



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

**ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA COBERTURA Y
EROSIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DE LAGUNA DE TÉRMINOS,
CAMPECHE**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

ZENIA PÉREZ FALLS

LA PAZ, B. C. S., MÉXICO., DICIEMBRE DE 2018



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S. el día 14 del mes de Noviembre del año 2010

El (la) que suscribe GEÓG. ZENIA PÉREZ FALLS Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A170590 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES Y DR. SERGIO AGUÍNIGA GARCÍA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA COBERTURA Y EROSIÓN DEL SUELO

EN LA CIENCA HIDROGRÁFICA DE LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: zperezfalls@gmail.com - gmflores@iccp.org - saguiniga@gmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

GEÓG. ZENIA PÉREZ FALLS

Nombre y firma del alumno

Agradecimientos

A mi tutor Guillermo Martínez Flores por su apoyo incondicional y por haber confiado siempre en mí.

A mi tutor Sergio Aguiñiga García por su paciencia y apoyo en todo momento.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, al instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por permitirme realizar mi estancia de investigación y profundizar en mis conocimientos.

A mi comité tutorial conformado por Dr. Guillermo Martínez Flores, Dr. Sergio Aguiñiga García, Dr. Enrique Hipargo Nava Sánchez, Dr. Víctor Gómez Muños y Mc. Raúl Medina Mendoza.

A mi familia por siempre estar ahí para apoyarme y darme fuerzas para llegar a mis metas.

A mi papá por darme las fuerzas para no rendirme.

A mis amigos tanto de la maestría como los que se encuentran lejos que me han apoyado en todo momento, sobre todo a mis hermanitas Enriette, Jessica y Astrid por su apoyo y momentos felices durante toda la maestría.

Dedicatoria

A mis padres por ser el motor impulsor de mis logros.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Cuencas hidrográficas como unidad funcional.....	1
1.2. Cambios en la cobertura del suelo.....	1
1.3. Impactos del cambio en la cobertura del suelo.	2
1.4. Métodos para evaluar los cambios en la cobertura del suelo.....	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Cambios en la cobertura del suelo.....	4
2.2. Cambios de otros registros históricos en cuencas hidrográficas.....	5
2.3. Cambios de registros históricos en La Laguna de Términos (LT).	7
3. JUSTIFICACIÓN	8
4. HIPÓTESIS	9
5. OBJETIVO.....	9
5.1. Objetivos específicos	9
6. ZONA DE ESTUDIO	9
7. DATOS Y MÉTODOS.....	12
7.1. Generación de mapas del cambio en la cobertura del suelo	13
7.1.1. Datos para determinar la cobertura del suelo	13
7.1.2. Método para determinar los cambios en la cobertura del suelo.....	16
7.2. Caudales de ríos, precipitación pluvial y núcleo de sedimento	18
7.2.1. Datos	18
7.2.2. Método para los caudales de ríos, precipitación pluvial y núcleo de sedimento	19
7.3. Erosión del suelo y sedimento exportado a LT	20
7.3.1. Datos	20

7.3.2. Método.....	21
7.3.3. Parámetros de la ecuación USLE	22
7.4. Correlación de los cambios en la cobertura del suelo y registros históricos analizados.....	28
8. RESULTADOS	29
8.1. Cambios en el NDVI.....	29
8.2. Distribución espacial de la cobertura del suelo	33
8.3. Clasificación de la cobertura vegetal por clases de vigor de la vegetación..	37
8.4 . Análisis de los registros ambientales. Caudales de ríos, precipitación pluvial, núcleo de sedimento	45
8.5. Estimación de la erosión hídrica del suelo y aporte de sedimentos a LT	52
8.6. Correlación entre variables	61
9. DISCUSIÓN.....	65
9.1. Dinámica del cambio de cobertura vegetal de suelo.....	65
9.2. Estimación de la erosión hídrica del suelo y aporte de sedimento a la Laguna de Términos.....	67
9.3. Correlaciones de registros históricos	70
10. CONCLUSIONES.....	70
11. BIBLIOGRAFÍA.....	72
12. ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio	10
Figura 2. Diagrama metodológico general.	12
Figura 3. Escenas tomadas por el satélite Landsat. Path-row 21-47, 22-47,21-48. ..	14
Figura 4. Ubicación de la extracción del núcleo sedimentario en la subcuenca hidrográfica Pom-Atasta.....	19
Figura 5. Esquema metodológico para estimar la erosión del suelo mediante la USLE	22
Figura 6. Erosividad de la lluvia para las diferentes regiones de México (tomado de Cortés, 1991).....	23
Figura 7. Modelo de Elevación _ 30 m de resolución espacial. INEGI, 2013.	27
Figura 8. NDVI y porcentajes de cobertura vegetal. 1986.....	34
Figura 9. NDVI y porcentajes de cobertura de suelo. 2017	37
Figura 10. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0-0.25	38
Figura 11. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.25-0.5	39
Figura 12. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75	40
Figura 13. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.75-1	41
Figura 14. Cambios del uso del suelo. Serie I de Uso de suelo y Vegetación. INEGI.1985.....	43
Figura 15. Cambio del uso de suelo. Serie VI de Uso de suelo y Vegetación. INEGI. 2016.	44
Figura 16. Caudales de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpán y acumulado anual. 1995-2014.....	47
Figura 17. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpán en época de secas y nortes. 1995-2012.....	48
Figura 18. Precipitación pluvial acumulada en las subcuencas de estudio. 1998-2016	49
Figura 19. Puntos de precipitación dentro del área de estudio. 1998-2016	50
Figura 20. Precipitación por subcuencas hidrográficas de estudio. 1998-2016. Satélite TRMM.	51
Figura 21. TAM, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la subcuenca Pom-Atasta.....	52

Figura 22. Modelo digital de elevación del área de estudio. INEGI, 2013	53
Figura 23. Edafología del área de estudio. INEGI, 2013	54
Figura 24. Granulometría del área de estudio. INEGI, 2013.	54
Figura 25. Factor K. Erodabilidad del suelo del área de estudio. FAO, 1980.....	55
Figura 26. Factor C. Uso de suelo y vegetación del área de estudio	56
Figura 27. Interpolación de los puntos obtenidos del satélite TRMM. 2002	57
Figura 28. Factor R. Erodabilidad de la lluvia para el área de estudio. 2002.	58
Figura 29. Erosión hídrica del suelo en el área de estudio. 2002.....	59
Figura 30. Erosión hídrica del suelo en el área de estudio. 2016.....	60
Figura 31. Erosión hídrica del suelo por subcuencas.....	60
Figura 32. Sedimentos exportados a Laguna de Términos por subcuencas (2002-2016).....	61
Figura 33. Precipitación pluvial, caudal de los ríos Candelaria y Mamantel, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Candelaria-Mamantel.	62
Figura 34. Precipitación pluvial, Caudal del río Palizada, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Palizada.....	63
Figura 35. Precipitación pluvial, Caudal del río Chumpán, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Chumpán.....	64
Figura 36. Precipitación pluvial, TAM, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75 de la subcuenca Pom-Atasta.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la serie del satélite Landsat.	13
Tabla 2. Fechas de imágenes satelitales Landsat. 1986-2017.....	15
Tabla 3. Cartográfica utilizada. INEGI.	16
Tabla 4. Valores del factor de Erodabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial del área de estudio. FAO, 1980.....	25
Tabla 5. Valores que toma m en función de la pendiente. Wischmeier & Smith, 1978	26
Tabla 6. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Pom-Atasta.....	30
Tabla 7. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Palizada.....	31
Tabla 8. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Chumpán.....	32
Tabla 9. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Candelaria-Mamantel.	33
Tabla 10. Matriz de transición de cambio de uso de suelo (ha). 1985 y 2016.....	45
Tabla 11. Erosión hídrica del suelo y sedimentos exportados a la Laguna de Términos. 2002-2016.	58
Tabla 12. Correlación de registros históricos	62

GLOSARIO

Cuenca hidrográfica: Superficie delimitada por una divisoria cuyas aguas fluyen hacia una corriente principal o cuerpo de agua; constituye una subdivisión de la región hidrográfica.

Subcuenca hidrográfica: Área considerada como una subdivisión de la cuenca hidrográfica que presenta características particulares de escurrimiento y extensión.

Cobertura de suelo: Descripción del material físico en la superficie de la Tierra.

Uso de suelo: Asignaciones derivadas de la actividad humana en un territorio.

USLE: Universal Soil Loss Equation (ecuación universal de pérdida de suelo).

Percepción remota: La ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission (misión de medición de lluvias tropicales).

TAM: Tasa de Acreción Másica.

MOS. Materia Orgánica Sedimentaria.

SDR: Sediment Delivery Ratio (Proporción de distribución de sedimento).

Caudales ríos: Volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

CONABIO: La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

RESUMEN

El cambio en la cobertura del suelo es un proceso complejo y dinámico que involucra los sistemas naturales y antrópicos. En las subcuencas hidrográficas que desembocan en Laguna de Términos (SHLT), Campeche, la variabilidad de los registros ambientales ha sido escasamente relacionada con evaluaciones espacio-temporales del cambio en la cobertura y erosión del suelo. El presente estudio plantea que los cambios en la cobertura del suelo en SHLT, se correlacionan con registros históricos de caudales de ríos, precipitación pluvial, erosión del suelo, Tasa de Acreción Máfica y Materia Orgánica. Se utilizaron imágenes Landsat TM y ETM+ para evaluar el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), en el período 1986-2017. Adicionalmente, se analizó la precipitación pluvial de 1998 a 2016 (satélite TRMM) y los caudales de los ríos que descargan en la laguna (1995-2014) (CONAGUA). Los datos se procesaron en MATLAB y QGIS. Se calculó la erosión del suelo y la exportación de sedimentos por subcuencas mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para el período del 2002 a 2016 utilizando las series de uso de suelo y vegetación de INEGI (Serie III a VI). Los resultados muestran que en el período de 1986 a 2017 la subcuenca Pom-Atasta presentó las menores variaciones en la cobertura vegetal en el lapso de estudio en las cuatro clases de vigor de vegetación. La clase de vigor de la vegetación más predominante en las cuatro subcuencas hidrográficas fue de 0.5 a 0.75 con porcentajes que llegan hasta el 88% en 2017, mientras que la clase de 0.75 a 1 disminuye considerablemente a partir de 2003 en las cuatro subcuencas con porcentajes menores al 1%. Se obtuvo la mayor erosión de suelo en la subcuenca Candelaria-Mamantel con 8.8 t/ha/año en 2002 y valores menores en la subcuenca Pom-Atasta el año 2016 con 0.8 t/ha/año. El sedimento exportado con valores mayores fue en la subcuenca Candelaria-Mamantel con 4.4 t/ha/año en 1986 y el valor menor fue en la subcuenca Pom-Atasta en 2016 con 0.1 t/ha/año. Del registro sedimentario se obtuvo una TAM de 0.04 gr/cm²/año de 1914 a 1930, con un aumento a 0.14 g/cm² hacia 2014. Las correlaciones lineales realizadas no fueron significativas debido a la escala de trabajo y los períodos analizados.

ABSTRACT

The change in soil cover is a complex and dynamic process that involves natural and anthropic systems. In the hydrographic sub-basins that flow into Laguna de Terminos (SHLT), Campeche, the variability of environmental records has been scarcely related to spatio-temporal evaluations of the change in coverage and soil erosion. The present study proposes that the changes in land cover in SHLT, are correlated with historical records of river flows, rainfall, soil erosion, Mass Accretion Rate and Organic Matter. Landsat TM and ETM + images were used to evaluate the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), in the period 1986-2017. Additionally, the rainfall from 1998 to 2016 (satellite TRMM) and the flows of the rivers that discharge into the lagoon (1995-2014) (CONAGUA) were analyzed. The data was processed in MATLAB and QGIS. Soil erosion and sediment export by subbasins were calculated using the Universal Soil Loss Equation (USLE) for the period from 2002 to 2016 using the INEGI soil and vegetation use series (Series III to VI). The results show that in the period from 1986 to 2017, the Pom-Atasta sub-basin presented the smallest variations in vegetation cover during the study period in the four vegetation vigor classes. The vigor class of the most predominant vegetation in the four sub-basins was from 0.5 to 0.75 with percentages reaching 88% in 2017, while the class from 0.75 to 1 decreases considerably from 2003 on the four sub-basins with percentages less than 1%. The greatest soil erosion in the Candelaria-Mamantel sub-basin was obtained with 8.8 t/ha/year in 2002 and lower values in the Pom-Atasta sub-basin in 2016 with 0.8 t/ha/year. The sediment exported with higher values was in the Candelaria-Mamantel sub-basin with 4.4 t/ha/year in 1986 and the lowest value was in the Pom-Atasta sub-basin in 2016 with 0.1 t/ha/year. From the sedimentary record a TAM of 0.04 gr/cm²/year was obtained from 1914 to 1930, with an increase to 0.14 g/cm² by 2014. Linear correlations were not significant due to the scale of work and the periods analyzed.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Cuencas hidrográficas como unidad funcional

Las cuencas hidrográficas son territorios que presentan una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas o leyes) (Cotler *et al.*, 2013). Estos territorios permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, así como cuantificar e identificar los impactos acumulados de las actividades humanas o externalidades (sedimentos, contaminantes y nutrientes) a lo largo del sistema de corrientes o redes hidrográficas. Además, las cuencas hidrográficas son unidades funcionales, con límites bien definidos, salidas puntuales y están estructuradas jerárquicamente. (Cotler *et al.*, 2013).

Las cuencas hidrográficas se consideran también como la superficie delimitada por una divisoria cuyas aguas fluyen hacia una corriente principal o cuerpo de agua; constituye una subdivisión de la región hidrográfica. (INEGI, 2010). Son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) los que concentran todos los escurrimientos que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (cuenca endorreica), o el mar (cuenca exorreica) (Cotler *et al.*, 2013).

Además de ser una unidad funcional, presenta su propio ecosistema considerado como un sistema abierto, altamente complejo y dinámico compuesto de elementos bióticos (plantas, animales y microorganismos) y abióticos (energía, agua, suelos, nutrientes y atmósfera) que interactúan como dicha unidad funcional., siendo los seres humanos una parte integral de estos (MEA, 2003). Dentro de este ecosistema propio de cada cuenca hidrográfica que presenta cambios tanto temporales como espaciales, podemos resaltar los cambios en la cobertura del suelo, que representan una expresión clara de la dinámica natural en el territorio, así como de la influencia de las actividades humanas en la estructura de este.

1.2. Cambios en la cobertura del suelo

El cambio en la cobertura del suelo es un tema de interés global por las implicaciones de la dinámica en la evolución del suelo y sus tendencias, ya sea

como consecuencia de los cambios geográficos (cambios en la cobertura del suelo, degradación del suelo, degradación forestal, entre otros) o los cambios sociales (ocupación y transformación del suelo, expansión de la población, entre otros) (Nágera *et al.*, 2010).

Los cambios de cobertura y uso del suelo son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con una influencia muy importante en la dinámica hídrica superficial (Nágera *et al.*, 2010). Estos cambios están relacionados con diversos procesos naturales que también muestran variaciones espacio-temporales en una cuenca hidrográfica, como precipitación, caudales de ríos, erosión hídrica, descarga de sedimentos, incluso con las variaciones en el origen de la materia orgánica.

Dentro de los procesos naturales con variaciones espacio-temporales con el que más está directamente relacionado es con la erosión hídrica del suelo. La eliminación o disminución de la cobertura del suelo es la principal causa de la degradación del suelo y de la pérdida de su capacidad de tolerar la erosión. Esta relación se comporta de manera directa al quedar el suelo desnudo y sufrir las consecuencias del impacto de las gotas de lluvia y el aumento de la escorrentía (García, 2004).

1.3. Impactos del cambio en la cobertura del suelo.

De acuerdo con la evaluación de los recursos forestales (FAO, 2015), la superficie forestal mundial se redujo 129 millones de ha (3.1%) en el lapso de 1990-2015 hasta quedar por debajo de los 4,000 millones de ha en este período.

En México, como en muchos países tropicales, hay importantes procesos de cambio de la cobertura y erosión del suelo, principalmente por la deforestación para el establecimiento de zonas agrícolas y urbanización (Mas *et al.*, 2009). México, se encuentra entre los países con mayor deforestación a nivel mundial, problemática que se ha incrementado en las últimas cinco décadas (Nágera *et al.*, 2010).

Al inicio de los años noventa se perdían anualmente 720,000 ha de bosques, selvas y vegetación semiárida (Masera & Dirso, 1997). Asimismo, hubo 22 millones de ha originalmente forestales que estaban degradadas para inicios de los años

noventa (Maser, 1996). Los patrones de deforestación varían notablemente por regiones, con cerca del 80% concentrado en el centro y sur de México.

Estudios más locales, como los realizados en la superficie terrestre de Laguna de Términos, Campeche, evidencian que de 1974-1986 hubo una disminución de 85,000 ha de selva, esto equivale a una tasa de deforestación de 2.4% anual, que aumentó al 4.8% en 1991. (Mas, 1998).

La Laguna de Términos, Campeche ha experimentado cambios espacio-temporales en diversos procesos de los que la conforman como la profundidad, turbidez, salinidad y temperatura superficial de la laguna (Villéger *et al.*, 2010), degradación de los suelos, deforestación (Mas *et al.*, 2003), uso de suelo (Soto & López, 2010), entre otros. Sin embargo, a pesar de que cada registro ha sido estudiado individualmente, no se han realizado investigaciones sobre la influencia de los cambios en la cobertura del suelo en las variaciones de otros procesos o registros dentro de la cuenca hidrográfica. Es evidente que a pesar de la relevancia e impacto que tienen los cambios en la cobertura del suelo, este tema no se ha tratado con el enfoque de la cuenca hidrográfica como unidad funcional.

1.4. Métodos para evaluar los cambios en la cobertura del suelo

Los cambios en la cobertura del suelo se han evaluado a lo largo de los años de diversas formas. Entre sus aplicaciones se destaca la percepción remota (o teledetección), que ha sido utilizada como herramienta para establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales (Chuvienco, 1995). Particularmente se ha utilizado para evaluar la dinámica de los cambios de usos de suelo y de la cobertura vegetal. Un aporte destacado de la percepción remota al estudio ambiental es su capacidad de evaluar procesos dinámicos en la superficie terrestre a partir de imágenes captadas por sensores desde órbitas estables y repetitivas (Chuvienco, 1995).

Otra forma de evaluar los cambios en la cobertura del suelo es mediante las matrices de transición que se obtienen de capas temáticas. Este es otro método que permite saber hacia dónde están orientados los cambios en la cobertura del suelo al crearse grupos de cobertura vegetal. Estas matrices de transición tienen una expresión cartográfica que permite localizar el lugar donde se ubican las permanencias y los cambios de coberturas (Falcón, 2014).

En las últimas cuatro décadas se comenzaron a realizar investigaciones para evaluar los cambios en la cobertura del suelo mediante el uso de imágenes satelitales (Olaya, 2014). Debido a la amplia perspectiva que estas tienen de los recursos terrestres, se convirtieron en un importante instrumento para evaluar los cambios en la cobertura del suelo, tanto espacial como temporal, siendo una herramienta significativa para mostrar los registros históricos de diversos procesos. Los enfoques con los que se han evaluado estos cambios van desde lo global hasta lo local y muestran que tanto varía la cobertura del suelo en un período determinado.

2. ANTECEDENTES

2.1. Cambios en la cobertura del suelo

Los estudios relacionados con los cambios en la cobertura del suelo en cuencas hidrográficas han cobrado mayor importancia en la investigación ambiental. Estos estudios permiten evaluar las tendencias espacio-temporales de procesos como las expansiones urbanas, la deforestación, los incendios forestales, degradación ambiental, entre otras (Osuna *et al.*, 2015).

Entre las aplicaciones más utilizadas en las últimas cuatro décadas se destaca el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) por sus siglas en inglés. Este índice fue puesto en práctica por primera vez en Texas, Estados Unidos (Rouse, 1973). Este autor realizó un monitoreo con reflectancias de diferentes objetos de la superficie para poner en práctica este algoritmo, demostrando que las bandas del espectro electromagnético donde mayor se refracta la vegetación son las correspondientes al rojo (630-690 nm) e infrarrojo cercano (760-900 nm).

Belda *et al.* (1999) en Valencia, España establecieron un análisis espacial mediante correlaciones para tratar de encontrar relaciones entre el NDVI, la precipitación pluvial y la humedad del suelo y otro análisis temporal considerando los datos para el período analizado (1984-1994). Utilizaron imágenes Landsat TM para obtener una clasificación de las áreas forestales y determinaron que existía una correlación lineal entre el NDVI y la humedad del suelo de 0.14 y del NDVI y las precipitaciones de 0.84.

Ruiz *et al.* (2017) utilizaron el NDVI obtenido con imágenes Landsat en el noroeste de Perú en el período de 1985 al 2007. Estos autores cuantificaron los cambios espacio-temporales en la vegetación. Utilizaron tres imágenes comprendidas dentro del lapso de estudio y obtuvieron un aumento en las tasas de cambios en la cobertura del suelo en los bosques latifolios (de 19.17% a 25.3%), en los pastos y árboles dispersos (de 7.88% a 21.70%), en los Tacotales (áreas agrícolas y pastizales abandonados), de 19.58% a 26.30%.

Rullán-Silva *et al.* (2013) cartografiaron la cobertura vegetal en la región Sierra del estado de Tabasco, México con dos imágenes Landsat ETM+ de los años 2000 y 2003 a través del método de clasificación no supervisada. Este método fue utilizado para construir una base de datos de cartografía digitalizada para diferenciar los tipos de coberturas vegetales. Estos autores utilizaron la información cuantitativa correspondiente mediante programas de monitoreo. Mediante matrices de transición determinaron siete clases de cobertura de vegetación partiendo de cartografía temática y concluyeron que la precisión de las clases resultantes de la clasificación no supervisada fue insuficiente para la clasificación de la cobertura vegetal. Además de considerar que la precisión de la mayoría de las clases de cobertura en la cartografía generada fue superior al 70%.

2.2. Cambios de otros registros históricos en cuencas hidrográficas.

Wischmeier & Smith (1978) propusieron una formulación para estimar las pérdidas de suelos en una escala temporal en los Estados Unidos, Texas. Estos autores formularon el modelo para el cálculo de la erosión hídrica, la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) por sus siglas en inglés implicando los factores principales que influyen en dicha erosión: Erosividad de la lluvia (Factor R), Erodabilidad del suelo (Factor K), Uso de suelo y vegetación (Factor C), Longitud del terreno (Factor longitud de la pendiente) y Prácticas de Conservación (Factor P).

Figuroa *et al.* (2011) analizaron los cambios de cobertura del suelo y sus efectos sobre los procesos de degradación y los procesos hidrológicos, en el período de 1975-2009 en la cuenca del río San Cristóbal, México. Además, realizaron clasificaciones supervisadas de imágenes Landsat de 1975, 1993 y 2000 y Spot de 2009. Esta clasificación supervisada es otra forma de evaluar los cambios en la

cobertura del suelo mediante percepción remota, partiendo de puntos de control determinados a partir del trabajo de campo. Asimismo, en este trabajo utilizaron la ecuación USLE para la tasa anual de erosión hídrica y se calculó el volumen de escurrimiento medio anual. Estos autores identificaron para la subcuenca de estudio cinco usos de suelo, de los cuales solo mostró una tendencia de crecimiento las zonas urbanas para los cuatro años de estudio. Se concluyó también que los niveles de erosión hídrica fueron afectados por la pérdida de cubierta forestal y el aumento de las zonas agrícolas y urbanas en el período de 1975 al 2009. También, obtuvieron que los volúmenes de escurrimiento anual mostraron una tendencia a aumentar con 78.12 m³ en 1975 y 82.00 m³ en el 2009.

