.00 | 4.24 | 146 | 35.606 |
| <i>S (%)</i> | 32 | 0.033 | 0.025 | 0.008 | 0.092 | 0.019 | <i>Ni</i> | 32 | 53.297 | 46.75 | 22.3 | 138 | 26.882 |
| <i>Ag</i> | 32 | 0.140 | 0.1295 | 0.023 | 0.392 | 0.078 | <i>Pb</i> | 32 | 43.601 | 38.45 | 3.44 | 113 | 25.655 |
| <i>As</i> | 32 | 4.972 | 4.50 | 0.50 | 13.70 | 3.540 | <i>Pr</i> | 32 | 16.097 | 13.6 | 1.1 | 39.5 | 9.663 |
| <i>B</i> | 32 | 6.656 | 6.00 | 1.00 | 23.00 | 5.234 | <i>Rb</i> | 32 | 39.031 | 39.5 | 7.4 | 71.2 | 16.131 |
| <i>Ba</i> | 32 | 198.144 | 171.5 | 50 | 689 | 129.378 | <i>Sb</i> | 32 | 0.492 | 0.365 | 0.11 | 1.69 | 0.403 |
| <i>Be</i> | 32 | 2.400 | 2.50 | 0.30 | 3.90 | 0.765 | <i>Sc</i> | 32 | 8.084 | 9.05 | 0.50 | 12.00 | 2.814 |
| <i>Bi</i> | 32 | 0.391 | 0.385 | 0.03 | 0.83 | 0.188 | <i>Se</i> | 32 | 1.531 | 1.4 | 0.60 | 3.10 | 0.595 |
| <i>Cd</i> | 32 | 0.721 | 0.675 | 0.17 | 1.96 | 0.388 | <i>Sm</i> | 32 | 11.919 | 10.15 | 0.9 | 28.3 | 6.869 |
| <i>Ce</i> | 32 | 160.031 | 126.5 | 9.5 | 703 | 130.698 | <i>Sn</i> | 32 | 2.493 | 2.555 | 0.34 | 4.2 | 0.830 |
| <i>Co</i> | 32 | 18.534 | 15.6 | 2.5 | 60.8 | 11.826 | <i>Sr</i> | 32 | 79.419 | 61.0 | 6.8 | 387 | 73.951 |
| <i>Cr</i> | 32 | 68.919 | 62.45 | 6.0 | 159.0 | 31.670 | <i>Tb</i> | 32 | 1.463 | 1.25 | 0.10 | 3.50 | 0.851 |
| <i>Cs</i> | 32 | 2.983 | 3.15 | 0.27 | 5.26 | 1.317 | <i>Th</i> | 32 | 16.897 | 17.8 | 0.8 | 30.8 | 8.330 |
| <i>Cu</i> | 32 | 24.697 | 24.35 | 14.2 | 40.8 | 6.319 | <i>Tl</i> | 32 | 0.603 | 0.575 | 0.04 | 1.31 | 0.301 |
| <i>Dy</i> | 32 | 8.969 | 7.82 | 0.767 | 20.9 | 5.066 | <i>Tm</i> | 32 | 0.694 | 0.60 | 0.10 | 1.60 | 0.365 |
| <i>Er</i> | 32 | 4.953 | 4.35 | 0.4 | 11.6 | 2.753 | <i>U</i> | 32 | 0.331 | 0.20 | 0.10 | 0.90 | 0.207 |
| <i>Eu</i> | 32 | 2.022 | 1.8 | 0.2 | 4.8 | 1.117 | <i>V</i> | 32 | 54.750 | 50.5 | 4.00 | 151 | 33.422 |
| <i>Ga</i> | 32 | 14.869 | 16.1 | 0.8 | 21 | 4.317 | <i>Y</i> | 32 | 49.847 | 44.95 | 4.41 | 113 | 26.872 |
| <i>Gd</i> | 32 | 10.350 | 8.95 | 0.8 | 25.1 | 6.017 | <i>Yb</i> | 32 | 4.278 | 3.90 | 0.40 | 9.90 | 2.265 |
| <i>Hf</i> | 32 | 0.922 | 1 | 0.2 | 1.4 | 0.342 | <i>Zn</i> | 32 | 63.728 | 67.65 | 24.7 | 86.3 | 13.849 |
| <i>Ho</i> | 32 | 1.775 | 1.55 | 0.2 | 4.1 | 0.981 | <i>Zr</i> | 32 | 35.266 | 40.15 | 6.2 | 52.4 | 12.804 |