Flores (2016), estimó la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas localizadas en distintas regiones de la República Mexicana, utilizando la ecuación USLE. Para este trabajo se apoyaron en la implementación de Sistemas de Información Geográfica y utilizaron las bases cartográficas de INEGI, 2016 para obtener los parámetros de la ecuación. Los resultados muestran que las subcuencas analizadas presentaban características diferentes que influyeron en los resultados de la ecuación. Este autor obtuvo grados de erosión desde alta con el 37% de la superficie para una cuenca, moderado con el 29% para otra cuenca y nulo para la tercera cuenca. Se demostró que las condiciones físicas-geográficas como la pendiente y uso de suelo fueron determinantes en los resultados obtenidos.

Soto *et al.* (2000) analizaron dos núcleos de sedimentos en Bahía de Santander, España. Mediante la metodología del ²¹⁰Pb calcularon la Tasa de Acreción Sedimentaria (TAS) así como el fechado de los núcleos de sedimentos. Estos autores obtuvieron un fechado para la parte inferior del núcleo de aproximadamente 100 años y una TAS que aumentó de 0.08 a 0.30 cm/año.

Araneda *et al.* (1999) utilizaron la ecuación USLE y los análisis isotópicos del sedimento mediante el método del ²¹⁰Pb en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta, Chile para estimar la erosión del suelo y la producción histórica de sedimentos desde la cuenca, para el período de 1943 a 1994. Estos autores obtuvieron erosiones de suelo que fluctuaron entre 0.45 y 1 t/ha/año, mientras que el análisis isotópico resultó con una variación entre 0.10 y 1.16 t/ha/año. De acuerdo con los autores, las diferencias encontradas entre las dos metodologías aplicadas

se deben en parte a la baja resolución de la USLE, al no ser capaz de distinguir la protección diferencial ofrecida al suelo por los diferentes usos de suelo.

2.3. Cambios de registros históricos en La Laguna de Términos (LT).

Los cambios espacio-temporales de registros históricos en una cuenca hidrográfica han sido objeto de estudio en diferentes escalas, que va desde lo global hasta lo local. La Laguna de Términos es el cuerpo receptor de la cuenca hidrográfica. La mayoría de las investigaciones realizadas en esta laguna, corresponden a los procesos que ocurren dentro del cuerpo de agua como tal, pero no se han realizado investigaciones sobre la cuenca hidrográfica de este cuerpo lagunar como unidad funcional.

Fíchez *et al.* (2016) realizaron un estudio en Laguna de Términos, Campeche sobre la variabilidad en la distribución de salinidad en un ciclo anual (2009). Los resultados mostraron que la máxima salinidad en la laguna se evidenciaba en los meses de mayo a junio, y los mínimos en octubre y noviembre, con valores de alta salinidad de 32.41 ± 3.35 y 31.29 ± 3.36 respectivamente. Los resultados obtenidos del 2009 fueron comparados con los valores correspondientes al mes de noviembre de los años 1980, 2008 y 2010 (11.18 ± 3.60 , 12.77 ± 5.74 y 17.00 ± 5.40) respectivamente. También relacionaron estos resultados con los registros históricos de los ríos que descargan en la laguna, concluyendo que el aumento de la salinidad coincidía con la disminución de los aportes de agua dulce del río Palizada en el 2009.

Soto *et al.* (2010) mediante una clasificación supervisada con imágenes Landsat 4 y 5 realizaron una evaluación del cambio en la cobertura terrestre y acuática en la Laguna de Términos, Campeche en el período de 1974 a 2001. Estos autores concluyeron que hubo una disminución de bosques tropicales de 6, 200 ha (31%), manglares con 11, 000 ha (12%) y vegetación acuática con 1, 850 ha (1.8%) y un aumento de los pastizales de 60, 000 ha (242%).

Vílleger *et al.* (2010) realizaron un estudio en la Laguna de Términos, Campeche sobre los cambios contrastantes en la diversidad taxonómica y comunidades de peces en el período de 1980 a 1998. Estos autores muestrearon las comunidades de peces en cuatro zonas de la laguna, caracterizadas con 17 estaciones. De acuerdo con lo que obtuvieron, la profundidad de la laguna disminuyó en tres zonas

de 2.8 a 2.1 m, 2.6 a 1.6 m y 2.5 a 1.3 m respectivamente. La salinidad aumentó en las cuatro zonas de 21.3 a 23.1%, 28.5 a 31.7%, 22.4 a 25.9% y de 26 a 31.1% respectivamente, mostrando que los mayores valores se encontraban en las zonas cercanas al río Palizada.

Gonneea *et al.* (2003) colectaron y fecharon un núcleo de sedimento al norte de la Laguna de Términos. Con base a esta información, Aguiñiga *et al.* (2016) correlacionaron la contribución de los productores primarios a la materia orgánica con su porcentaje de cobertura. Estos autores encontraron una disminución de la cobertura de los pastos marinos del 12%, resultados que comparan con los registros históricos de los sistemas fluviales del área, encontrando que la disminución de los gastos de los ríos coincidía con la disminución de las macroalgas y los pastos marinos en el período de 1995 a 2009.

Romo (2013) determinó la relación entre los productores primarios y la distribución de la ictiofauna, así como las contribuciones relativas de los productores primarios hacia la ictiofauna y la materia orgánica sedimentaria (MOS) en la Laguna de Términos, Campeche, para el año 2011. El autor determinó isótopos estables de ^{13}C y ^{15}N para obtener el origen de MOS. Entre sus resultados obtuvo que los pastos marinos y el mangle tuvieron las mayores contribuciones a la ictiofauna para las temporadas de lluvias y secas, mientras que las macroalgas y el fitoplancton tuvieron las mayores aportaciones a la ictiofauna en época de secas.

3. JUSTIFICACIÓN

Los cambios evidenciados en la interrelación cuenca hidrográfica-sistema lagunar en general, son más marcados cada año (Cotler *et al.*, 2013), y son el reflejo de esta interrelación tanto directa como indirecta. Entre las variaciones de estos registros ambientales cabe mencionar la cobertura del suelo, al ser uno de los que más influye en el resto de los registros históricos dentro de la cuenca. Sin embargo, a pesar de la importancia de los estudios sobre la relación cuenca hidrográfica-sistema lagunar, no ha sido objeto de estudio, ya que analizan los procesos del sistema lagunar como individuales e independientes a su cuenca hidrográfica.

La cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos evidencia cambios que pueden verse

reflejados en el sistema lagunar. Por lo tanto, nos planteamos las siguientes interrogantes:

1. ¿Cómo impactan los cambios de la cobertura del suelo en la erosión y exportación de sedimentos a la laguna?
2. ¿Cuál es la relación entre los cambios en la cobertura del suelo con otros registros ambientales como caudales de ríos, precipitaciones pluviales y Tasa de Acreción Másica (TAM)?

4. HIPÓTESIS

Los cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos, Campeche, tienen una alta correlación con la erosión del suelo y otros registros ambientales como caudales de ríos, precipitaciones pluviales y TAM.

5. OBJETIVO

Evaluar los cambios en la cobertura y erosión del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos, Campeche, en el período (1986-2017).

5.1. Objetivos específicos

1. Generar mapas de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017).
2. Determinar las variaciones de los registros ambientales (caudales de ríos, precipitación pluvial y TAM (Subcuenca Pom-Atasta)).
3. Estimar el aporte de sedimentos y la erosión del suelo de las subcuencas mediante el modelo USLE.
4. Correlacionar los cambios en la cobertura del suelo con los registros ambientales, los aportes de sedimentos y la erosión del suelo.

6. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a las cuatro subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos, Campeche. Estas corresponden a las Regiones Hidrográficas RH30 Grijalba-Usumacinta y CH30C Laguna de Términos. Limitan al Norte con el Golfo de México, al Oeste con el estado de Tabasco, al Sur con los estados de Campeche y Chiapas, y al Este con el estado de Yucatán. Las coordenadas (UTM zona 15) que delimitan el área son

556541.91 y 760546.38 Este y 1974172.19, 2115964.97 Norte. Los nombres de estas subcuencas son Pom-Atasta, Palizada, Chumpán, y Candelaria-Mamantel (Fig. 1).

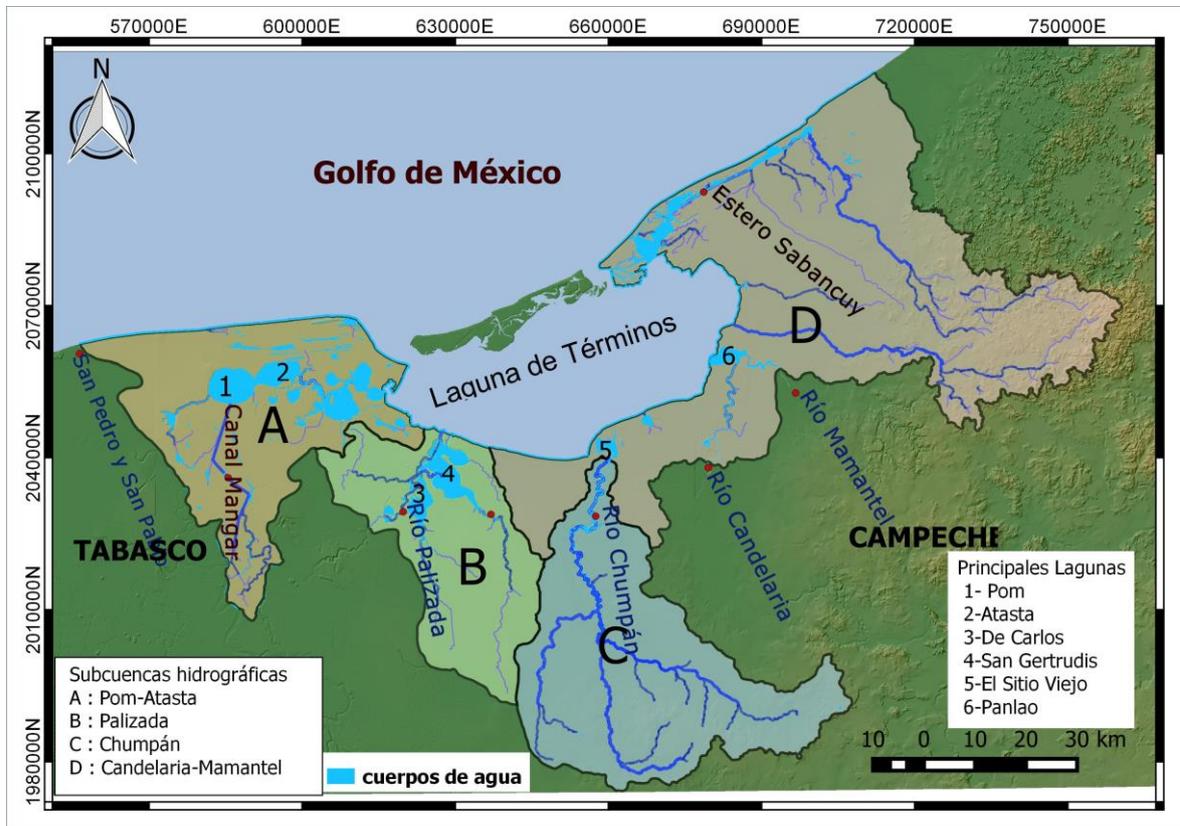


Figura 1. Área de estudio

Cuatro sistemas fluviales contribuyen a la afluencia de agua dulce en la Laguna de Términos:

- Los ríos Candelaria y Mamantel desembocan en la laguna secundaria Panlao en la costa centro-sureña.
- El río Chumpán desemboca en la laguna secundaria El Sitio Viejo.
- El río Palizada desembocan en la cadena de lagunas San Gertrudis (Bach *et al.*, 2015).

La afluencia de agua dulce a la laguna varía según tres épocas: la seca de marzo a mayo, la de lluvias de junio a septiembre y una segunda estación seca de octubre a febrero. Esta última se caracteriza por tormentas intermitentes (nortes) (Bach *et al.*, 2015).

Durante la época seca, la mitad oriental de la laguna se vuelve un estuario inverso, en el cual la evaporación excede la afluencia de agua dulce. La mayor parte del flujo de agua dulce a la LT ingresa por el río Usumacinta, del cual es tributario el río Palizada en el lado occidental de la laguna y desemboca en el Golfo a través de la boca del Carmen que es más pequeña. Estos flujos grandes de los ríos hacen que el tercio occidental de la laguna tenga menos salinidad, sea más turbio, esté bien mezclado y sea más productivo biológicamente que la parte oriental (Bach *et al.*, 2015).

En la región existen dos sistemas de vientos dominantes. De octubre a febrero los vientos son del Noroeste y su velocidad promedio es ligeramente mayor a 8 m/s. La mayor parte del resto del año existe un sistema de brisa marina con vientos, predominantemente del Nornoroeste y Estesudeste. La velocidad promedio de estos vientos varía entre 4 y 6 m/s (Bach *et al.*, 2015).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen (1936) modificada por García (2004), la región de Laguna de Términos presenta tres diferentes tipos de clima: a) clima cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano (Aw1(w)) en Isla Aguada, frente a la Boca de Puerto Real; b) clima cálido subhúmedo con mayor humedad (Aw2(w)) en la zona que rodea a la Laguna de Términos, incluyendo la Isla del Carmen, y c) clima cálido húmedo (el más húmedo de los subhúmedos) con abundantes lluvias en verano (Am(f)) en la zona de Palizada, Pom-Atasta (SEMARNAT, 1997).

La temporada de lluvias se caracteriza por presentar una precipitación de 100 mm/mes para el período de junio a octubre (fin de lluvias e inicio de nortes).

En la región, se conserva una ligera disminución en la precipitación durante los meses de noviembre a febrero (nortes) y se registran los valores mínimos de febrero a mayo (secas). El aporte de sedimento a la laguna deriva de los ríos:

- 1) Palizada con una descarga de 238.126 m³/s, desemboca en la laguna San Gertrudis (Herrera-Silveria *et al.*, 2002).
- 2) Candelaria con una descarga de 35.09 m³/s que desembocan en la Laguna de Panlau.
- 3) Chumpán y Mamantel con una descarga de 1.67 m³/s (Borges- Souza, 2004).

Las principales fuentes de sedimentos terrígenos son las cuencas de los ríos Chumpán y Palizada (a través del río Usumacinta vertiente del Golfo de México); las fuentes de aporte de sedimento carbonatado son el Golfo de México a través de las Bocas de Puerto Real y Boca del Carmen, los cuales son transportados por las corrientes de marea (Borges-Souza, 2004).

El área de estudio forma parte de las provincias: Llanura Costera del Golfo Sur y Península de Yucatán formado por llanuras y áreas pantanosas. Las mayores elevaciones sobre el nivel del mar (340 m) se encuentran en la parte oriental (cerca de Yucatán), así como depresiones que localmente se denominan cenotes (INEGI, 2016-A).

Presentan diez poblaciones del municipio del Carmen y nueve poblaciones del municipio de Palizada. En conjunto estas localidades albergaban en 1990 a 114,027 habitantes (Bach *et al.*, 2015).

7. DATOS Y MÉTODOS

Los datos y métodos por cada uno de los objetivos se describen a continuación. Se representa primero un esquema general (Fig. 2) con todos los objetivos a cumplir. Partiendo de la generación de los mapas de cambio en la cobertura del suelo, seguido de los registros históricos (caudales de ríos, precipitación pluvial y núcleo de sedimento), erosión hídrica del suelo y aporte de sedimento, y por último la correlación de los resultados obtenidos en los objetivos anteriores.

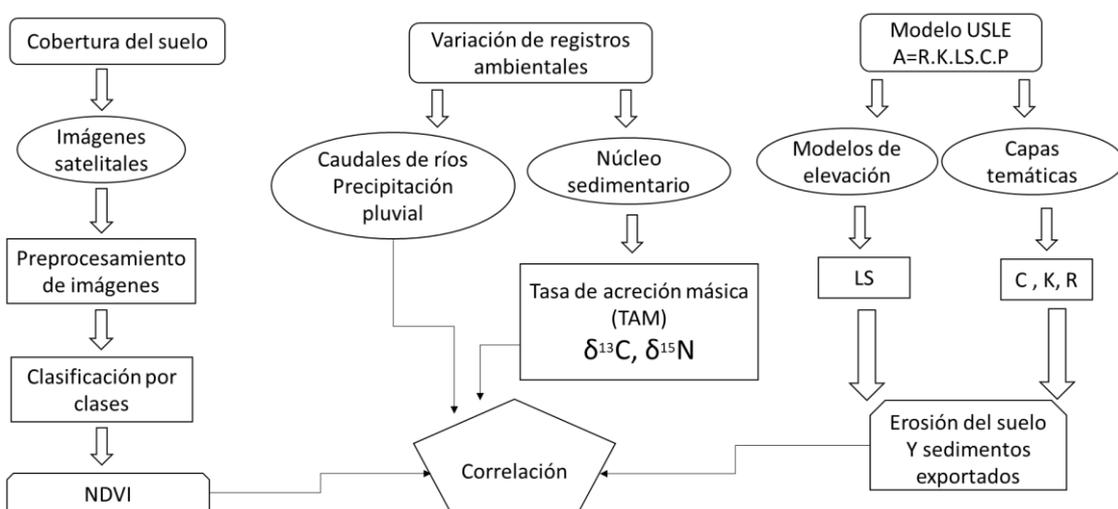


Figura 2. Diagrama metodológico general.

7.1. Generación de mapas del cambio en la cobertura del suelo

7.1.1. Datos para determinar la cobertura del suelo

Imágenes Landsat

Se obtuvieron imágenes de serie de satélites Landsat del sitio/página del Servicio Geológico de Estados Unidos, (<http://landsat.usgs.gov/>). Estas corresponden a las captadas con los sensores TM, ETM, OLI (Tabla 1), de 1986 a 2017 con una periodicidad de 2 y 3 años, seleccionando las que no tuvieran cobertura de nubes (13 imágenes en total) (Tabla 2).

Tabla 1. Características de la serie del satélite Landsat.

Satélite	4 y 5	7	8
Sensores	MSS/TM	ETM+	OLI/TIRS
Resolución espacial (m)	30x30	30x30/15x15	
Resolución temporal	16 días		
Resolución radiométrica	8 bits		
Resolución espectral (bandas)	4/7	8	11

Se seleccionaron imágenes de la época de secas y nortes (de octubre a abril) para las fechas que se muestran en la Tabla 2. Se utilizaron tres escenas de imágenes por cada año, con Path-row (regiones que capta el sensor del satélite) 21-47, 21-48 y 22-47 (Fig. 3).

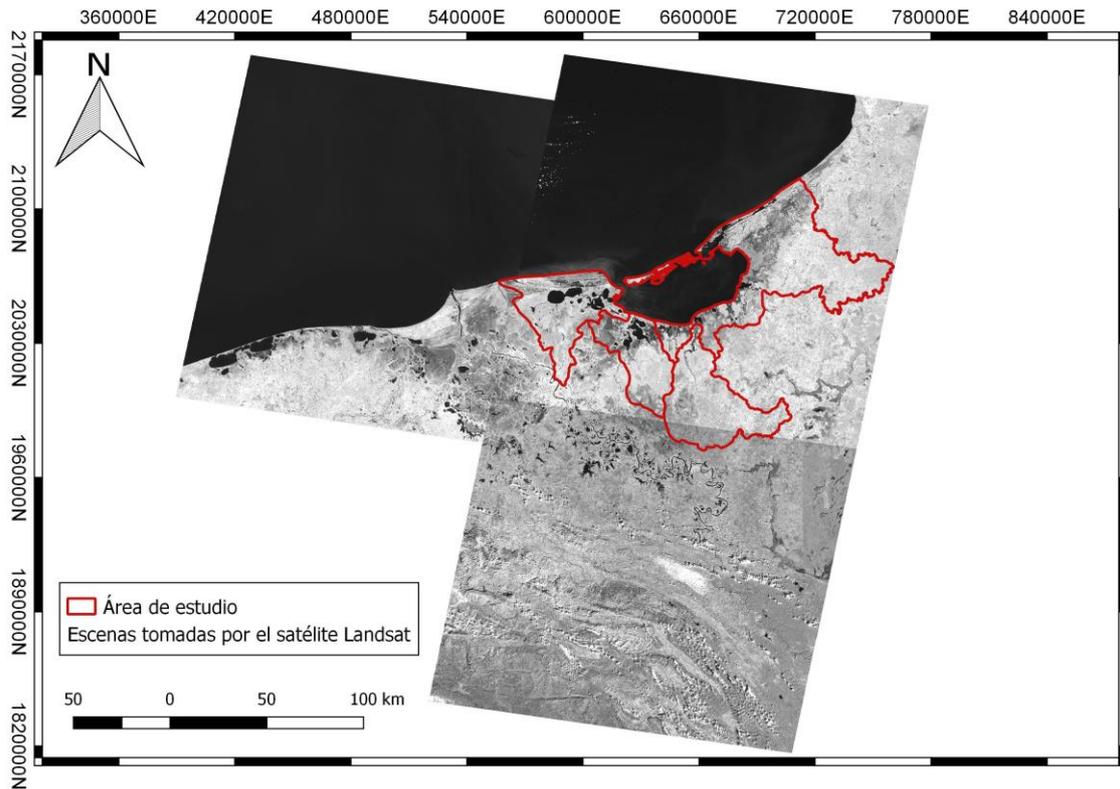


Figura 3. Escenas tomadas por el satélite Landsat. Path-row 21-47, 22-47,21-48.

Tabla 2. Fechas de imágenes satelitales Landsat. 1986-2017.

Años	Satélite	Path-row		
		21-47	21-48	22-47
1986	Landsat_5	15_enero	15_enero	3_marzo
1990		16_abril	16_abril	1_abril
1993		20_diciembre	20_diciembre	25_noviembre
1996		1_noviembre	1_noviembre	18_enero
1998	Landsat_7	17_febrero	17_febrero	8_febrero
2001		29_marzo	29_marzo	28_marzo
2003		11_marzo	11_marzo	18_marzo
2005		27_noviembre	27_noviembre	4_diciembre
2007		19_diciembre	19_diciembre	26_diciembre
2009		7_febrero	7_febrero	14_febrero
2011		18_abril	18_abril	25_abril
2013		Landsat_8	7_abril	9_mayo
2017	14_diciembre		14_diciembre	21_diciembre

Cartografía temática

Se utilizaron las capas temáticas en formato vectorial obtenidas de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), <https://www.gob.mx/conabio>, y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), <http://www.inegi.org.mx/>. Estas corresponden a (Tabla 3):

- a) Las redes hidrográficas.
- b) Series de uso de suelo y vegetación (I a la VI)
- c) División política-administrativa.
- d) Regiones hidrográficas.

Tabla 3. Cartográfica utilizada. INEGI.

Bases cartográficas	Escala	Fuente	Fecha
Red hidrográfica	1:50 000	INEGI	2010
Regiones hidrográficas			
División estatal	1:250 000	INEGI-CONABIO	2005
Uso de suelo y vegetación		INEGI	1986-2016
Serie I			1986
Serie II			1993
Serie III			2002
Serie IV			2007
Serie V			2011
serie VI			2016

7.1.2. Método para determinar los cambios en la cobertura del suelo

Para determinar la cobertura vegetal se utilizó el índice espectral NDVI. Este índice cuantifica la vegetación de una zona y determina su estado (Gómez, 2005).

Los índices en percepción remota son usados para resaltar algunas características particulares de una imagen de satélite. Los objetos en la superficie como el agua, la tierra desnuda o la vegetación, reflejan su radiación de manera distinta en los canales del espectro electromagnético. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral de la superficie. Con base a esta firma espectral, se selecciona el índice con el que se desea trabajar (Olaya, 2014).

Se utilizó el NDVI propuesto por Rouse *et al.* (1974). Este índice es una medida cuantitativa, basada en los valores digitales, que tienden a medir el vigor de la vegetación. Generalmente el NDVI es producto de varios valores que son sumados, divididos o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique el vigor de la vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable (Gómez, 2005). Los valores de estos índices se encuentran en el intervalo (-1,1), donde valores cercanos a cero, indican poca presencia o vigor de la vegetación y valores cercanos a 1, muestran el mayor vigor de esta (Olaya, 2014). El NDVI se formula de la siguiente manera para las bandas correspondientes

al rojo (0.4 a 0.7 μm) e infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm) del espectro electromagnético en los satélites Landsat TM y ETM+ y OLIS.

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{banda 4} - \text{banda 3})}{(\text{banda 4} + \text{banda 3})} \quad (1)$$

Se pre procesaron las escenas obtenidas (3 por año), para aplicarles la corrección atmosférica (Song *et al.*, 2001) con el método DOS1 (Dark Object Subtraction). Este proceso fue realizado en el software QGIS y posteriormente se calculó el NDVI mediante un script escrito en MATLAB.

Para obtener los NDVI correspondientes a cada subcuenca hidrográfica se realizó un mosaico de imágenes por cada año y se recortaron las capas temáticas correspondientes a cada una de las subcuencas de estudio. Luego, se aplicó el álgebra de ráster correspondiente a la fórmula del NDVI en el software QGIS. Con los NDVI resultantes se clasificaron las imágenes en cuatro clases para representar donde se observaba el mayor vigor de la vegetación y el menor, donde la clase de 0-0.25 expresa la cobertura vegetal con menos vigor; 0.25-0.5; 0.5-0.75; y la de 0.75 a 1, siendo esta última la de mayor vigor de cobertura vegetal. Se clasificaron las imágenes satelitales en las cuatro clases antes mencionadas para cuantificar la cobertura vegetal. Por último, se calcula el porcentaje por clases de vigor de vegetación, a partir del área total de cada subcuenca y teniendo en cuenta que el tamaño de cada píxel de las imágenes es de 900 m.

Para diferenciar y conocer los cambios de uso de suelo se utilizaron las series I (1986) y serie VI (2016), obteniendo el lapso más amplio de las series.

Para ver qué tipo de vegetación había sido cambiado por otra, se realizó una matriz de transición que es parte de una metodología útil para identificar los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo, estas se obtienen a través de superponer al menos dos mapas de cobertura/uso del suelo de fechas diferentes y analizar los datos resultantes a través del acomodo matricial de los mismos, con lo que se permite identificar de manera eficiente los cambios entre categorías (Falcón, 2014).

7.2. Caudales de ríos, precipitación pluvial y núcleo de sedimento

7.2.1. Datos

Caudales de ríos

Para el análisis de los caudales de los ríos que descargan en La Laguna de Términos se utilizaron los datos obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas/. Los datos obtenidos en esta página/sitio se encuentran en formato mdb (archivos de base de datos de Microsoft Access). Cada uno de estos archivos presenta la información correspondiente a cada uno de los caudales diarios, mensuales y anuales de los ríos con lapsos que abarcan desde 1953 hasta el 2015.

Precipitación pluvial

Los datos de precipitación pluvial se obtuvieron de la página/sitio <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. De este sitio se utilizaron los datos del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), es un proyecto conjunto entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales (Kummerow *et al.*, 2000). Este satélite presenta resolución espacial de 0.25°x 0.25° y resolución temporal de 3 horas. Se utilizaron los datos correspondientes a las precipitaciones mensuales de 1998 al 2016 con formato netCDF (Network Common Data Form).

Núcleo de sedimento

También se dispone de los datos derivados de un núcleo de sedimento obtenido del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) colectado en el 2017 en el sistema lagunar Pom-Atasta. De este núcleo obtuvieron el fechado para el período de 1940-2014 (Fig. 4). De este núcleo se obtuvo la Tasa de Acreción Másica (TAM) y los isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en el sistema lagunar Pom-Atasta.

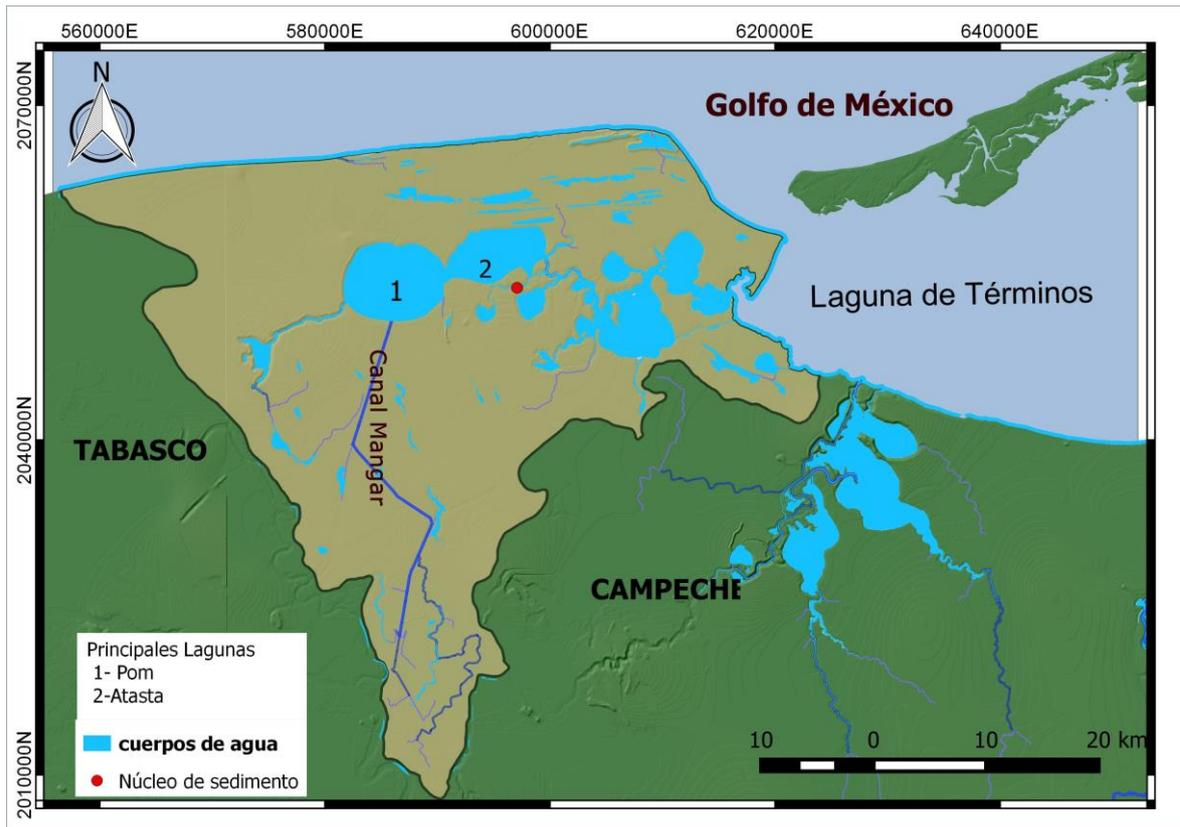


Figura 4. Ubicación de la extracción del núcleo sedimentario en la subcuenca hidrográfica Pom-Atasta.

7.2.2. Método para los caudales de ríos, precipitación pluvial y núcleo de sedimento

Caudales de ríos

Se seleccionaron los meses de épocas de secas y nortes para el período de 1995 a 2014, para que coincidieran con las épocas en las que fueron captadas las imágenes por el satélite. Además de representar por separado los ríos que pertenecen a cada una de las subcuencas hidrográficas. Para visualizar la hidrografía del área de estudio se utilizó la red hidrográfica de INEGI con escala 1:50000, para corroborar los ríos que descargan directamente en La Laguna de Términos.

Precipitación pluvial

Se seleccionaron los archivos mensuales de las precipitaciones con información de las coordenadas y precipitaciones por punto en formato nedCDF (Network Common Data Form). Éstos fueron procesados mediante un script elaborado/escrito en MATLAB para obtener un archivo por cada año en formato csv (comma-separated

values). Posteriormente, mediante en software QGIS se convirtieron en archivos vectoriales de puntos, donde cada uno contiene la información referente a la precipitación mensual y acumulada anual. Se seleccionan finalmente solo los puntos que se encuentran dentro de cada una de las subcuencas de estudio para representar la precipitación tanto mensual como acumulada anual.

Núcleo de sedimento

Las muestras del núcleo de sedimento fueron proporcionadas por la Dra. Carolina Ruíz del ICMYL-UNAM. El núcleo se recolectó manualmente con tubos de PVC de 9 cm de diámetro interno. La columna sedimentaria se seleccionó a cada cm. El fechado se determinó mediante la metodología del ^{210}Pb (Attix, 1986) y una vez determinada la edad, calcularon la TAM ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) y la Tasa de Acreción Sedimentaria (TAS) mediante la metodología de Sánchez-Cabeza *et al.* (2012). Para determinar el origen de la materia orgánica, en cada uno de los horizontes sedimentarios se determinaron los isótopos estables de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) con previa eliminación de carbonatos (Carabel *et al.*, 2006). Las muestras de sedimento fueron determinadas en el Laboratorio de Espectrometría de Masas (LESMA) del Laboratorio de Química del CICIMAR-IPN usando un IRMS-EA Delta V Plus Thermo Electron. La precisión fue de 0.2 ‰ para ambos isótopos.

7.3. Erosión del suelo y sedimento exportado a la Laguna de Términos

7.3.1. Datos

Modelo Digital de Elevación. MDE

El Modelo Digital de Elevación (MDE) se obtuvo de INEGI (2016) con una resolución espacial de 30 m en formato ráster. Este DEM se recortó a las áreas de las subcuencas de estudio y fueron procesados para una mejor interpretación de su información en el software QGIS, realizando las correcciones necesarias del mismo.

Capa edafológica

Esta capa se obtuvo también de INEGI, basada en el conjunto de datos vectoriales Edafológicos, escala 1:250 000, Serie II. Contiene información de los grupos de suelo que existen en el territorio nacional, obtenida durante el período 2002-2006,

utilizando para la clasificación de los suelos el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB por sus siglas en inglés) (INEGI, 2016). De esta capa se obtuvieron los tipos de suelos correspondientes al área de estudio, así como la granulometría de estos.

Capa de uso de suelo y vegetación

Para utilizar la información de las series de uso de suelo y vegetación fue necesario reclasificar la cobertura vegetal, debido a que varían de una serie a otra, por lo que se homogenizaron para el período y cobertura a evaluar (Tabla 3). Solo se utilizaron las series de la III a la VI (2002-2016) debido que a partir de estos años es donde se tiene información de los demás parámetros de la ecuación USLE.

7.3.2. Método

Para estimar la erosión del suelo se aplicó la ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), propuesta por Wischmeier & Smith (1978). Esta ecuación agrupa interrelaciones de parámetros que influyen en el índice de erosión. Los valores de los parámetros de la USLE son expresados para un sitio específico (Flores, 2016).

La ecuación se expresa como:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Donde:

A: Promedio anual de pérdida de suelo, en $t^{-1}ha^{-1}año^{-1}$.

R: Factor de erosividad de la lluvia, en $MJ\ mmha^{-1}h^{-1}año^{-1}$.

K: Factor de erodabilidad del suelo, en $t\ ha\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}ha^{-1}$.

L: Factor de longitud de la pendiente, adimensional.

S: Factor de grado de la pendiente, adimensional.

C: Factor de manejo de cultivos o uso de suelo y vegetación, adimensional.

P: Factor de prácticas mecánicas de control de la erosión, adimensional.

Según Rosse *et al.* (1973), los factores topográficos (LS) y el factor uso y vegetación del suelo (C) ejercen la mayor influencia en la eficiencia del modelo global.

Cabe señalar que de los parámetros de la ecuación solo varían los factores R y C de un año a otro, siendo los factores modificadores en la escala temporal (un año) para esta ecuación.

Para poner en práctica el modelo USLE se utilizó el módulo SDR (Sediment Delivery Ratio model) del software InVEST, (Natural Capital Project, 2018), que es un conjunto de modelos de software de código abierto que se utilizan para cartografiar y valorar diferentes parámetros tanto naturales como antrópicos. Con el inVEST además de obtener la erosión del suelo, también se obtiene el sedimento exportado al cuerpo de agua receptor, estimando de esta forma el sedimento que aportan las principales corrientes superficiales a la Laguna de Términos.

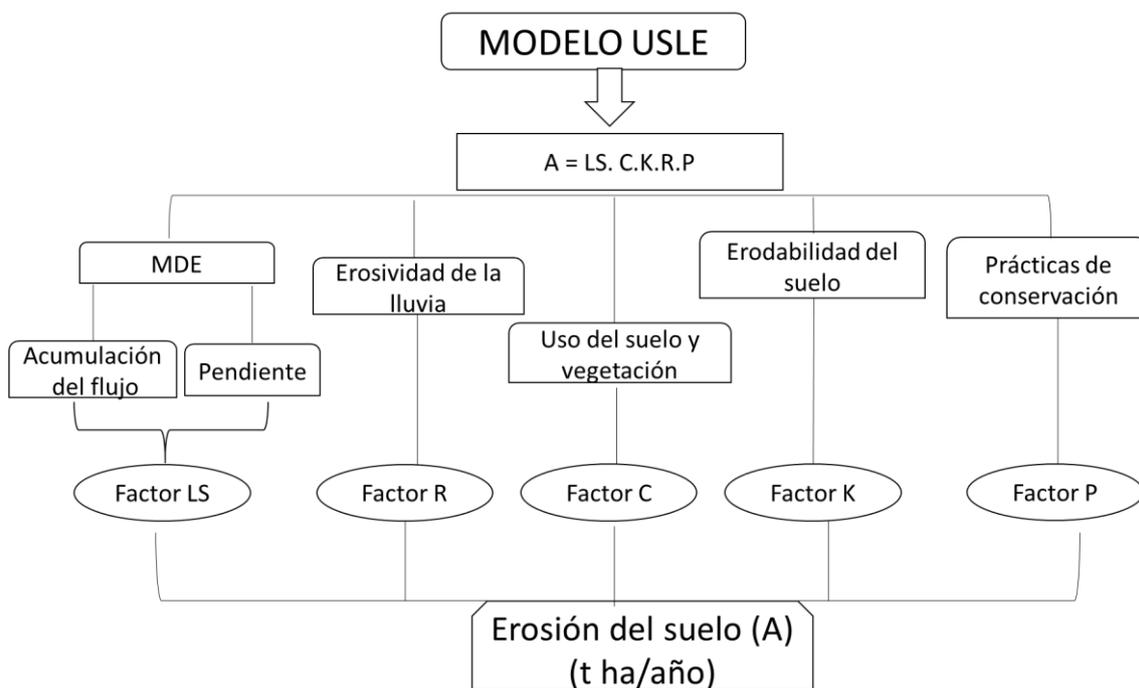


Figura 5. Esquema metodológico para estimar la erosión del suelo mediante la USLE

7.3.3. Parámetros de la ecuación USLE

Factor R. Erosividad de la lluvia

Este factor representa la capacidad de la lluvia de producir erosión, es decir, la energía cinética de la lluvia necesaria para remover y transportar las partículas del suelo. La precipitación excede la capacidad de infiltración, se presenta un escurrimiento superficial, con capacidad de remover y transportar partículas del suelo. Wischmeier & Smith (1978) encontraron que el mejor estimador de la erosividad de la lluvia (EI_{30}) se obtiene mediante la ecuación:

$$EI_{30} = (E) (I_{30}) \quad (3)$$

En donde:

EI_{30} = Índice de erosividad para un evento (MJmm/ha hr).

E = Energía cinética de la lluvia (MJ/ha).

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia (mm/hr).

Con la suma de todos los EI_{30} de cada uno de los eventos del año va a obtener el Índice de erosividad anual (R) y se calcula:

$$R = \sum_{j=1}^n (EI_{30}) \quad (4)$$

En donde

R = Erosividad de la lluvia.

n = Número de eventos durante el año.

EI_{30} = Índice de erosividad de la lluvia por evento.

Cortés, 1991 estimó la erosividad de la lluvia para el territorio mexicano. Este autor dividió al país en 14 regiones de las cuales la 12 corresponde al área de estudio (Fig.6).

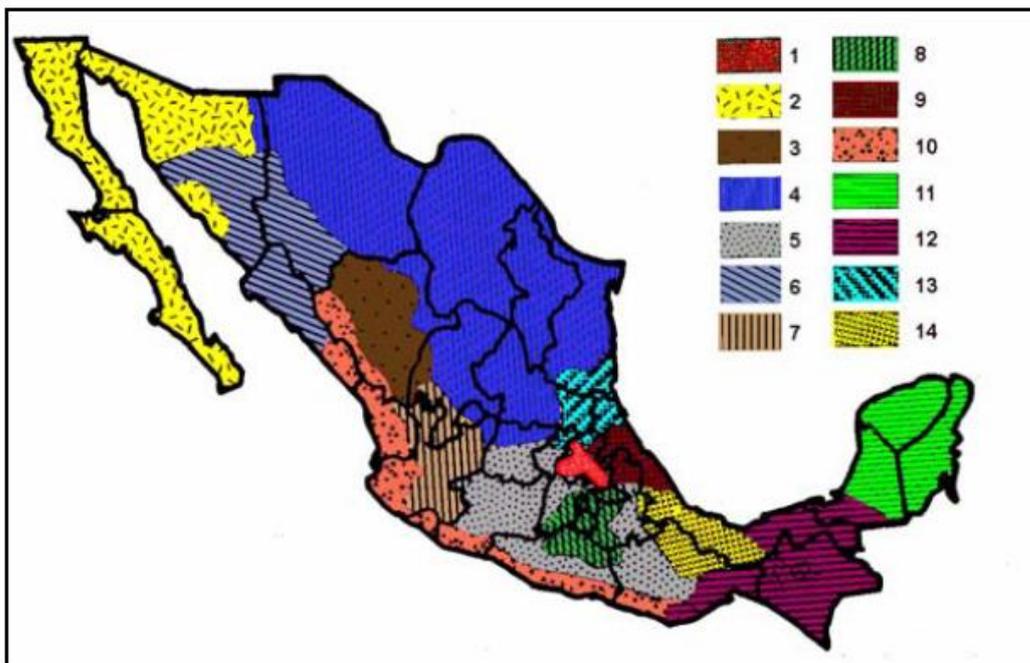


Figura 6. Erosividad de la lluvia para las diferentes regiones de México (tomado de Cortés, 1991).

Cortés (1991) propone para esta región la ecuación

$$Y = 2.46190x + 0.006067x^2 \quad (5)$$

Donde

x: es la lluvia anual acumulada

Y = EI_{30} : Erodabilidad de la lluvia

Para la erosividad de la lluvia se utilizaron los datos de precipitación obtenidos del satélite TRMM (descritos en el apartado 7.2.1).

Una vez seleccionada la ecuación correspondiente al área de estudio se aplicó la interpolación IDW (Interpolación Inversa por Distancia Ponderada) que determina los valores de las celdas mediante una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa y la superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Los mapas resultantes se convirtieron en formato ráster con resolución espacial de 30 m como el resto de los parámetros de la ecuación USLE.

Para generar el mapa del factor R en cada subcuenca de estudio del presente trabajo se seleccionaron los puntos obtenidos de las capas vectoriales creadas para cada año a partir de los archivos nedCDF que contenían la precipitación acumulada anual de 1998 al 2016.

Factor K. Erodabilidad del suelo

La erodabilidad del suelo es la susceptibilidad del suelo a erosionarse, a mayor erodabilidad, menor resistencia tendrá el suelo a la acción de los agentes erosivos. De acuerdo con las diversas propiedades de los suelos, se pueden dividir en dos categorías las que pueden afectar a la erodabilidad. Wischmeier y Smith (1978) separan estas categorías en las que afectan la capacidad de infiltración y almacenamiento, y las que influyen en la resistencia a la dispersión y al transporte durante la lluvia y el escurrimiento.

Para obtener el factor K de cada subcuenca se seleccionaron los tipos de suelo del área de estudio, así como su granulometría a partir de la base cartográfica temática de INEGI antes descritas con escala 1:250 000 (Tabla 4).

La FAO propuso un método para estimar el factor K (FAO, 1980), que utiliza la unidad de clasificación del suelo FAO/UNESCO y la textura como parámetros para determinar K (Tabla 4).

Tabla 4. Valores del factor de Erodabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial del área de estudio. FAO, 1980.

Símbolo	Tipo de suelo	Textura		
		Gruesa	Media	Fina
J	Fluvisol	0.026	-	-
G	Gleysol	0.026	0.04	0.013
R	Regosol	0.026	-	-
E	Rendzina	-	0.02	0.007
Z	Solonchak	0.0053	-	0.013
V	Vertisol	-	-	0.026
Q	Arenosol	0.013	-	-

Factor LS. Factores de longitud (L) y grado de la pendiente (S).

La pendiente del terreno es uno de los factores que afecta los escurrimientos superficiales dándole mayor velocidad. El tamaño de las partículas, así como la cantidad de material que el escurrimiento puede desprender son una función de la velocidad con la que el agua fluye sobre la superficie. Por lo que se puede decir que la velocidad depende de la pendiente y de su longitud (Ríos, 1987).

La longitud de la pendiente (L) es definida (Wischmeier y Smith, 1978) por la distancia del punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde cambia el grado de la pendiente. La acumulación del volumen de agua escurrido en toda la pendiente incrementa la capacidad de desprendimiento y transporte del escurrimiento superficial. Estos autores propusieron para estimar L con la siguiente fórmula:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \dots\dots\dots (6)$$

En donde:

L: Factor longitud de la pendiente (adimensional)

λ : Longitud de la pendiente (metros)

m: coeficiente que depende del grado de la pendiente (varía de 0.2 a 0.5).

Tabla 5. Valores que toma m en función de la pendiente. Wischmeier & Smith, 1978

pendiente (%)	Valor de m
< 1	0.2
1-3	0.3
1-5	0.4
> 5	0.5

El grado de pendiente también es muy importante porque a medida que el grado de inclinación se incrementa, las pérdidas de suelo también lo hacen (McCool *et al.*, 1987). Por lo que pudiéramos decir que el grado de la pendiente es directamente proporcional a la erosión del suelo.