Anexo 1.3. Estadística descriptiva del horizonte superior (HB, HC ó HC2), concentración en mg/kg excepto donde se indica.

| Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E | Elemento | n | M | Me | Min | Max | D.E |
|---------------|----|---------|--------|-------|-------|---------|-----------|----|----------|-------|-------|--------|----------|
| <i>Al (%)</i> | 32 | 4.565 | 5.59 | 0.24 | 7.85 | 2.585 | <i>In</i> | 32 | 0.060 | 0.06 | 0.02 | 0.11 | 0.030 |
| <i>Ca (%)</i> | 32 | 10.625 | 1.225 | 0.21 | 37.6 | 13.747 | <i>La</i> | 32 | 49.369 | 50.35 | 1.70 | 141.00 | 34.121 |
| <i>Fe (%)</i> | 32 | 2.911 | 2.955 | 0.18 | 6.82 | 1.882 | <i>Li</i> | 32 | 26.188 | 30.25 | 1.80 | 60.70 | 15.800 |
| <i>K (%)</i> | 32 | 0.193 | 0.2 | 0.01 | 0.6 | 0.155 | <i>Lu</i> | 32 | 0.494 | 0.50 | 0.10 | 1.20 | 0.306 |
| <i>Mg (%)</i> | 32 | 0.469 | 0.35 | 0.06 | 1.45 | 0.380 | <i>Mn</i> | 32 | 1213.938 | 920.5 | 41.00 | 6720 | 1302.765 |
| <i>Na(%)</i> | 32 | 0.081 | 0.025 | 0.01 | 0.42 | 0.107 | <i>Mo</i> | 32 | 0.867 | 0.565 | 0.07 | 2.93 | 0.787 |
| <i>P (%)</i> | 32 | 0.006 | 0.004 | 0.001 | 0.034 | 0.006 | <i>Nd</i> | 32 | 44.887 | 45.75 | 1.68 | 123 | 30.425 |
| <i>S (%)</i> | 32 | 0.051 | 0.024 | 0.003 | 0.734 | 0.128 | <i>Ni</i> | 32 | 46.706 | 40.45 | 11.5 | 126 | 29.518 |
| <i>Ag</i> | 32 | 0.136 | 0.0655 | 0.008 | 1.87 | 0.322 | <i>Pb</i> | 32 | 35.204 | 29.4 | 1.23 | 98.2 | 26.883 |
| <i>As</i> | 32 | 4.025 | 2.50 | 0.50 | 15.40 | 3.855 | <i>Pr</i> | 32 | 11.966 | 12.15 | 0.40 | 34.10 | 8.222 |
| <i>B</i> | 32 | 5.094 | 3.00 | 1.00 | 23.00 | 5.114 | <i>Rb</i> | 32 | 27.209 | 25.55 | 1.10 | 60.00 | 18.415 |
| <i>Ba</i> | 32 | 191.888 | 151.5 | 31.7 | 686 | 153.582 | <i>Sb</i> | 32 | 0.419 | 0.23 | 0.07 | 1.99 | 0.464 |
| <i>Be</i> | 32 | 2.000 | 2.40 | 0.10 | 4.00 | 1.168 | <i>Sc</i> | 32 | 7.063 | 9.05 | 0.30 | 11.5 | 4.029 |
| <i>Bi</i> | 32 | 0.318 | 0.26 | 0.02 | 0.74 | 0.219 | <i>Se</i> | 32 | 1.169 | 1.10 | 0.50 | 2.40 | 0.460 |
| <i>Cd</i> | 32 | 0.438 | 0.37 | 0.06 | 1.45 | 0.300 | <i>Sm</i> | 32 | 8.994 | 9.4 | 0.30 | 24.5 | 6.074 |
| <i>Ce</i> | 32 | 136.067 | 108.5 | 3.61 | 711 | 139.683 | <i>Sn</i> | 32 | 2.068 | 2.245 | 0.20 | 3.76 | 1.121 |