Para obtener el grado de la pendiente (S) se parte de la ecuación (Wischmeier y Smith, 1978).

$$S = 0.065 + 0.45s + 0.0065 s^2 \dots\dots\dots (7)$$

Donde

S = Factor por grado de pendiente (adimensional)

s= Grado de pendiente (%)

Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) de INEGI, con resolución espacial de 30 m para el cálculo de LS. A pesar de que estos parámetros presentan cierta complejidad para sus cálculos, solo se preprocesó el MDE, debido a que el software inVEST realiza todos los cálculos antes mencionados y solo requiere del MDE para calcular el parámetro LS (Fig. 7).

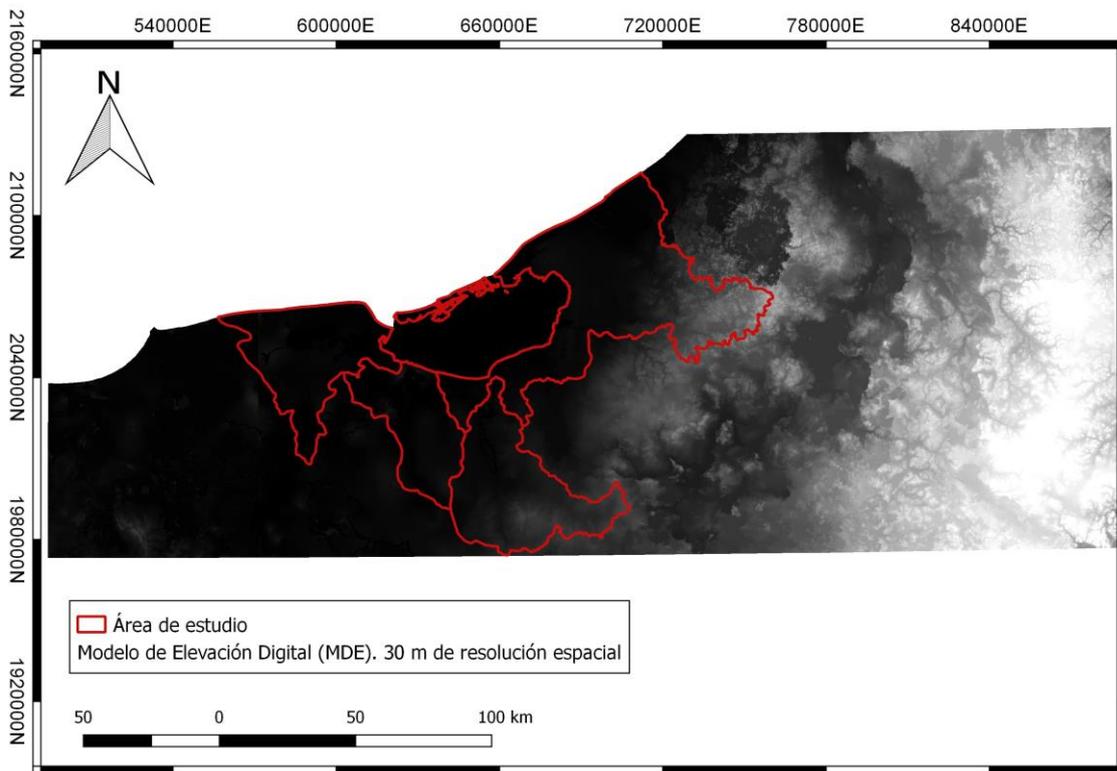


Figura 7. Modelo de Elevación 30 m de resolución espacial. INEGI, 2013.

Factor C. Factor de manejo de cultivos o uso de suelo y vegetación

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de la precipitación. No solo controla la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad del escurrimiento superficial (Flores, 2016).

El uso de suelo y vegetación es uno de los factores que varía de un año con respecto a otro. El factor C juntamente con la pendiente son los más importantes en el control de la erosión hídrica. La cobertura vegetal tiene grandes efectos en la reducción de las pérdidas de suelo, pues le brinda protección de los agentes erosivos (Loredo *et al.*, 2007).

Cuando la cobertura vegetal es abundante reduce la erosión, a pesar de que los efectos de la vegetación varían dependiendo del suelo y del clima, así como de la estación de crecimiento de las plantas, clases de raíces, entre otras características (Loredo, 1994).

Loredo *et al.* (2007) se refiere al factor C como la relación entre las pérdidas de suelo que se producen bajo un determinado uso y bajo determinadas condiciones de manejo. Es considerado como un factor atenuante y toma valores de 0 a 1. A medida que la cobertura vegetal aumenta en densidad y frecuencia, el valor de C tiende a disminuir.

Se utilizaron de la serie III a la VI de uso de suelo y vegetación de INEGI y se obtuvieron cuatro capas temáticas para cada una de las series (Fig. 10, Anexos 18, 19,20). A cada uno de los tipos de uso de suelo y vegetación se le designó el valor correspondiente del factor C (Uso de suelo y vegetación) obtenido de diversas fuentes (Flores, 2016; FAO, 1980, Pedraza, 2015).

Para el factor C fue necesario elaborar una tabla para el Software inVEST. Esta es una tabla biofísica donde se le designan valores enteros a cada uno de los usos de suelo y vegetación con sus valores de C correspondientes (Anexo 12.20).

Factor P. Prácticas de conservación

La conservación de suelos es la ciencia de mantener y/o aumentar la productividad de los terrenos mediante prácticas mecánicas, vegetativas y agronómicas, que aplican según las características particulares de cada tipo de terreno. El factor P expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando la práctica de conservación que se aborda, y que se perdería labrando según la máxima pendiente (Flores, 2016).

En el área de estudio de estudio del presente trabajo no se desarrollan prácticas de conservación, por lo que el factor P se omite de la ecuación.

7.4. Correlación de los cambios en la cobertura del suelo y registros históricos analizados

Para este último objetivo se realizó una correlación lineal de los datos de cada uno de los registros históricos por subcuencas.

Para la subcuenca Pom- Atasta, es donde más correlaciones se realizaron de los registros históricos, al ser la subcuenca que presenta el núcleo de sedimento analizado. Sin embargo, esta subcuenca no presenta una red hidrográfica principal, siendo la única subcuenca que no tiene algún río para analizar su caudal.

Para las demás subcuencas hidrográficas se correlacionaron las clases de vigor de la vegetación con la precipitación pluvial, caudales de ríos y TAM en el caso de la subcuenca Pom-Atasta.

8. RESULTADOS

8.1. Cambios en el NDVI

En las tablas 6, 7, 8 y 9 se representan los porcentajes de cobertura vegetal correspondientes a cada subcuenca hidrográfica de estudio con respecto al área total de estas. Se muestran los cambios en la cobertura vegetal de 1986 al 2017 como porcentajes con respecto al área de cada subcuenca (%). En la sesión 8.2 se describirá más detallado estos resultados junto con la distribución espacial de la cobertura vegetal.

En la tabla 6 se observa que del año 1986 hacia el 2017 en la subcuenca Pom-Atasta hubo una disminución de la clase de vigor de la vegetación de 0 a 0.25 de 5.4% a 1.9%. Sin embargo, hubo un aumento en las clases de 0.25 a 0.5 y de 0.5 a 0.75 con porcentajes de 6.9 a 15.5 y 42.6 a 81.8 respectivamente. Mientras que en la clase de mayor vigor (0.75-1) de la vegetación hubo una disminución considerable del 45.1% al 0.8% hacia el 2017.

Tabla 6. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Pom-Atasta.

Años	Subcuenca Pom-Atasta (%)			
	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	> 0.75
1986	5.4	6.9	42.6	45.1
1990	3.6	18.9	76.9	0.5
1993	4.2	4.4	53.7	37.7
1996	3.5	8.7	57.5	30.2
1998	1.9	5.0	55.4	37.6
2001	2.7	18.6	59.1	19.6
2003	2.8	20.9	73.0	3.3
2005	2.4	24.2	73.3	0.02
2007	2.4	14.2	83.0	0.4
2009	2.7	15.1	81.8	0.4
2011	3.7	20.9	75.4	0.0
2013	4.9	37.6	57.4	0.1
2017	1.9	15.5	81.8	0.8

La subcuenca Palizada en 1986 tuvo en la clase de 0 a 0.25 el 3.3% del área total de la subcuenca, valor que disminuye en el 2017 al 1.4%. En las clases de 0.25 a 0.5 y de 0.5 a 0.75 los porcentajes del vigor de la vegetación aumentaron del 17.3% al 30.2% y del 41.6% al 65.5%. Sin embargo, la clase de mayor vigor de la vegetación disminuyó del 37.8% al 3% (Tabla 7).

Tabla 7. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Palizada.

Años	Subcuenca Palizada (%)			
	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	> 0.75
1986	3.3	17.3	41.6	37.8
1990	6.5	35.2	58.1	0.1
1993	2.9	18.3	46.7	32.1
1996	2.6	14.8	56.5	26.1
1998	1.1	25.0	47.5	26.4
2001	2.8	16.9	53.6	26.7
2003	6.8	46.2	46.5	0.54
2005	2.7	30.6	66.5	0.2
2007	2.3	26.3	70.4	1.0
2009	3.3	40.5	55.9	0.3
2011	2.9	44.5	52.5	0.01
2013	2.3	44.7	53.0	0.02
2017	1.4	30.2	65.5	3.0

Para la subcuenca Chumpán, los porcentajes de cobertura de vegetación para la clase de 0 a 0.25 disminuyeron de 1986 con el 0.7% al 0.2% en el 2017. Las clases de 0.25 a 0.5 y de 0.5 a 0.75 aumentaron de 8.6 a 9.7% y del 62.7% al 88.1%. La clase de 0.75 a 1 disminuyó del 27.8 al 1.9% (Tabla 8).

Tabla 8. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Chumpán.

Años	Subcuenca Chumpán (%)			
	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	> 0.75
1986	0.71	8.70	62.71	27.88
1990	1.66	24.63	73.63	0.08
1993	0.55	5.57	71.81	22.07
1996	1.37	6.71	72.31	19.62
1998	0.84	15.37	71.65	12.14
2001	0.85	33.66	60.03	5.47
2003	9.47	71.36	19.12	0.05
2005	0.49	12.86	86.45	0.20
2007	0.40	8.49	88.93	2.17
2009	1.02	53.59	45.24	0.15
2011	0.91	64.22	34.86	0.00
2013	1.31	64.21	34.47	0.01
2017	0.20	9.72	88.09	1.99

De la subcuenca Candelaria-Mamantel se obtuvo para la clase de 0 a 0.25 porcentajes que disminuyeron de 1986 al 2017 del 1.9 a 1.6%. Para las clases de 0.25 a 0.5 y de 0.5 a 0.75 aumentó el vigor de la cobertura de la vegetación de 5.3 a 17.9% y de 34.2 a 73.8%. Se obtuvo para la clase de 0.75 a 1 una disminución del 59.1 al 6.5% (Tabla 9).

Tabla 9. Porcentajes de cambio en la cobertura del suelo (1986-2017) en la subcuenca hidrográfica Candelaria-Mamantel.

Años	Subcuenca Candelaria-Mamantel (%)			
	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	> 0.75
1986	1.35	5.30	34.27	59.07
1990	1.86	31.55	65.73	0.87
1993	0.71	8.48	42.98	47.82
1996	0.58	7.67	40.81	50.94
1998	0.58	14.75	47.12	37.54
2001	1.54	21.38	54.49	22.58
2003	4.78	40.41	54.31	0.49
2005	1.58	20.13	77.58	0.71
2007	0.87	19.08	75.51	4.54
2009	2.01	30.32	65.97	1.70
2011	6.44	57.30	36.25	0.01
2013	3.50	52.67	43.83	0.00
2017	1.64	17.97	73.84	6.56

8.2. Distribución espacial de la cobertura del suelo

Se obtuvieron 13 mapas de NDVI, en el período comprendido de 1986 a 2017. Los mapas representan las cuatro clases del vigor de la vegetación para cada una de las subcuencas analizadas. Se muestra, además, los porcentajes de cobertura vegetal para cada subcuenca (Fig 8 y 9, anexos 12.1-12.11).

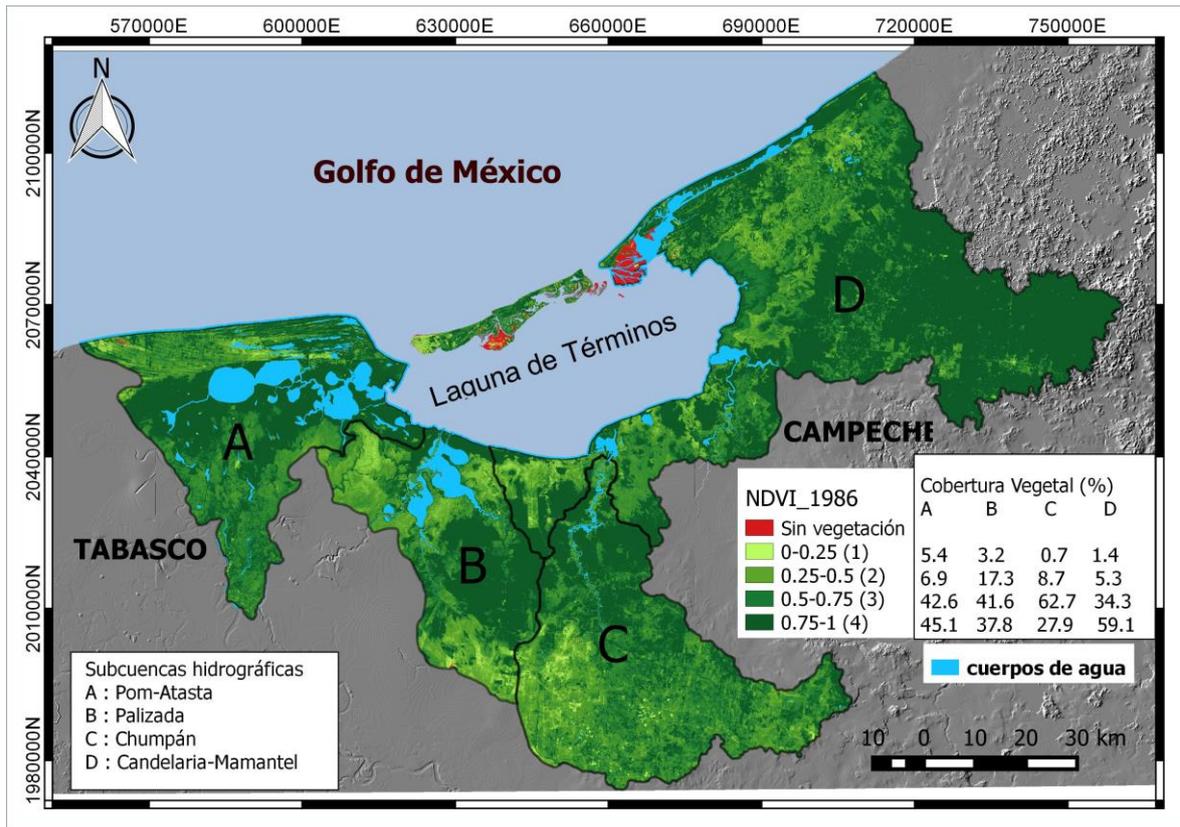


Figura 8. NDVI y porcentajes de cobertura vegetal. 1986

A continuación, se van a describir los cambios en la cobertura del suelo en porcentajes por clase de vigor de la vegetación en cada subcuenca. A cada clase de vigor de vegetación se le designó una numeración en los mapas. La clase de 0-0.25 (1), 0.25-0.5(2), 0.5-0.75(3), 0.75-1(4) para una mejor explicación de las clases, así como a las subcuencas hidrográficas. La subcuenca Pom-Atasta (A), Palizada(B), Chumpán(C), Candelaria-Mamantel(D).

Subcuenca Pom-Atasta (A)

Para esta subcuenca hidrográfica los porcentajes de cobertura vegetal en la clase (1) oscilaron entre el 2 y 5%. Es la clase que menos variaciones presentó en el lapso de estudio. La clase (2) mostró porcentajes que oscilaron entre el 5 y 37%, sin embargo, ya aquí se obtuvieron variaciones de la cobertura vegetal más marcadas con respecto a la clase (1). En el período de 1986 a 1998 los valores estuvieron por debajo del 10%, excepto en el año 1990 que alcanzó el 18%. A partir del 2001 aumentó la cobertura vegetal hasta el 24%, excepto en el año 2013 que alcanzó el 37%. Para la clase (3) se obtuvieron los mayores porcentajes de la

cobertura vegetal con respecto al resto de las clases. Los porcentajes estuvieron entre el 42 y 83%, siendo la clase más predominante durante todo el período de 1986 al 2017. En la clase (3) hasta el año 2001 los porcentajes estuvieron entre el 42 y 59%, a partir de este año continúan aumentando y se mantienen con valores entre el 73 y 83%, excepto en el año 2013 que disminuye al 57%. Por último, la clase (4), fue la que mostró la mayor disminución en la cobertura vegetal con respecto a las demás clases, con valores que disminuyeron del 45 al 0.1%. La clase (4) es la que representa el mayor vigor de la cobertura vegetal y fue la que más disminuyó. De 1986 a 1998 en la clase (4) los porcentajes oscilaban entre el 30 y 45% excepto en el año 1990 que hubo una disminución considerable al 0.5%. A partir del 2001 la disminución de esta clase fue notable al mantener valores menores al 1% hasta el 2017. Es importante resaltar que el año 2005 no presentó la clase (4).

Subcuenca Palizada (B)

Para la subcuenca Palizada en la clase (1) se obtuvieron porcentajes entre el 1 y 6.8%. Esta clase no presentó variaciones muy significativas en el lapso de 1986 al 2017, a pesar de que en los años 1990 y 2003 los porcentajes de cobertura vegetal estuvieron por encima del 6% a diferencia del resto de los años que se mantuvieron en valores que no superaban este porcentaje. Para la clase (2) la cobertura vegetal estuvo entre el 14 y 46%. De 1986 al 2001 los porcentajes fueron menores al 30% excepto en el año 1990 que fue del 35%, mientras que a partir del 2003 aumentaron los porcentajes en la clase (3) con valores entre el 30 y 44%, excepto en el 2007 que disminuyó al 26%. La clase (3) fue la que mayor cobertura vegetal presentó durante todo el período de 1986 al 2017. Los porcentajes estuvieron entre el 41 y 70% sin mostrar algún año. La clase (4) presentó porcentajes entre el 0.3 y 37%, siendo la clase que más variaciones mostró durante el período de estudio. De 1986 al 2001 los porcentajes de cobertura vegetal estuvieron entre 26 y 37%, excepto en el año 1990 que hubo una disminución notable del 0.1%. A partir del 2003 los porcentajes disminuyeron y se mantuvieron con valores menores al 3%, incluso se obtuvo la ausencia de la clase (4) en los años 2011 y 2013.

Subcuenca Chumpán (C)

En la subcuenca Chumpán la clase (1) no tuvo valores mayores al 2%, excepto en el año 2003 que alcanzó el 9%. Para la clase (2) se mostraron más variaciones con respecto a la clase (1) en los porcentajes de cobertura vegetal durante el período de estudio. En la clase (2) los valores estuvieron entre el 5 y 64%. A pesar de ser un rango de porcentaje amplio, en esta clase los valores obtenidos son muy variables de un año con respecto al otro. De 1986 al 2001 los porcentajes fueron del 5 al 33%, luego se observó un aumento en el 2003 del 71% y vuelve a disminuir hacia el 2017 hasta el 9%. La clase (3) tuvo porcentajes entre el 19 y 88%, siendo la que mayores valores presentó durante todo el período. De 1986 al 2007 hubo porcentajes entre el 60 y 88%, excepto en el año 2003 que disminuyó al 19%. Del 2009 al 2013 hubo una disminución en la clase (3) con porcentajes entre el 34 y 45% que aumentó nuevamente en el 2017 con el 88%. Finalmente, en la clase (4), los valores de cobertura vegetal oscilaron entre el 0.1 y 27%, siendo la clase que más disminuyó en el lapso de estudio. De 1986 a 1998 se obtuvieron porcentajes entre el 12 y 27% excepto en 1990 que disminuyó al 0.1%. Del 2001 al 2017 continuó la clase (4) disminuyendo al mantener valores menores a 3%, teniendo en cuenta la ausencia de esta clase en los años 2011 y 2013.

Subcuenca Candelaria-Mamantel (D)

La subcuenca Candelaria-Mamantel en la clase (1) mostró porcentajes de cobertura vegetal menores al 4%, excepto en los años 2003 y 2011 que llegó al 6%. Para la clase (2) se obtuvo porcentajes que oscilaron entre el 5 y 57%, siendo la clase con mayor variación de un año con respecto al otro durante el período de estudio. Para la clase (3) los porcentajes oscilan entre el 34 y 77%, evidenciándose un aumento de 1986 al 2017. De 1986 al 2003 los porcentajes oscilan entre el 34 y 54% excepto en el año 1990 que fue del 65%. Del 2005 al 2017 aumenta la cobertura vegetal entre 73 y 77% excepto en los años 2011 y 2013 que disminuye al 36 y 43%. Para la clase (4) hubo una variación de 0.9 a 59%. De 1986 al 2001 los porcentajes disminuyeron entre 59 y 22% excepto en 1990 que fue notable con 0.9%. A partir del 2003 continúa disminuyendo con porcentajes que oscilan hasta el 2017 entre el 0.5 y 6%. En la clase (4) es representativo también que está ausente en los años 2011 y 2013.

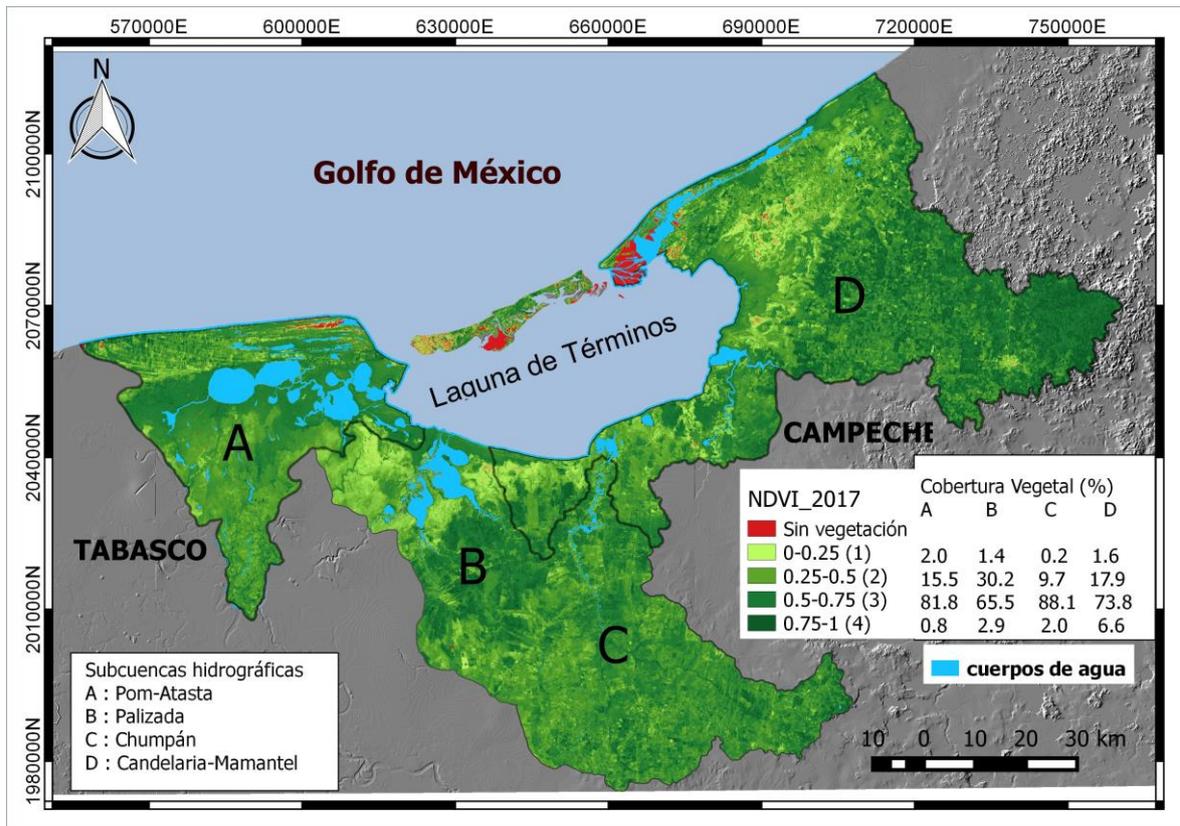


Figura 9. NDVI y porcentajes de cobertura de suelo. 2017

8.3. Clasificación de la cobertura vegetal por clases de vigor de la vegetación.

Para dar una mejor representación de lo observado en los mapas de cambio de cobertura del suelo, se graficaron las clases de vigor de la vegetación por subcuenca. De esta manera, se pudo observar la clase de vigor de la vegetación predominante y la subcuenca que presentó mayor o menor cobertura vegetal durante el período de estudio.

Clase de vigor de la vegetación de 0-0.25

Para esta clase se obtuvo que las subcuencas Pom-Atasta, Chumpán y Palizada mostraron comportamientos similares durante todo el período de estudio (1986-2017), tuvieron una cobertura vegetal que no sobrepasó el 10% con respecto al área total de cada subcuenca (Fig. 10). Para el año 1990 tienden a aumentar su cobertura vegetal, aunque no con porcentajes muy significativos, siendo la subcuenca Pom-Atasta la que mayor valor presentó con el 5.4%. Sin embargo, se

observaron los mayores porcentajes en 1990 con un ligero aumento del 6% (subcuenca Palizada) y en el 2003 con el 9.4% (subcuenca Chumpán), siendo este último el mayor porcentaje para todo el período de estudio. Mientras que la subcuenca Candelaria-Mamantel presentó un comportamiento diferente al resto de las subcuencas al disminuir su cobertura vegetal de 1986 a 1998, presentando valores que no sobrepasaron el 1% en el año 1998. Sin embargo, todas las subcuencas tienden a disminuir su cobertura vegetal hacia el año 2017, excepto la subcuenca Candelaria-Mamantel que tuvo un ligero aumento del 1.4% (1986) al 1.64% (2017) (Ver anexo 12.12).

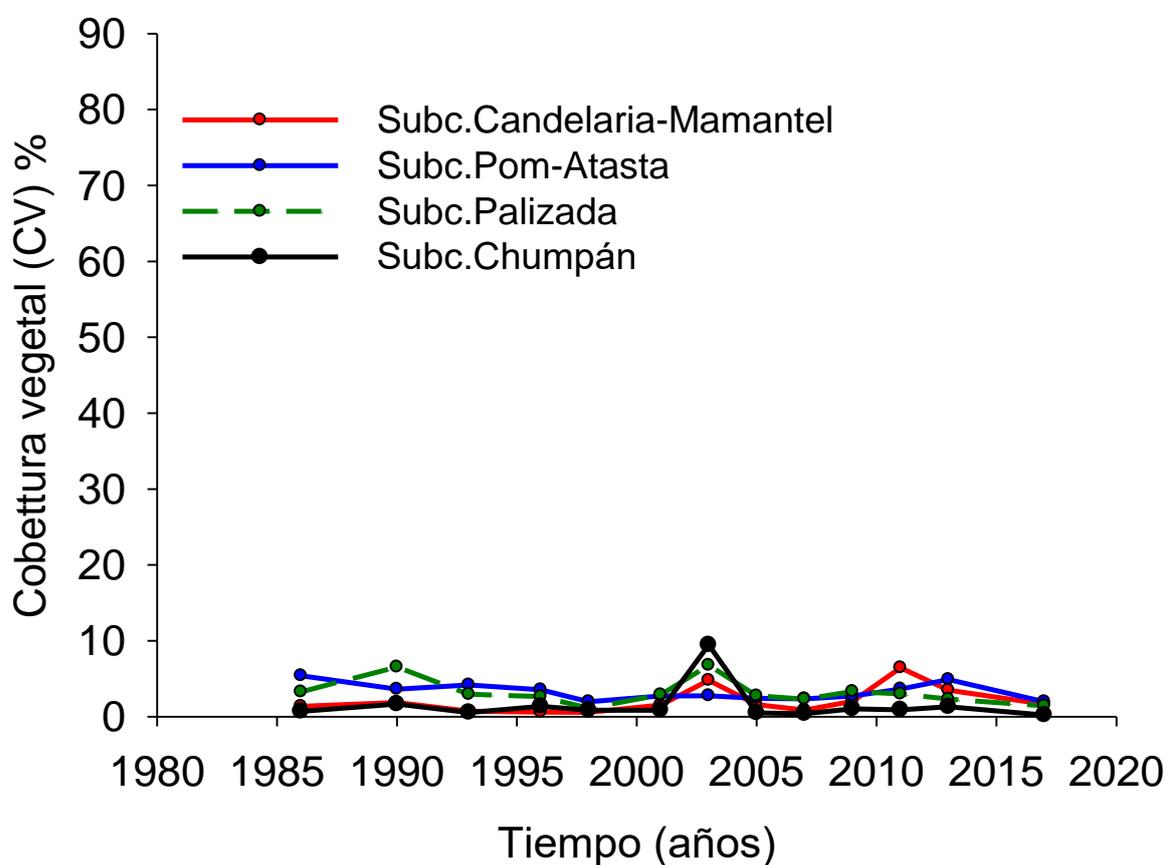


Figura 10. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0-0.25

Clase de vigor de la vegetación de 0.25-0.5

En esta clase ya se observan porcentajes mayores para las cuatro subcuencas (Fig. 11). De 1986 a 1993 presentan un comportamiento similar con un aumento en el año 1990 hasta el 35.2% (subcuenca Palizada), a partir de ahí presentan

porcentajes que no pasan el 35% hasta el año 2001, se observó un aumento hasta llegar al 71.4% (subcuenca Chumpán) en el año 2003. Sin embargo, la subcuenca Pom-Atasta fue la que presentó diferencias con respecto al resto en esta clase en el año 1998, al disminuir mientras el resto de las subcuencas aumentan su cobertura vegetal, obteniendo el 5% en este año. La subcuenca Pom-Atasta fue la que menor cobertura vegetal presentó durante todo el período de estudio con un porcentaje máximo en el año 2013 de 37.6%. También cabe resaltar para esta clase, la subcuenca Chumpán, al ser la que mayor variación presentó durante el lapso de 1986 al 2017, presentando la mayor cobertura vegetal (71.36%) así como los menores porcentajes, al punto de ser la subcuenca que menor cobertura vegetal presentó hacia el 2017 con el 9.7%, mientras que la mayor la tuvo la subcuenca Palizada con el 30.2% (Fig. 11) (Ver anexo 12.13).

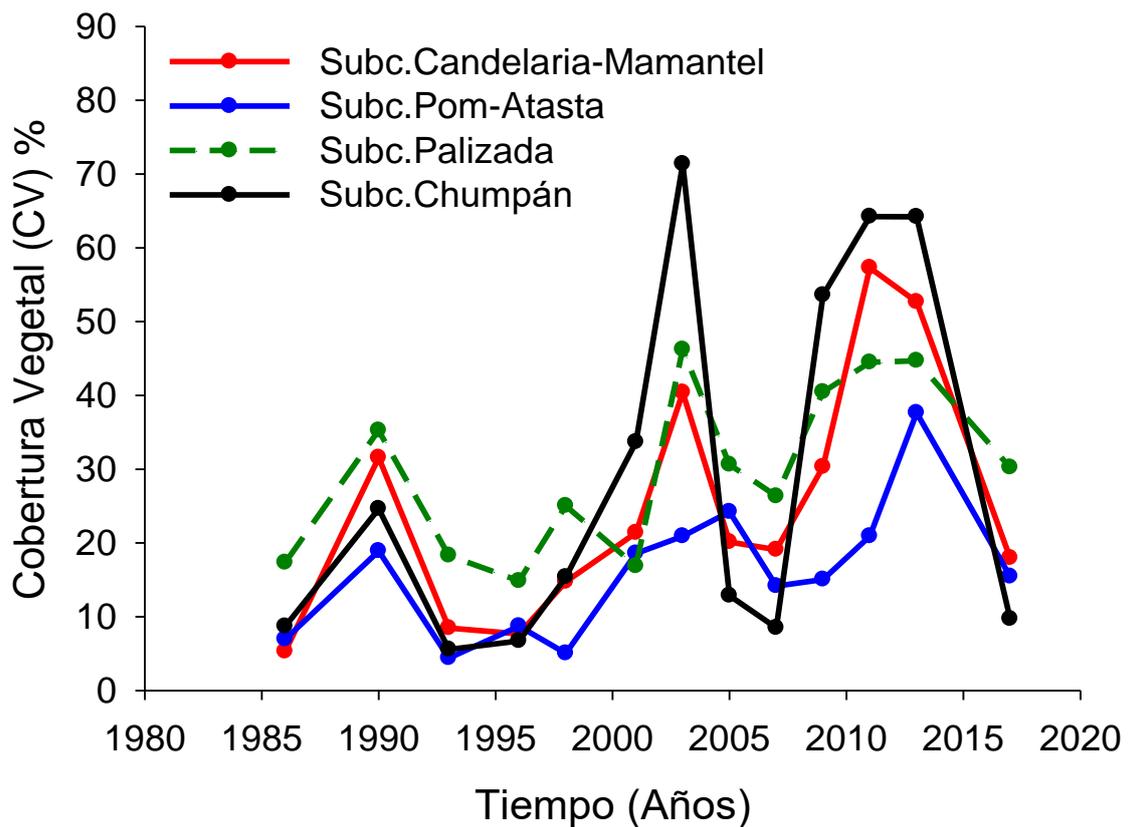


Figura 11. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.25-0.5

Clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75

Esta es la clase más predominante durante el período de estudio. De 1986 a 1990 las cuatro subcuencas aumentan su cobertura vegetal con porcentajes que oscilan entre el 34% y 77%. En el año 1993 comienzan a disminuir hasta el 2003 que se obtuvo un aumento en la subcuenca Pom-Atasta (73%), a diferencia de las demás subcuencas que continuaron disminuyendo hasta llegar al menor porcentaje con el 19.2% (subcuenca Chumpán). En el lapso del 2005 al 2007 se observó nuevamente un aumento para las cuatro subcuencas, con el mayor porcentaje de cobertura vegetal en la subcuenca Chumpán con el 88.9% (2007). Se observó nuevamente en esta clase, como la subcuenca Chumpán fue la que presentó los mayores y menores porcentajes de cobertura vegetal, siendo incluso la que mayor cobertura tuvo en el 2017 con el 88.1% (Fig. 12, anexo 12.13).

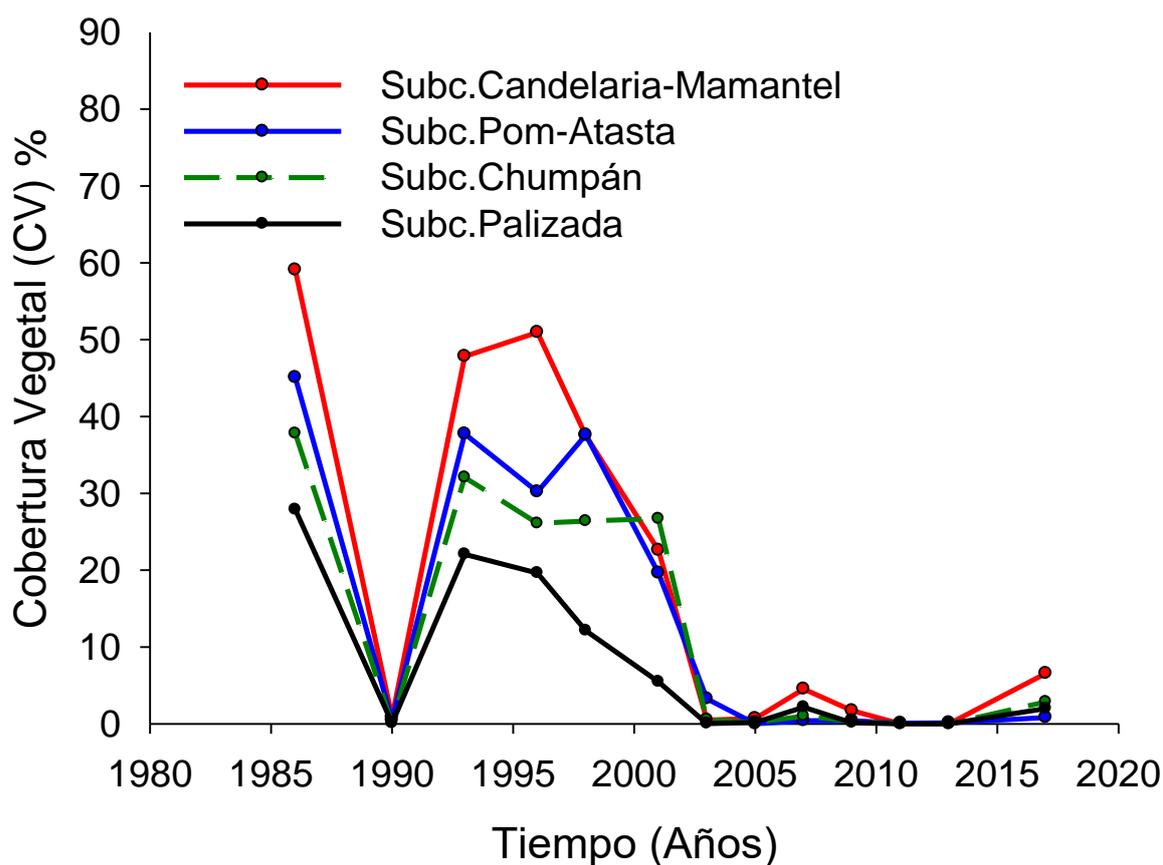


Figura 12. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75

Clase de vigor de la vegetación de 0.75-1

La clase de 0.75 a 1, siendo la de mayor vigor de la vegetación, fue la menos predominante. En el año 1986 se obtuvieron porcentajes que alcanzaban hasta el 59% (subcuenca Candelaria-Mamantel) y el 27% (subcuenca Chumpán). Sin embargo, hacia 1990 estos porcentajes disminuyen notablemente para las cuatro subcuencas con valores que no pasan el 1%. En el lapso de 1993 a 2001 aumenta nuevamente la cobertura vegetal desde el 5% (subcuenca Chumpán) en el 2001 hasta el 50.9% (subcuenca Candelaria-Mamantel) en 1996. A partir del 2003, las coberturas disminuyen a valores no mayores al 10%, mostrando un predominio en las cuatro subcuencas de la ausencia prácticamente de esta clase hasta el 2013, que aumenta en el 2017 hasta el 6% en la subcuenca Candelaria-Mamantel. Es evidente que esta es la clase de vigor de la vegetación que mayor variación presentó y más disminuyó para las cuatro subcuencas hidrográficas (Fig. 13, anexo 12.15).

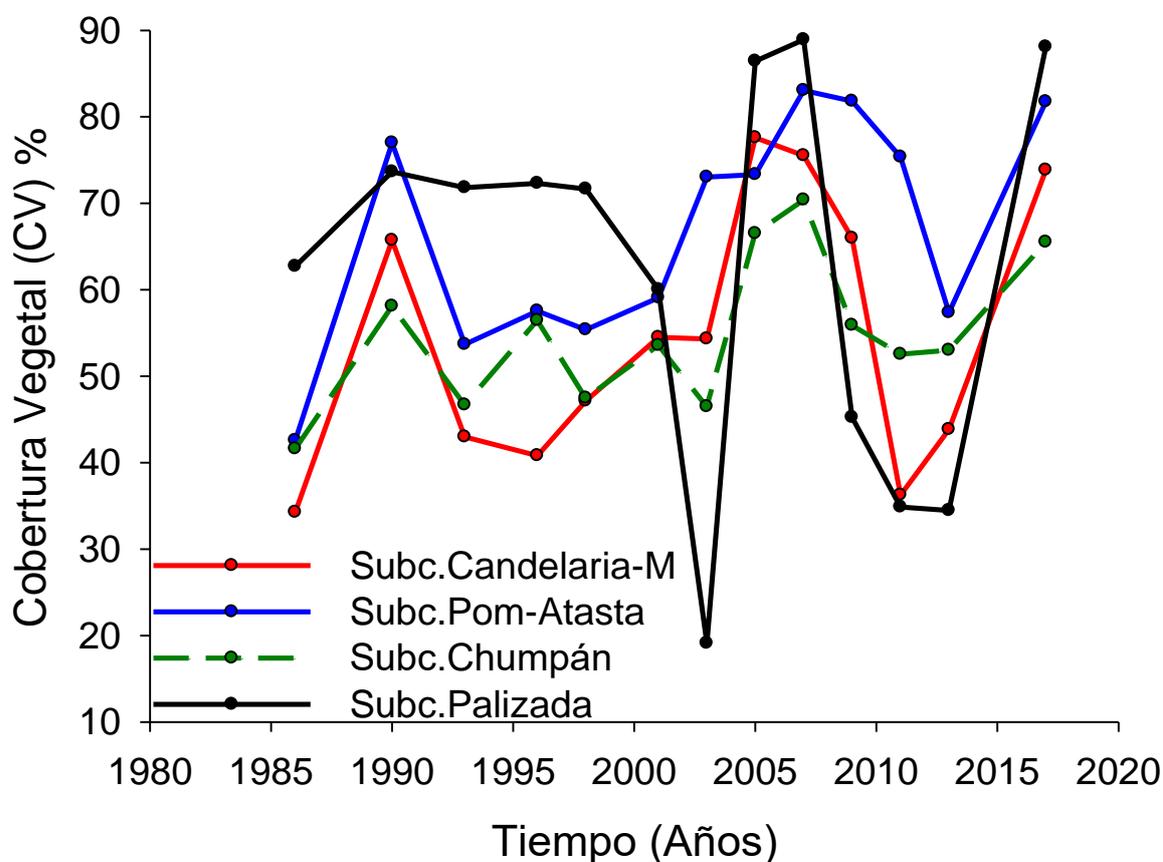


Figura 13. Cobertura del suelo en la clase de vigor de la vegetación de 0.75-1

Al obtener los mapas de cambio de la cobertura del suelo, se utilizaron las series de uso de suelo y vegetación de INEGI para tener en cuenta los cambios en el uso del suelo, siendo este uno de los factores que influyen en la cobertura del suelo. Con esto se quiso mostrar qué usos de suelos habían sido cambiados por otros de un año a otro a través de las series de uso de suelo y vegetación. Se seleccionaron las series I y VI para mostrar el cambio de uso de suelo en el lapso de período más amplio (1985-2016).

Cambios en el uso del suelo mediante series de uso de suelo y vegetación

El cambio de uso de suelo se representó mediante mapas para cada una de las series de uso de suelo y vegetación obtenidas de INEGI. Se representaron las diferentes coberturas vegetales del área de estudio, así como los usos de cada una de las subcuencas. A través de matrices de transición se obtuvieron qué usos de suelos habían sido cambiados por otros de 1985 hacia el 2016. Se observan en las figuras 14 y 15 las diferentes coberturas vegetales y uso de suelo para los años 1985 y 2016, correspondientes a las series I y VI de INEGI. Anexos del 12.16 al 12.19.