| <i>Co</i> | 32 | 15.669 | 14.9 | 1.20 | 59.0 | 12.060 | <i>Sr</i> | 32 | 114.856 | 91.75 | 4.90 | 515 | 111.666 |
| <i>Cr</i> | 32 | 58.138 | 59.5 | 2.10 | 188 | 42.463 | <i>Tb</i> | 32 | 1.122 | 1.2 | 0.10 | 3.00 | 0.752 |
| <i>Cs</i> | 32 | 2.545 | 2.83 | 0.10 | 5.17 | 1.620 | <i>Th</i> | 32 | 14.659 | 16.15 | 0.30 | 26.8 | 9.799 |
| <i>Cu</i> | 32 | 18.194 | 19.9 | 3.33 | 29.5 | 7.195 | <i>Tl</i> | 32 | 0.540 | 0.53 | 0.03 | 1.27 | 0.379 |
| <i>Dy</i> | 32 | 6.862 | 7.34 | 0.33 | 18.8 | 4.644 | <i>Tm</i> | 32 | 0.538 | 0.55 | 0.10 | 1.30 | 0.341 |
| <i>Er</i> | 32 | 3.806 | 4.05 | 0.2 | 10 | 2.540 | <i>U</i> | 32 | 0.328 | 0.2 | 0.10 | 1.10 | 0.245 |
| <i>Eu</i> | 32 | 1.531 | 1.6 | 0.1 | 3.8 | 0.993 | <i>V</i> | 32 | 49.813 | 45 | 2.00 | 146.00 | 39.018 |
| <i>Ga</i> | 32 | 12.497 | 15.8 | 0.02 | 20 | 6.974 | <i>Y</i> | 32 | 37.487 | 41.8 | 1.99 | 98.8 | 24.254 |
| <i>Gd</i> | 32 | 7.838 | 8.2 | 0.4 | 21.9 | 5.327 | <i>Yb</i> | 32 | 3.341 | 3.35 | 0.20 | 8.30 | 2.201 |
| <i>Hf</i> | 32 | 0.716 | 0.9 | 0.1 | 1.3 | 0.411 | <i>Zn</i> | 32 | 48.784 | 59.3 | 6.00 | 79.00 | 22.834 |
| <i>Ho</i> | 32 | 1.356 | 0.909 | 0.1 | 3.7 | 1.45 | <i>Zr</i> | 32 | 24.625 | 27.9 | 1.00 | 52.20 | 14.961 |

Anexo 2. Tabla de datos de campo (documento electrónico).

Anexo 2.1. Datos de campo de la zona norte.

Anexo 2.2. Datos de Campo de la zona centro-valle Edzná.

Anexo 2.3. Datos de campo de la zona centro-valle Yohaltún y Sur-Escárcega.

Anexo 3. Tabla de resultados de análisis químicos (documento electrónico).

Anexo 3.1. Análisis químicos del suelo superficial (1m x 1m x 5cm), concentración en ppm excepto donde se indica.

Anexo 3.2. Análisis químicos del suelo superficial (HA ó HC1), concentración en ppm excepto donde se indica.

Anexo 3.3. Análisis químicos del suelo superficial (HB, HC ó HC2), concentración en ppm excepto donde se indica.

Anexo 4. Fotografías de muestreo (documento electrónico).

Anexo 5. Fotografías de fuentes antrópicas (agroquímico) encontrados en área de estudio. (documento electrónico).

Anexo 6. Fotografías de actividades agrícolas en el área de estudio (documento electrónico).