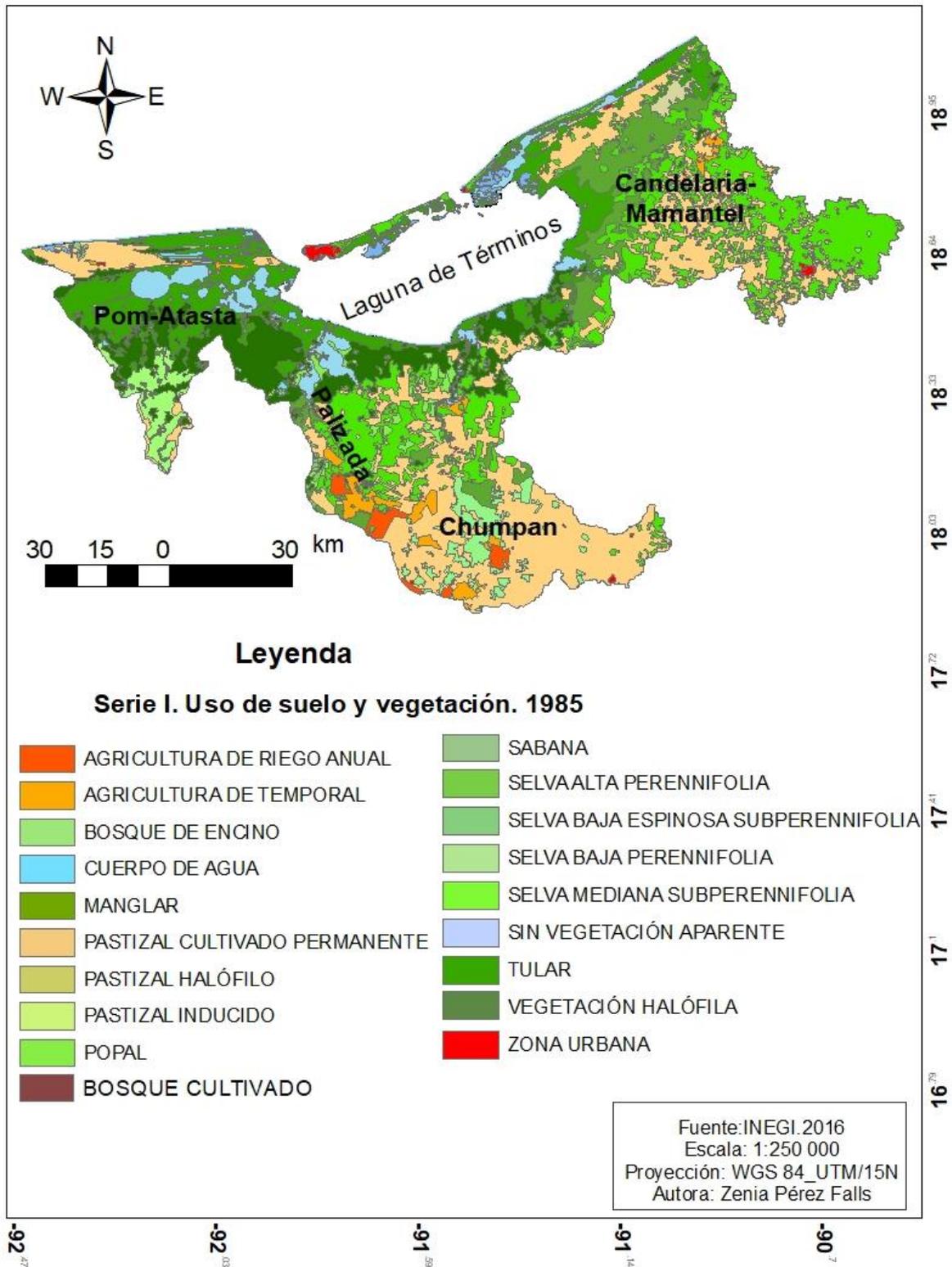


Figura 14. Uso del suelo. Serie I de Uso de suelo y Vegetación (INEGI, 1985)

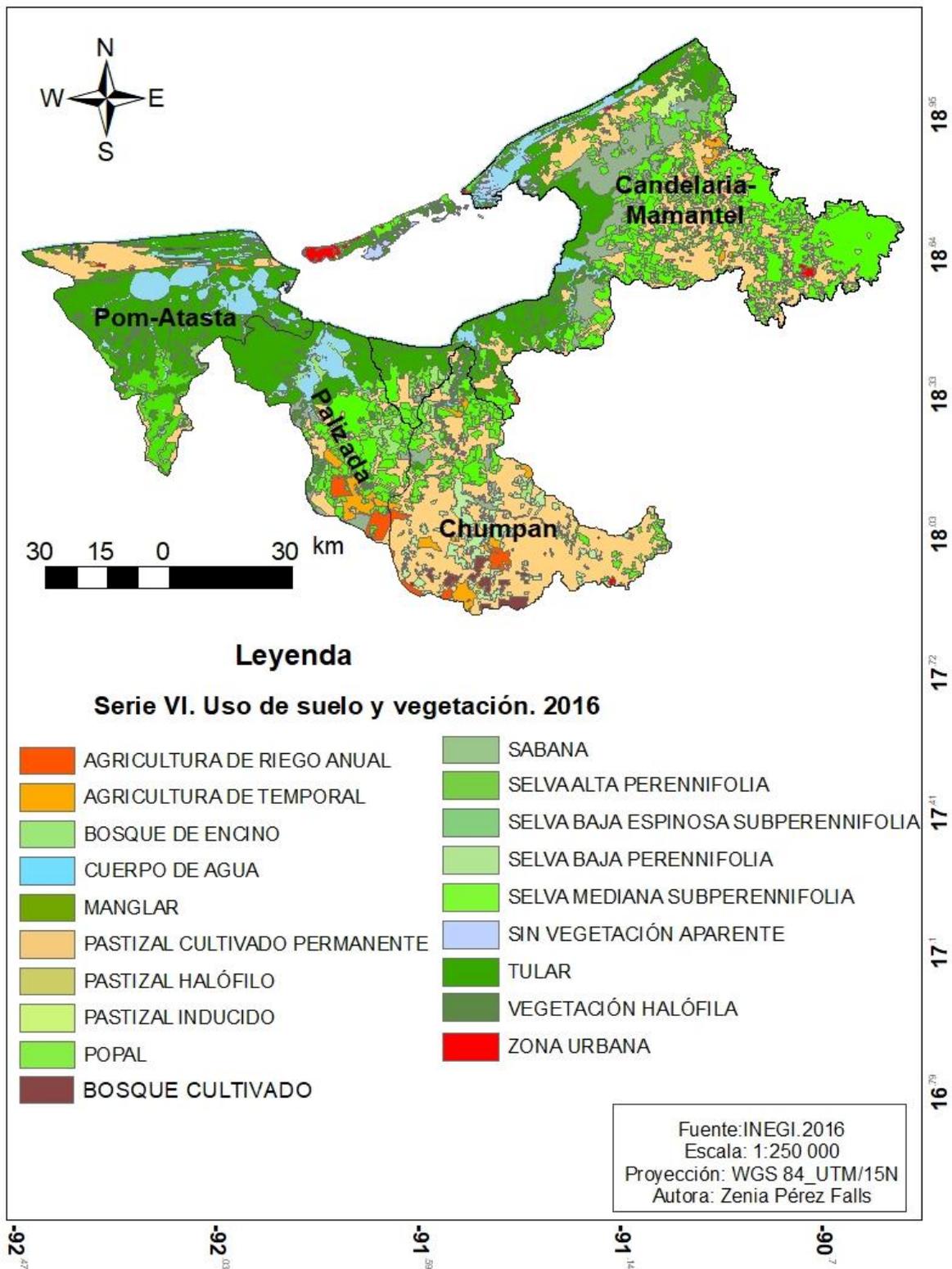


Figura 15. Uso de suelo. Serie VI de Uso de suelo y Vegetación (INEGI, 2016.)

Tabla 10. Matriz de transición de cambio de uso de suelo (ha). 1985 y 2016.

Año 1985	Año 2016					Total_1985
	Agricultura	Manglar	Pastizal	Sabana	Selva	
Agricultura	1660	982	3125	0	5263	11030
Manglar	255	113452	12114	6922	10287	143029
Pastizal	7630	1680	96003	961	25879	132154
Sabana	11032	2478	31922	29765	14312	89510
Selva	5833	1390	89545	8251	167443	272462
Total_2016	26410	119981	232710	45899	223185	648185

Para esta matriz se seleccionaron los cambios más representativos para el área de estudio. Se obtuvo que del año 1985 al 2016 hubo una disminución de la agricultura para sustituirla por 982 ha de manglares, 3125 ha en pastizales y 5263 ha en selvas, manteniéndose solo 1660 ha de agricultura. Por otra parte, se deforestaron 255 ha de manglar para convertirla en uso de agricultura, 12114 ha en pastizales, 6922 ha en sabanas y 5263 ha en selvas, manteniéndose con un área de 113452 ha. Para los pastizales solo se mantuvieron 96003 ha, 7630 ha fueron reemplazadas para la agricultura, 1680 ha por manglar, 961 ha en sabanas y 25879 ha en selvas. Las sabanas también fueron sustituidas por 11032 ha de agricultura, 2478 ha de manglar, 31922 ha de pastizales, 14312 ha de selvas, manteniendo 29765 ha de su extensión. Las selvas en general mantuvieron un área de 167443 ha, 5833 ha fueron reemplazadas por la agricultura, 1390 ha por manglar, 89545 por pastizales y 8251 ha por sabanas. Se evidenció que el uso de suelo que más cambios mostró fue los pastizales, siendo el segundo en extensión, solo precedido por los manglares.

8.4. Análisis de los registros ambientales. Caudales de ríos, precipitación pluvial, núcleo de sedimento

Caudales de ríos

Para determinar las variaciones de los caudales de los ríos Palizada, Chumpán, Candelaria y Mamantel que descargan en la Laguna de Términos se seleccionó el período de 1995 a 2012 por ser el lapso común para todos los ríos.

En la figura 16 se observa que del año 1995 al 2000 los caudales acumulados anuales estuvieron entre los 300 y 369 m³/s. A partir del año 2001 hasta el 2009 disminuyen los caudales acumulados con valores que oscilan entre 224 y 298 m³/s, excepto en los años 2002, 2006 y 2008 que los caudales aumentan a valores superiores a los 300 m³/s. Del año 2010 al 2014 aumentan nuevamente alcanzando los valores máximos en los años 2013 y 2014 con 384 m³/s.

También se representaron los caudales de los ríos por separado para ver cómo se comportaban individualmente (Fig. 16), facilitando el análisis de estos por subcuencas (Fig. 1). Se observa que el río Palizada presentó el mayor caudal en el año 2013 con 291 m³/s y valor mínimo en el año 2009 con 154 m³/s. El río Candelaria tuvo el mayor caudal en el año 1995 con 105 m³/s/año y el menor en el 2004 con 33 m³/s/año. El río Chumpán tuvo 95 m³/s/año en el año 2005, siendo su mayor caudal y el menor en el 2001 con 6 m³/s. Por último, el río Mamantel, fue el que menos caudal presentó con valores que no sobrepasaron los 5 m³/s durante todo el periodo analizado (1995-2012).

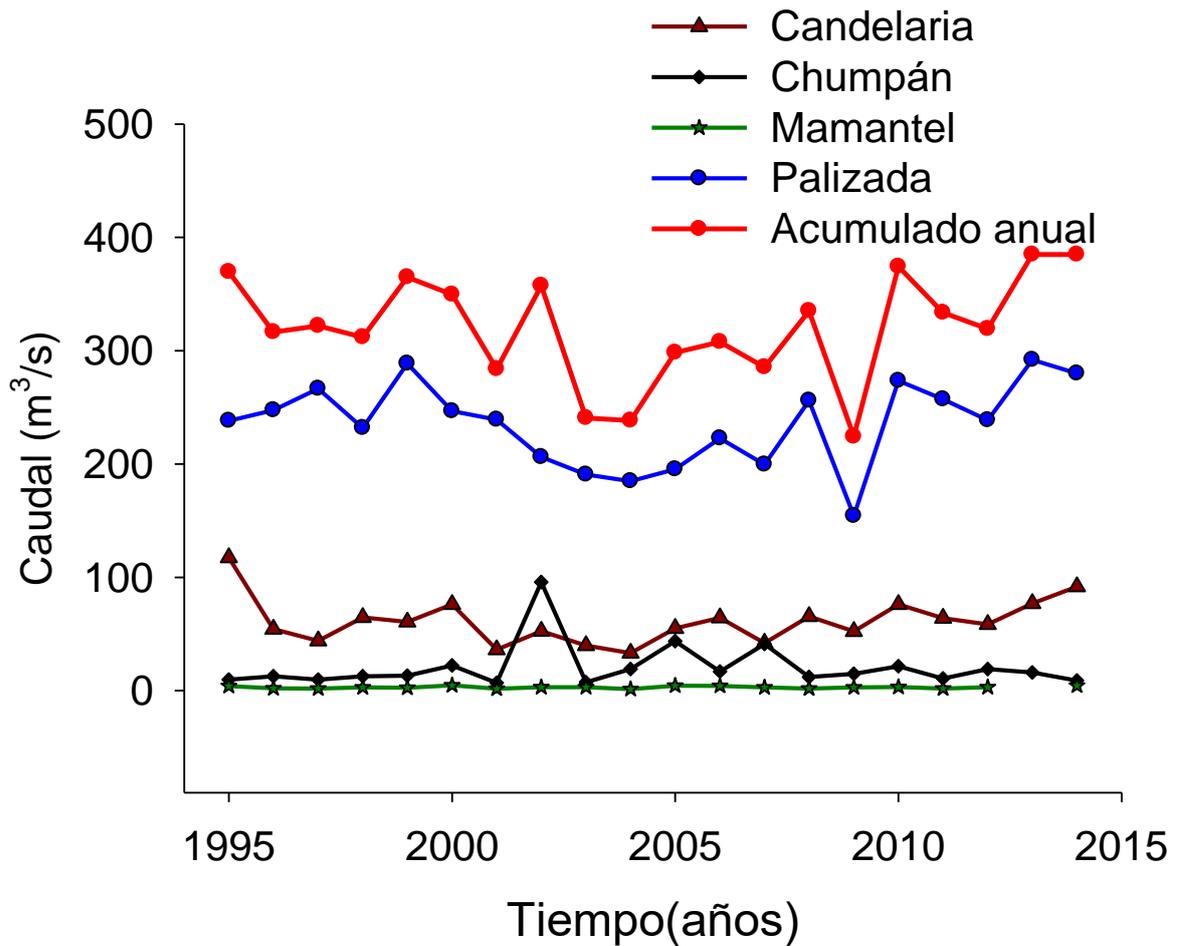


Figura 16. Caudales de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpán y acumulado anual. 1995-2014.

Se representó el acumulado anual de los meses en época de secas y norte (Fig. 17) para representar los meses en las que fueron captadas las imágenes satelitales utilizadas para la obtención del NDVI. Estos meses se representaron por los ríos que pertenecen a cada subcuenca hidrográfica. Se observa que el río Palizada es el que mayor caudal presenta con valores que no disminuyen de 1,200 m³/s, excepto en 2009 con 900 m³/s. Los ríos Candelaria y Mamantel muestran un máximo en 1995 con 1,300 m³/s, sin embargo, sus valores en el resto del lapso se mantienen en caudales menores a 600 m³/s. EL río Chumpán tuvo de 1995 al 2012 el caudal por debajo de los 500 m³/s, siendo el menos caudaloso de los cuatro ríos analizados.

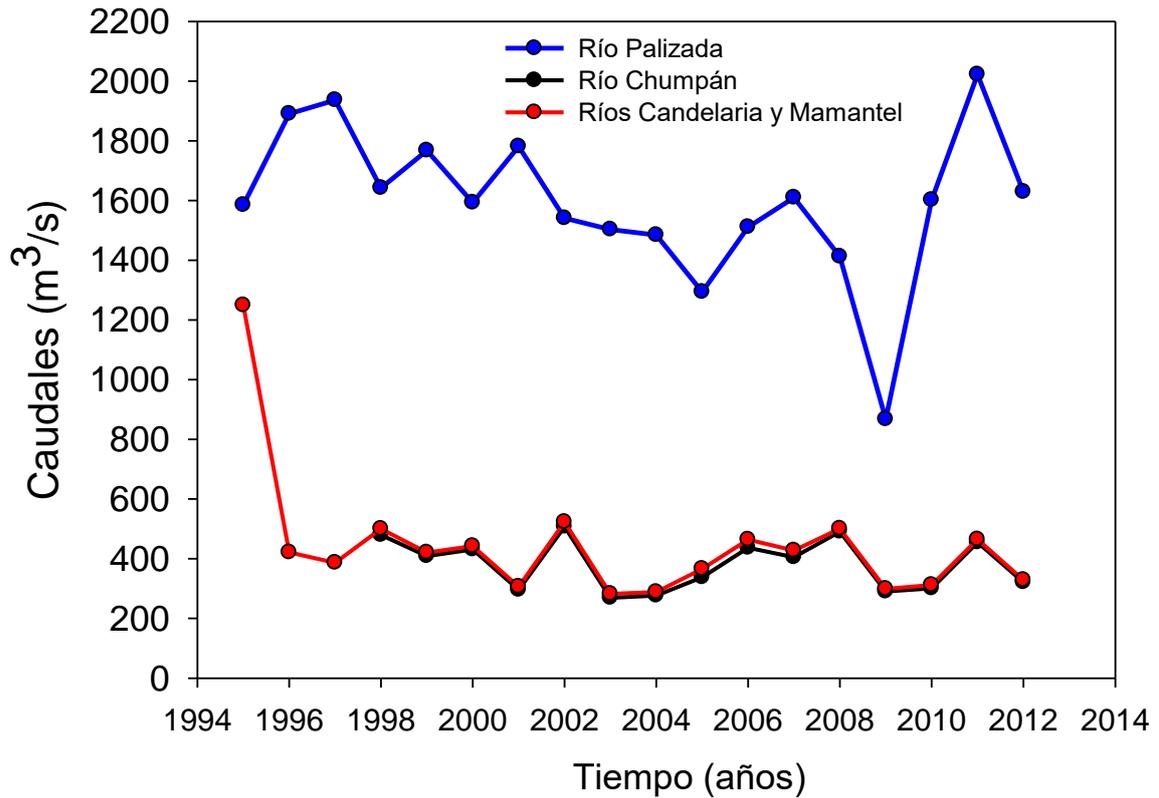


Figura 17. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpán en época de secas y nortes. 1995-2012

Precipitación pluvial

La precipitación pluvial acumulada anual para las cuatro subcuencas mostró valores máximos en 2006 con 27, 970 mm/año, y el mínimo en 2011 con 18, 625 mm/año. En la figura 18 se observa una tendencia a disminuir de la precipitación durante el período analizado de 1998 al 2016.

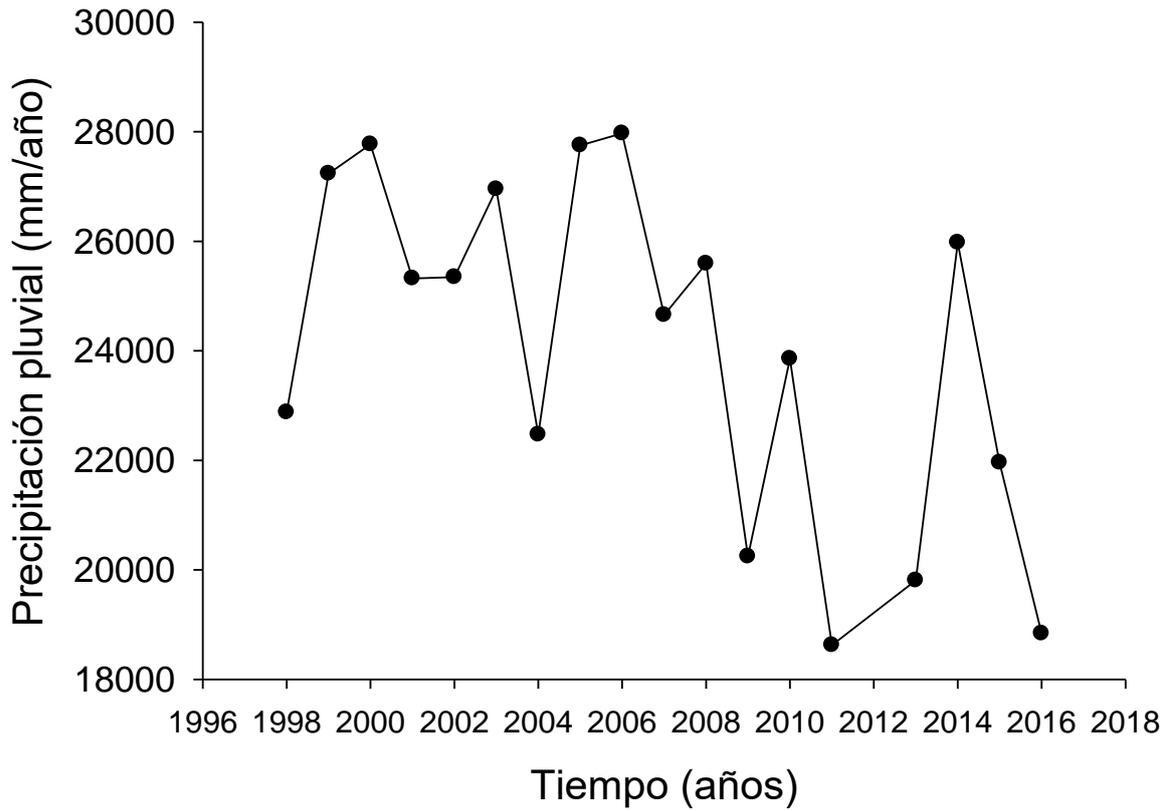


Figura 18. Precipitación pluvial acumulada en las subcuencas de estudio. 1998-2016

La figura 19 muestra los puntos que cayeron dentro de cada subcuenca hidrográfica, a partir de los cuales se obtuvieron la precipitación pluvial correspondiente. +

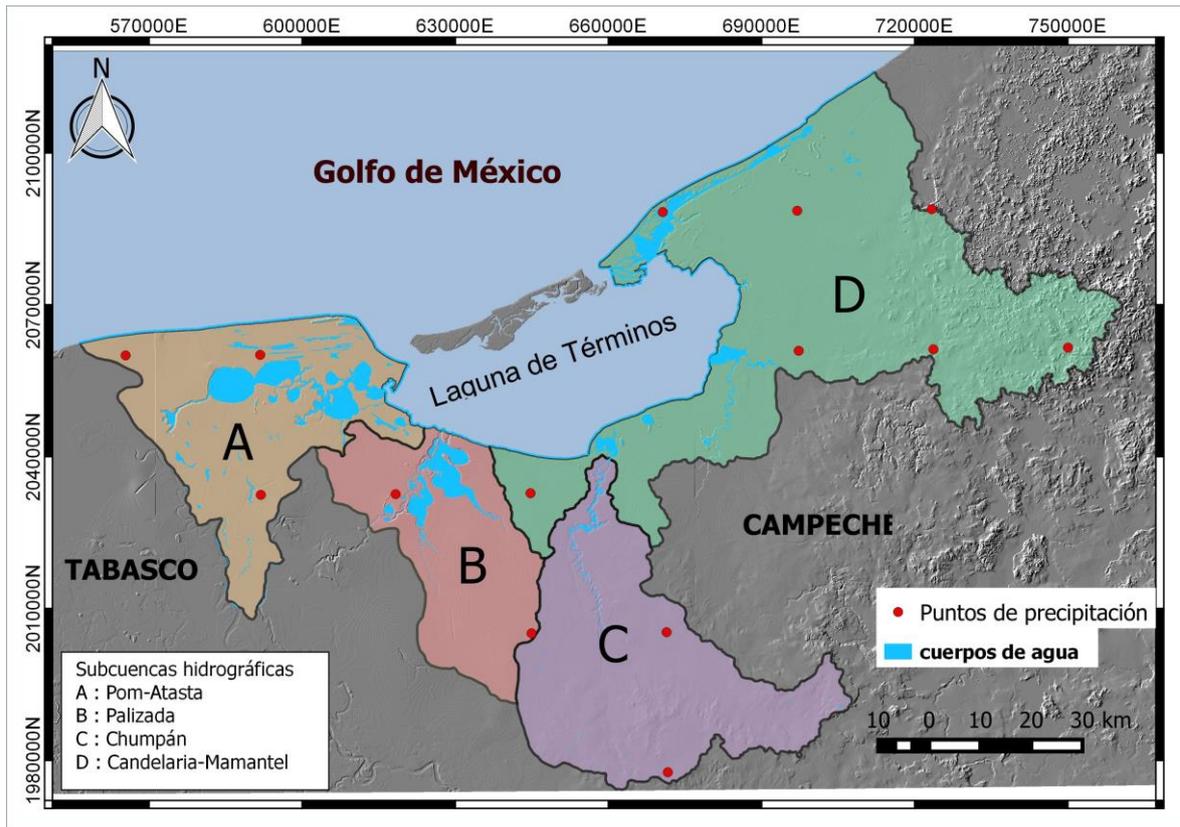


Figura 19. Puntos de precipitación dentro del área de estudio. 1998-2016

En la figura 20 se observa que en las cuatro subcuencas la precipitación tiene la misma tendencia desde el año 1998 hasta el 2016. Para la subcuenca Pom-Atasta los años con mayor precipitación fueron 1999 con 2,255 mm/año y el 2001 con 2,007 mm/año. Mientras que los menores se registraron en el 2012 con 1,106 mm/año y en 2016 con 1,207 mm/año. En la subcuenca Palizada los mayores valores se registraron en los años 1999 y 2005 con 2,017 y 2,094 mm/año respectivamente. Los valores menores para esta subcuenca se registraron en el 2015 y 2016 con 1,410 y 1,419 mm/año. En la subcuenca Chumpán se registró la mayor precipitación en el año 2016 con 2261 mm/año y la menor en 2009 con 1,491 mm/año. Por último, en la subcuenca Candelaria-Mamantel se registró la mayor precipitación en 2006 con 1,966 mm/año y la menor en 2011 con 1,204 mm/año. El análisis de la precipitación por subcuenca mostró que los mayores valores se encuentran en la subcuenca Chumpán, mientras que los menores en la subcuenca Candelaria-Mamantel.

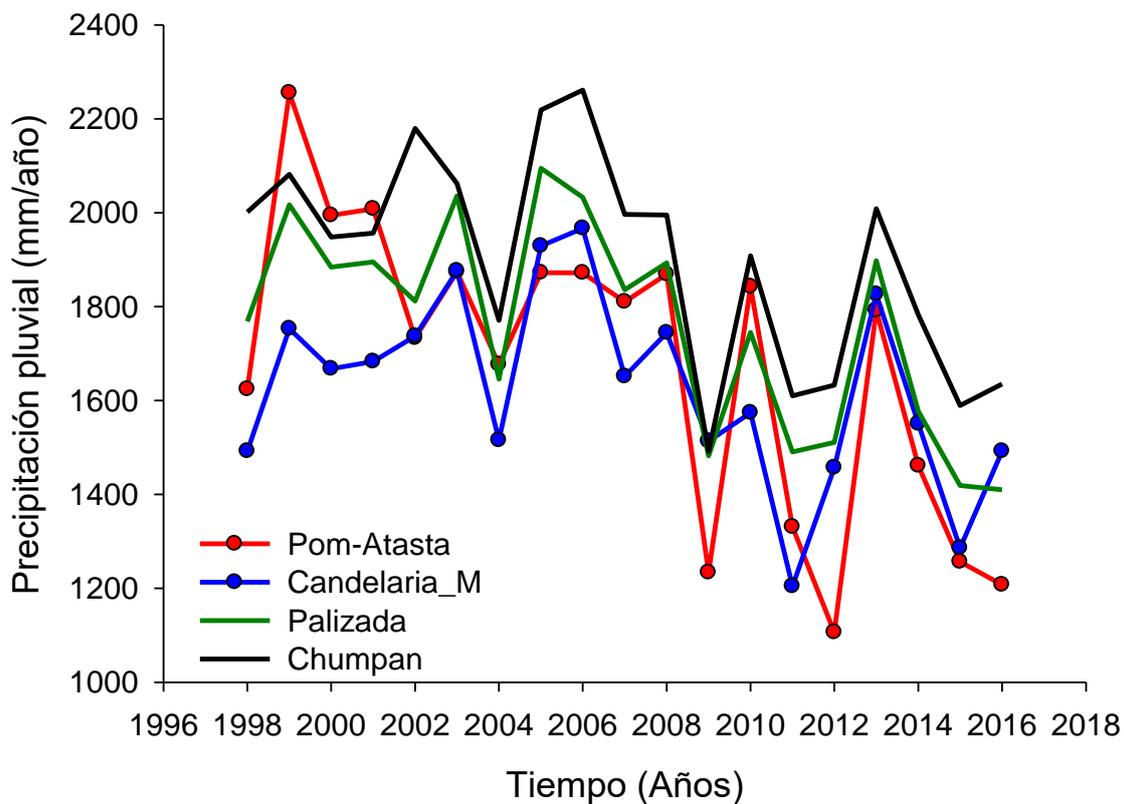


Figura 20. Precipitación por subcuencas hidrográficas del área de estudio. 1998-2016. Satélite TRMM.

Núcleo de sedimento

Se obtuvo que los valores de la Tasa de Acreción Másica (TAM) se mantienen uniformes (0.04 g/cm^2) hasta 1970 y aumentan hasta 0.14 gr/cm^2 hacia el año 2014 (Fig. 21).

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son típicos de materia orgánica de manglar ($\delta^{13}\text{C} = -27$ partes por mil (ppm)) hasta 1970 y a partir de este año se registran valores anómalamente negativos ($\delta^{13}\text{C} = -30.5$ ppm) en 1992 y 2014 coincidente con el aumento de la MAR. Los valores más negativos del $\delta^{13}\text{C}$ indican influencia de materia orgánica terrígena como árboles (Fig. 21).

Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ son típicos de manglar ($\delta^{15}\text{N} = 2$ partes por mil) hasta el año 2000 y a partir de este año los valores son tan bajos como 0.6 ppm indicativo de influencia de fertilizantes agrícolas (Fig. 21).

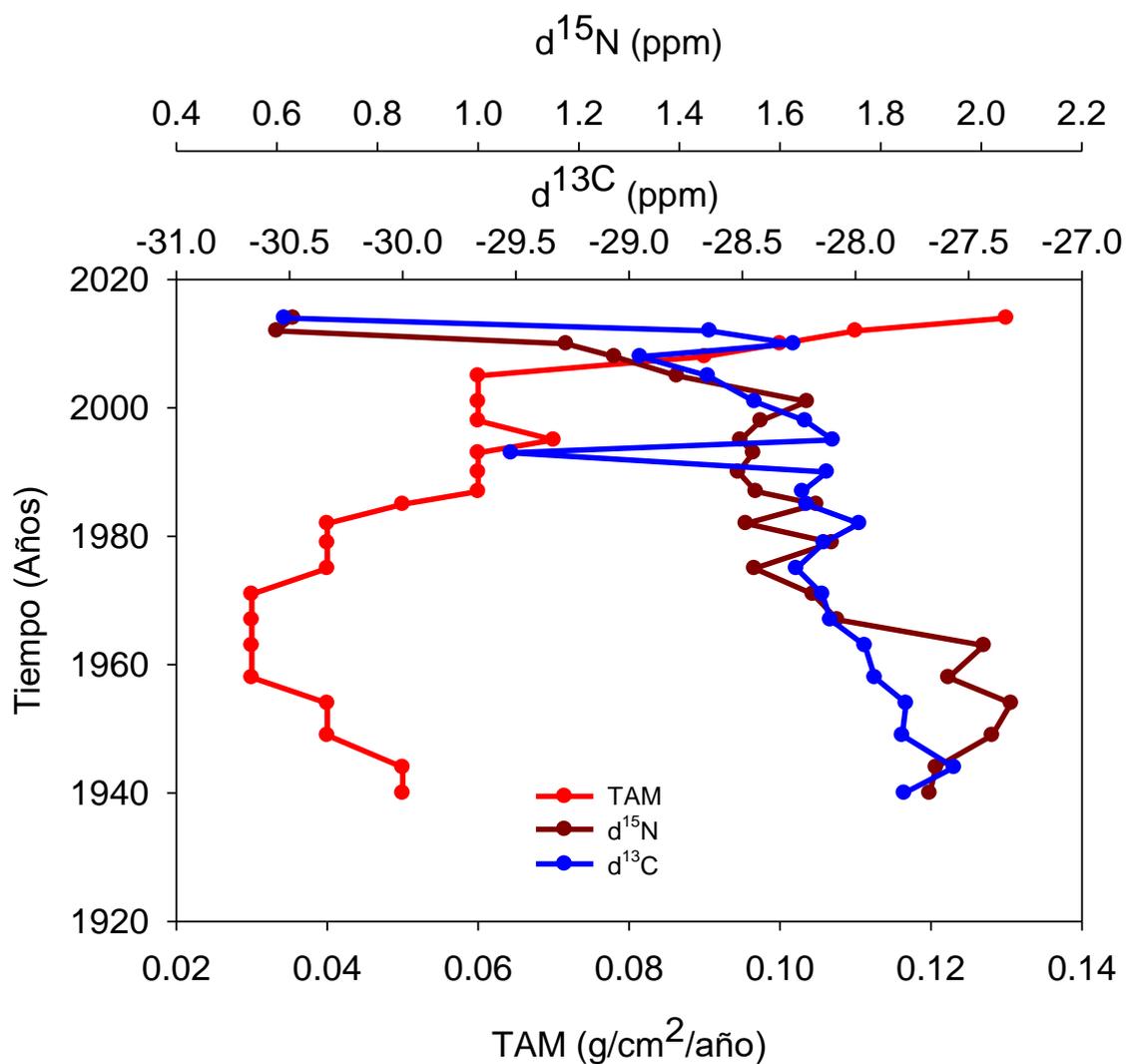


Figura 21. Registro de TAM, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la subcuena Pom-Atasta.

8.5. Estimación de la erosión hídrica del suelo y aporte de sedimentos a la Laguna de Términos.

A continuación, se mostrarán los mapas resultantes para cada factor de la ecuación USLE.

Factor LS

Para este factor LS (longitud y grado de la pendiente) solo se representó el modelo digital de elevación (Fig. 22). EL factor resultante fue calculado automáticamente en el software inVEST.

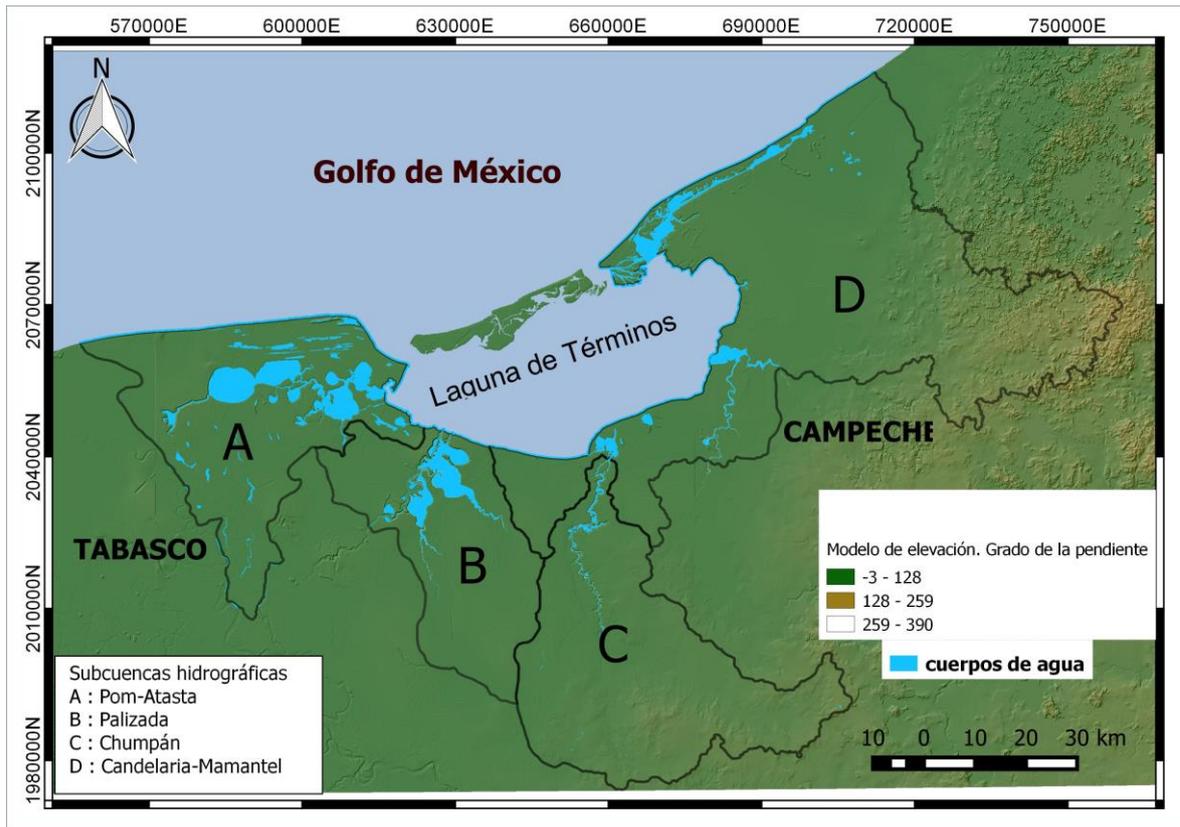


Figura 22. Modelo digital de elevación del área de estudio. INEGI, 2013

Factor K

Para el factor K (Erodabilidad del suelo) se obtuvo que en el área de estudio hay 7 tipos de suelos con predominio del suelo Gleysol en las subcuencas A, B y C. La subcuenca D fue la que mayor variación edafológica presentó (Fig. 23). En cuanto a la textura del suelo se observó un predominio de la fina (Fig. 24) en las subcuencas B y D. Mientras que en la subcuenca A hubo un predominio del grano medio y al sur de la subcuenca C predominó la textura gruesa.

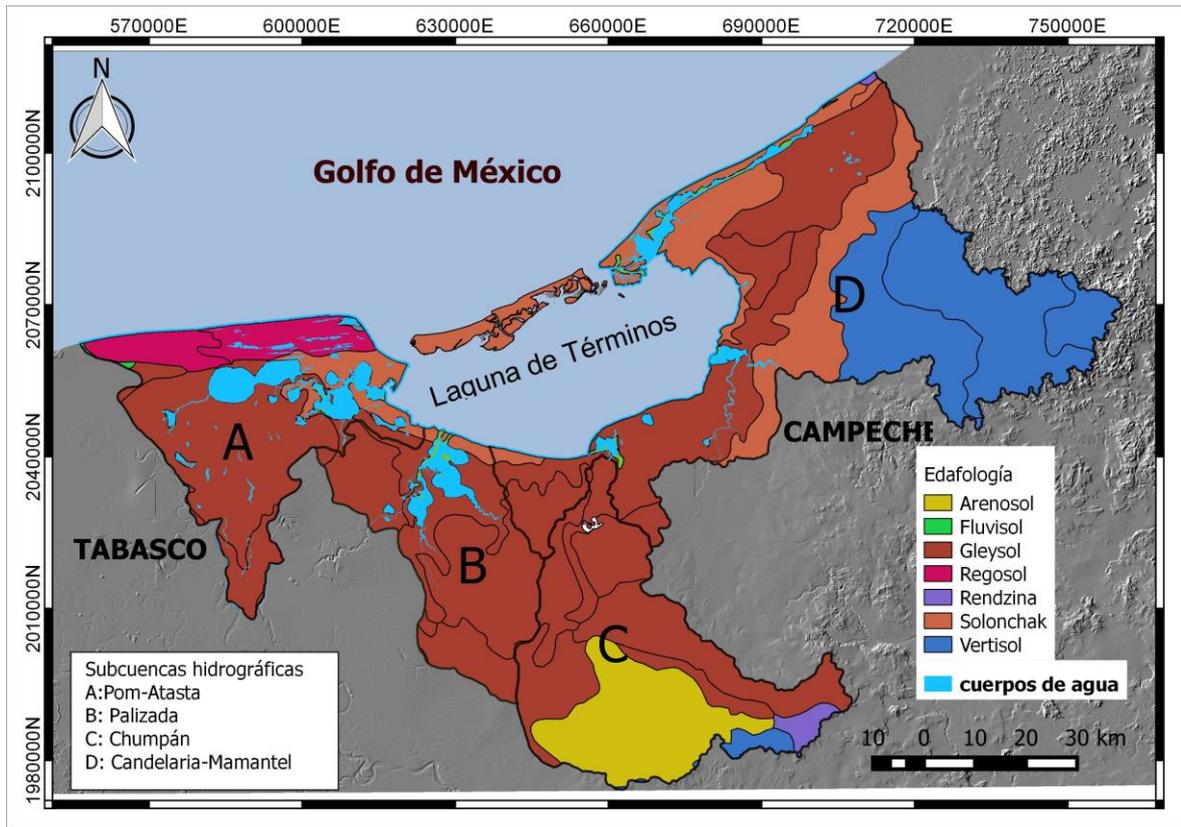


Figura 23. Edafología del área de estudio. INEGI, 2013

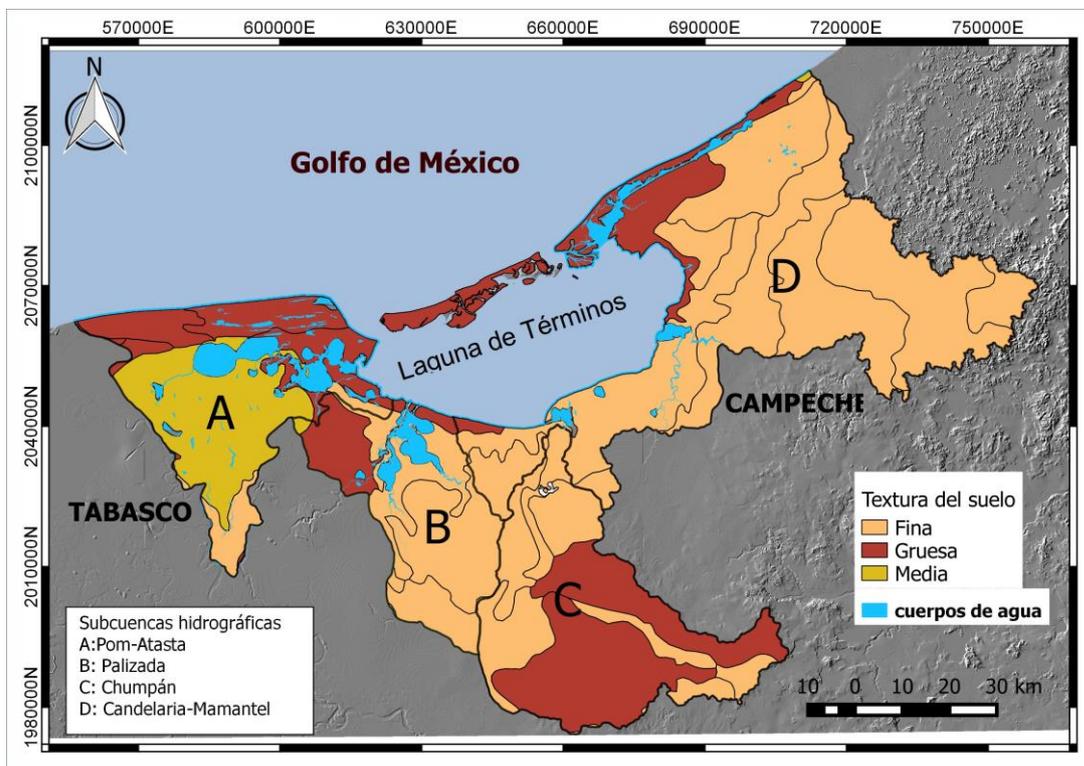


Figura 24. Granulometría del área de estudio. INEGI, 2013.

El factor K, siendo el resultante de la combinación de la edafología y granulometría del área de estudio, se obtuvo un mapa en formato ráster con los valores correspondientes en cada subcuenca. (Tabla 5 y Fig. 25).

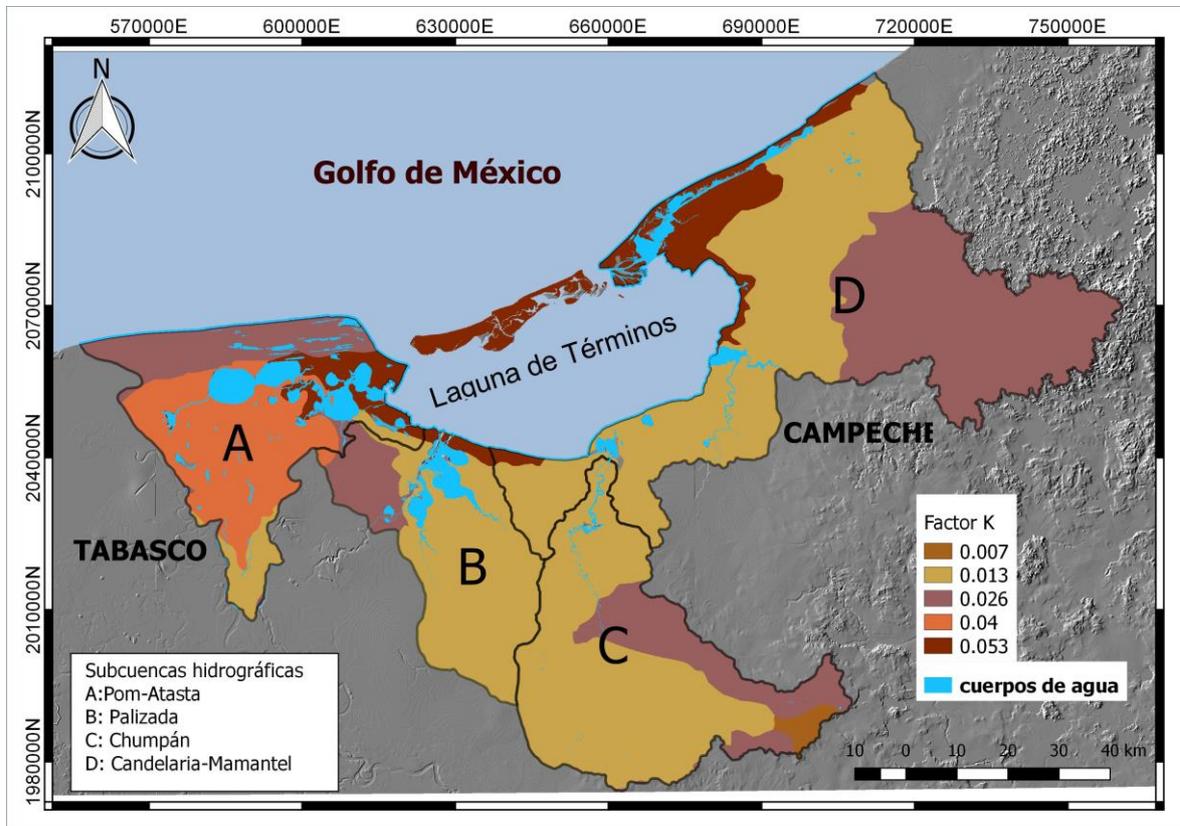


Figura 25. Factor K. Erodabilidad del suelo del área de estudio. FAO, 1980.

Factor C

Para el factor C (Manejo de cultivos o uso de suelo y vegetación) se obtuvieron como resultado cuatro mapas de uso de suelo y vegetación correspondientes a las series de la III a la VI (Anexos 12.18, 12.19 y 12.20). Para este factor se confeccionó la tabla biofísica (Anexo 12.20) donde se muestran los valores del Factor C que corresponden a cada uso de suelo. En la figura 26 se muestra el factor C para el área de estudio.

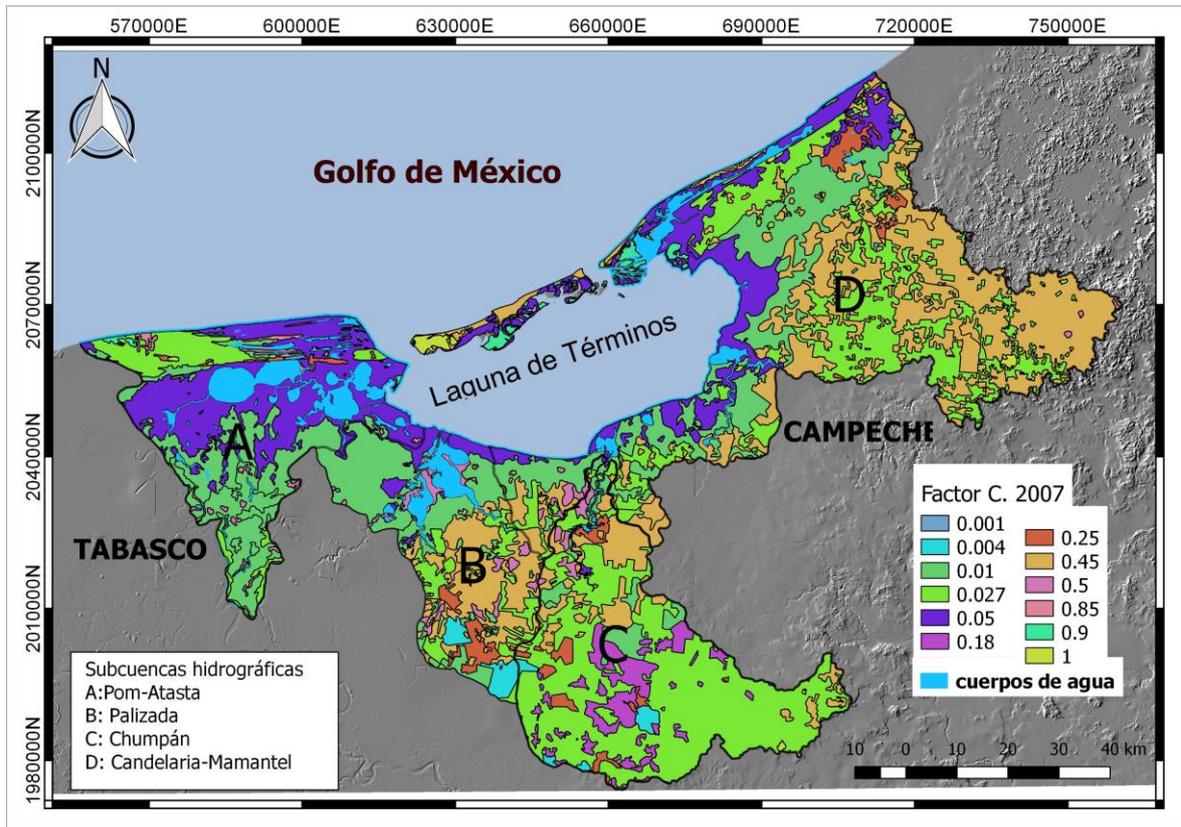


Figura 26. Factor C. Uso de suelo y vegetación del área de estudio. INEGI, 2007.

Factor R

El factor erodabilidad de la lluvia (R), se obtuvo a partir de la aplicación de la ecuación (5) correspondiente al área de estudio. Se obtuvieron los mapas resultantes de la interpolación a partir de los datos de precipitación acumulados anuales obtenidos del satélite TRMM con valores de precipitaciones entre 1,000 y 2,500 mm (Fig. 27 y anexos 12.21, 12.22, 12.23).

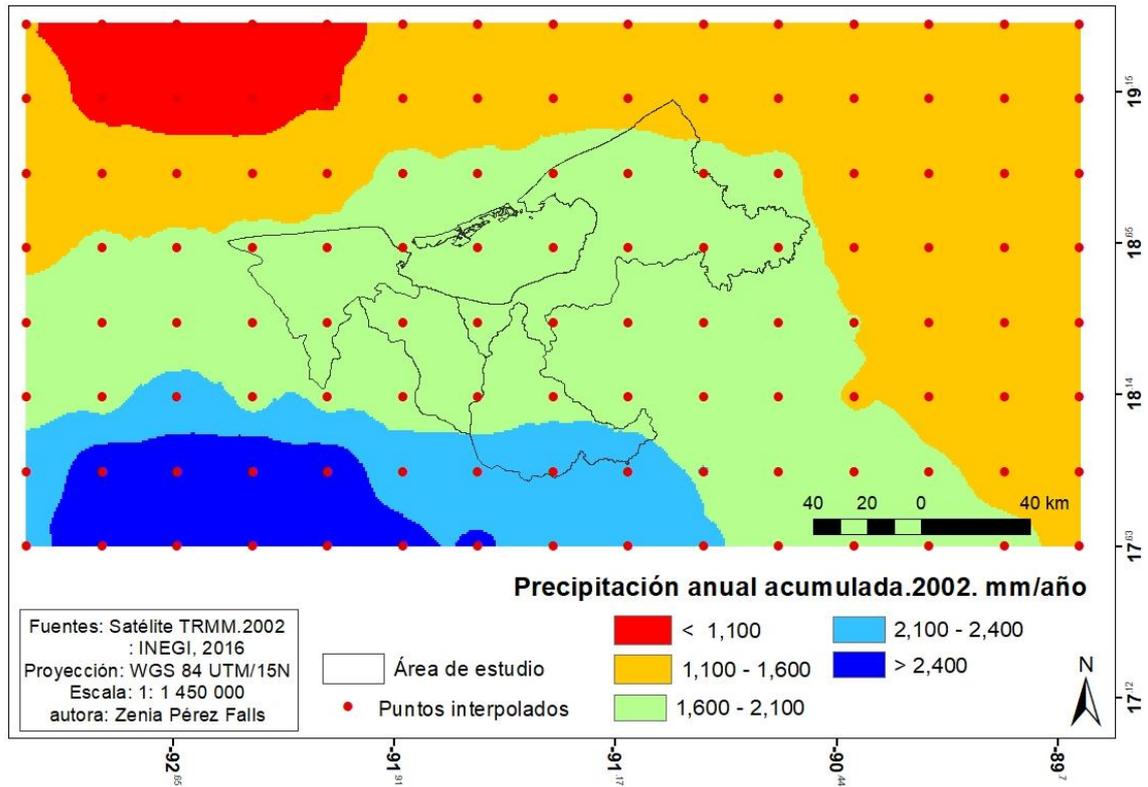


Figura 27. Interpolación de los puntos obtenidos del satélite TRMM. 2002

El factor R resultante se observa en la figura 28 y anexos 25, 26, 27.

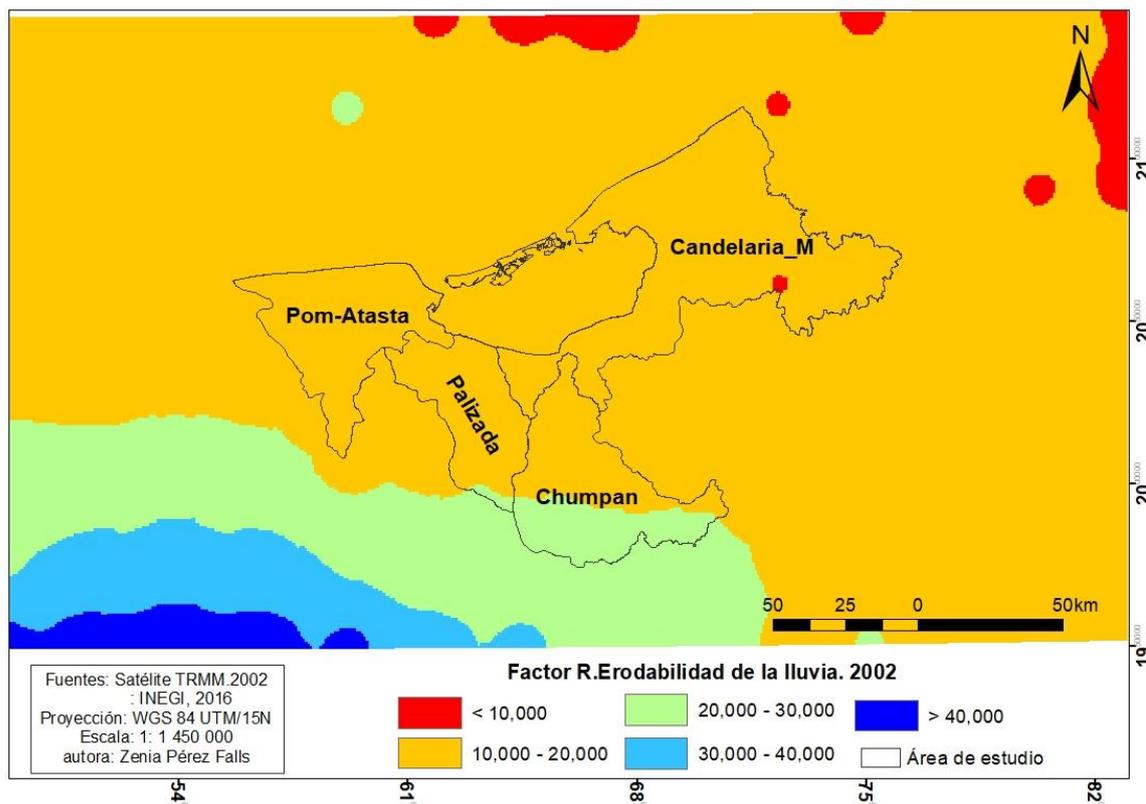


Figura 28. Factor R. Erodabilidad de la lluvia para el área de estudio. 2002.

Erosión hídrica (A)

La tabla 11 muestra los resultados tanto de erosión como de la exportación de sedimentos a la laguna en el período del 2002 al 2016

Tabla 11. Erosión hídrica del suelo y sedimentos exportados a la Laguna de Términos. 2002-2016.

Subcuencas	2002		2007		2011		2016	
	Sed_exp	USLE	Sed_exp	USLE	Sed_exp	USLE	Sed_exp	USLE
Palizada	0.8	2.4	0.8	2.5	0.6	1.7	0.4	1.5
Chumpán	0.7	2.2	0.6	2.0	0.4	1.4	0.5	1.6
Candelaria-M	4.4	8.8.	4.1	8.1	2.4	4.7	3.8	7.7
Pom-Atasta	0.3	1.5	0.3	1.5	0.2	0.9	0.1	8.6

Para las cuatro subcuencas hidrográficas la erosión del suelo disminuyó de 2002 a 2016. Se obtuvo la menor erosión en la subcuenca Pom-Atasta con 8.6 t/ha/año en el 2016. Mientras que la subcuenca con mayor erosión hídrica del suelo fue la de Candelaria-Mamantel con 7.6 t/ha/año en el 2016 (Tabla 9).

Se obtuvieron, además, cuatro mapas, por cada uno de los años en los que se analizó la erosión hídrica del suelo (Figuras 29 y 30, anexos 12.28 y 12.29).



Figura 29. Erosión hídrica del suelo en el área de estudio. 2002

Para el lapso del 2002 al 2016 la erosión hídrica del suelo fue mayor en la subcuenca Candelaria-Mamantel con 8.8 t/ha/año (año 2002), mientras que el menor valor se mantuvo en la subcuenca Pom-Atasta con 0.8 t/ha/año (año 2016) (Anexo 30 y Figura 28).

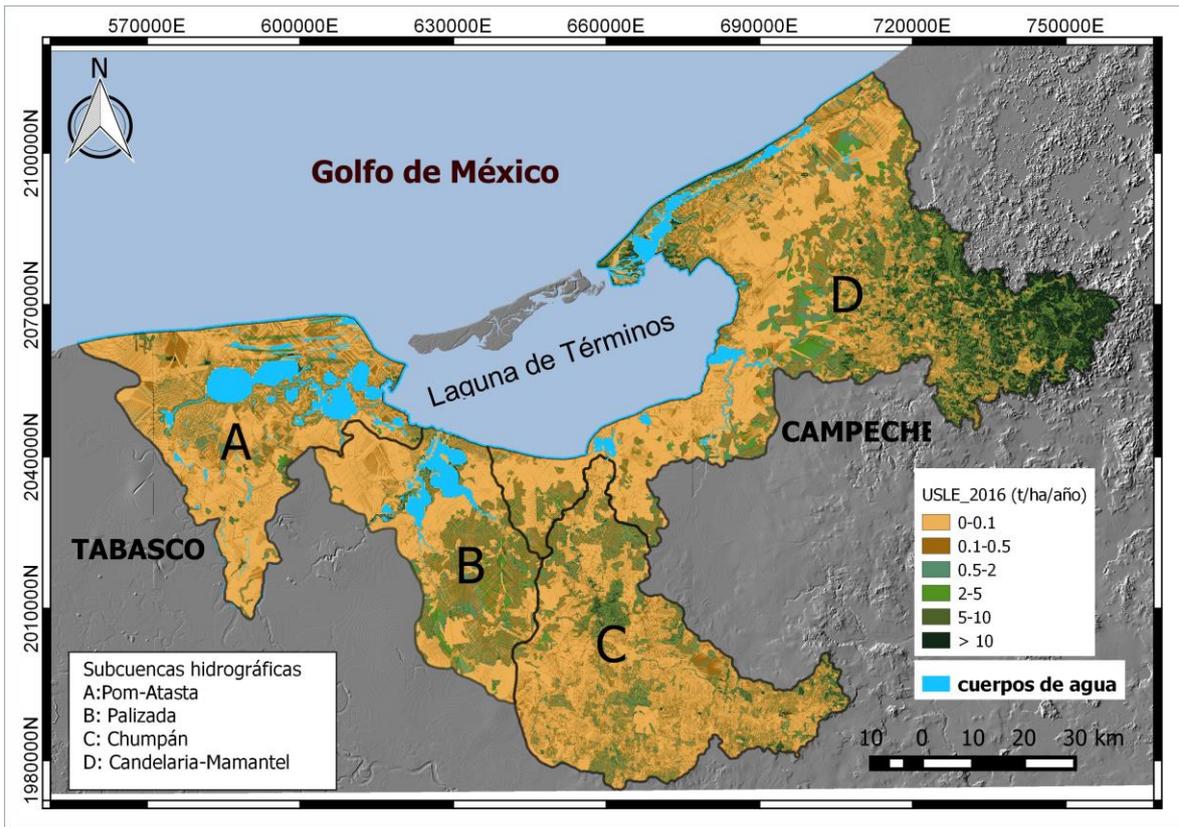


Figura 30. Erosión hídrica del suelo en el área de estudio. 2016

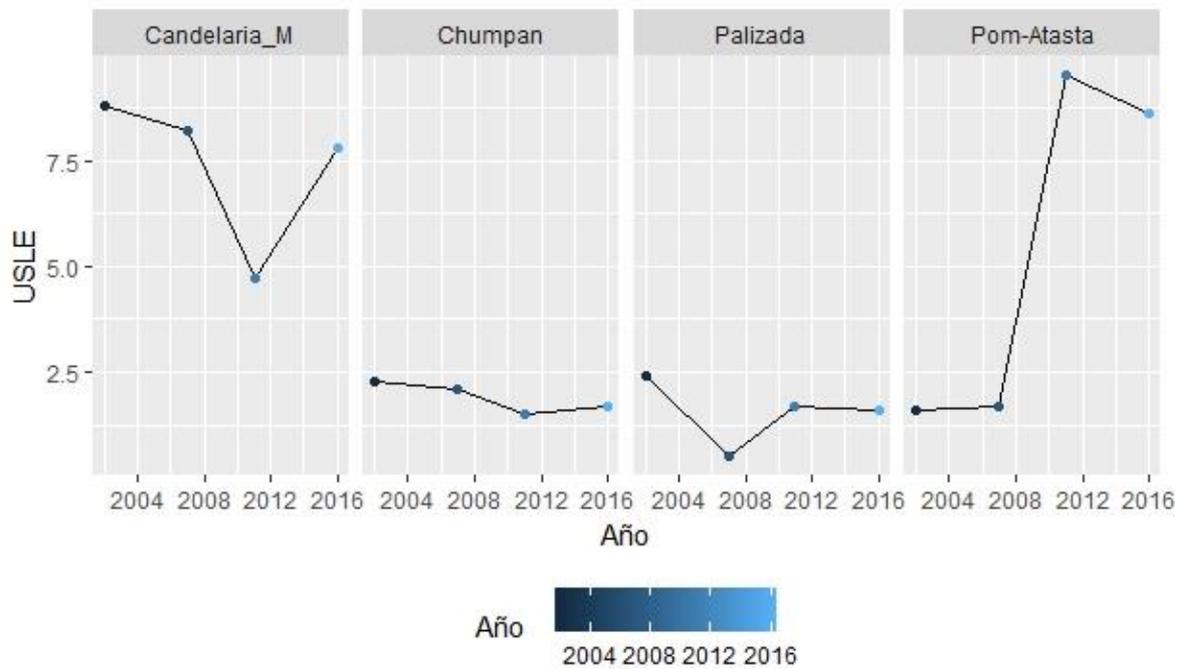


Figura 31. Erosión hídrica del suelo por subcuencas.

Para los sedimentos exportados a la laguna el mayor valor se obtuvo en la subcuenca Candelaria-Mamantel con 4.4 t/ha/año en el 2002 y la subcuenca con menor sedimentos exportados durante todo el período de estudio fue Pom-Atasta con 0.1 t/ha/año en 2016 (Fig. 31, Anexo 12.30).

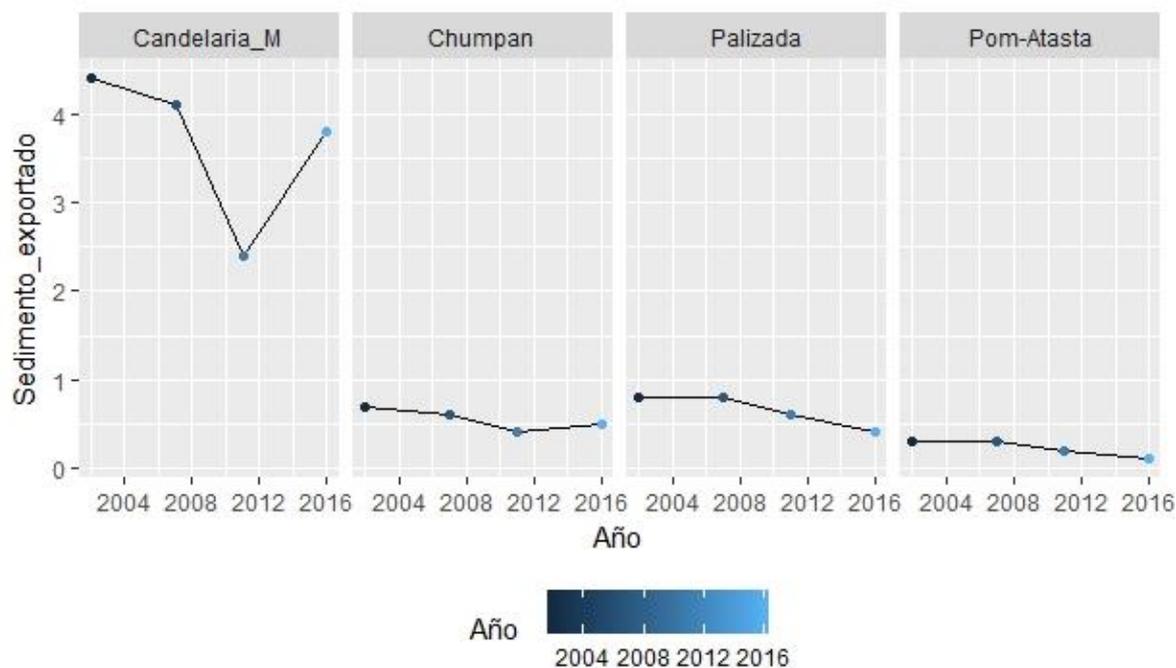


Figura 32. Sedimentos exportados a Laguna de Términos por subcuencas (2002-2016).

8.6. Correlación entre variables

Se realizaron diversas correlaciones por subcuencas escogiendo el lapso que coincidía para los diferentes registros analizados. Para la subcuenca Palizada se correlacionaron la clase de vigor de la vegetación que más predominó con el caudal del río Palizada y la precipitación pluvial del periodo de 1996-2011. Para la subcuenca Chumpán se correlacionaron la clase de vigor de la vegetación que más predominó (0.5-0.75) con el caudal del río Chumpán y la precipitación pluvial para el periodo de 1998-2011. Para la subcuenca Candelaria-Mamantel se correlacionaron la clase de vigor de la vegetación que más predominó con los caudales de los ríos Cadelaria y Mamantel y la precipitación pluvial. Por último, la subcuenca Pom-Atasta, al ser la que más registros históricos presenta, se correlacionaron la clase de vigor de la vegetación que más predominó con la precipitación pluvial y la TAM (Tabla 12).

Tabla 12. Correlación lineal de registros históricos en las subcuencas hidrográficas

Subcuencas	CV 0.5-0.75- Precipitación 1998-2013	CV 0.5-0.75- caudal 1996-2011	CV 0.5-0.75- TAM 1986-2013
Pom-Atasta	0.2	-	-0.5
Chumpán	0.2	0.3	-
Palizada	-0.1	0.2	-
Candelaria_M	0.3	-0.53	-

Correlaciones de la subcuenca Candelaria-Mamantel

En la figura 33 se relacionó la clase de vigor de la vegetación más predominante (0.5-0.75), con la precipitación pluvial y los caudales de los ríos Candelaria y Mamantel. Se observa que los mayores valores de cobertura vegetal se obtuvieron en el año 2005 con el 77% coincidiendo con los valores máximos de precipitación en este año de 1,900 mm, mientras que los caudales promedios acumulados de los ríos tuvieron su valor máximo en 1998 con 445 m³/s. Los valores mínimos de estas series se registraron en los años 1986, 2003 y 2011 con el 36% de cobertura vegetal, 40 mm de precipitación y 38 m³/s de caudal promedio respectivamente.

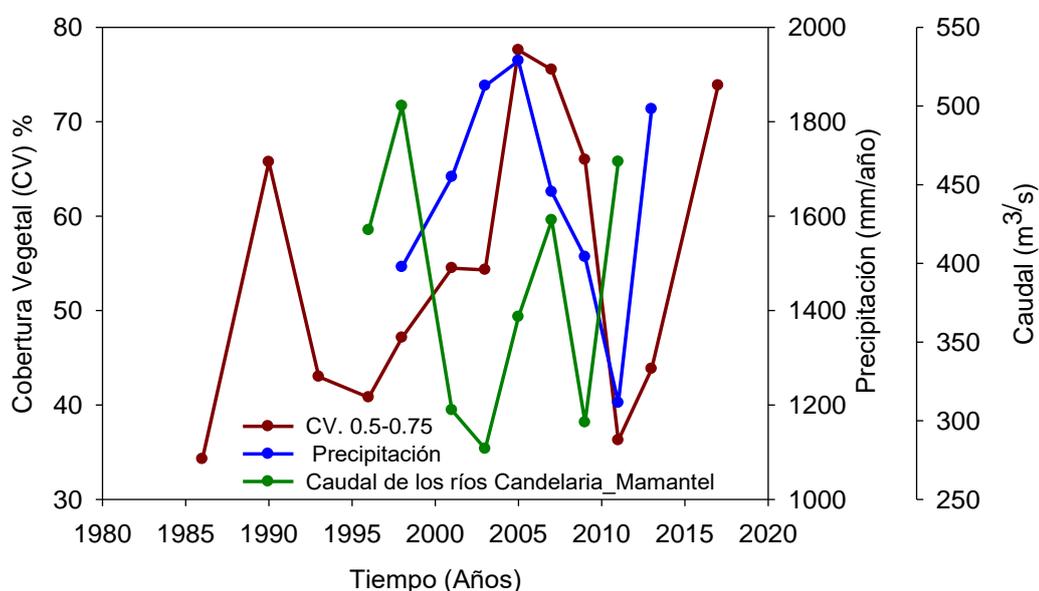


Figura 33. Precipitación pluvial, caudal de los ríos Candelaria y Mamantel, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Candelaria-Mamantel.

Correlaciones en la subcuenca Palizada

En la figura 34 se observa que la mayor cobertura vegetal fue en el año 2007 con el 70% en la clase de vigor de vegetación de 0.5 a 0.75 (la más predominante), mientras que la mayor precipitación fue en el 2005 con 2,024 mm y el mayor caudal acumulado fue en el 2011 con 2,021 m³/s. Los valores mínimos de cobertura vegetal se observaron en 1986 con el 41%, mientras que la precipitación y el caudal coincidieron en el año 2009 con 1,492 mm y 867 m³/s.

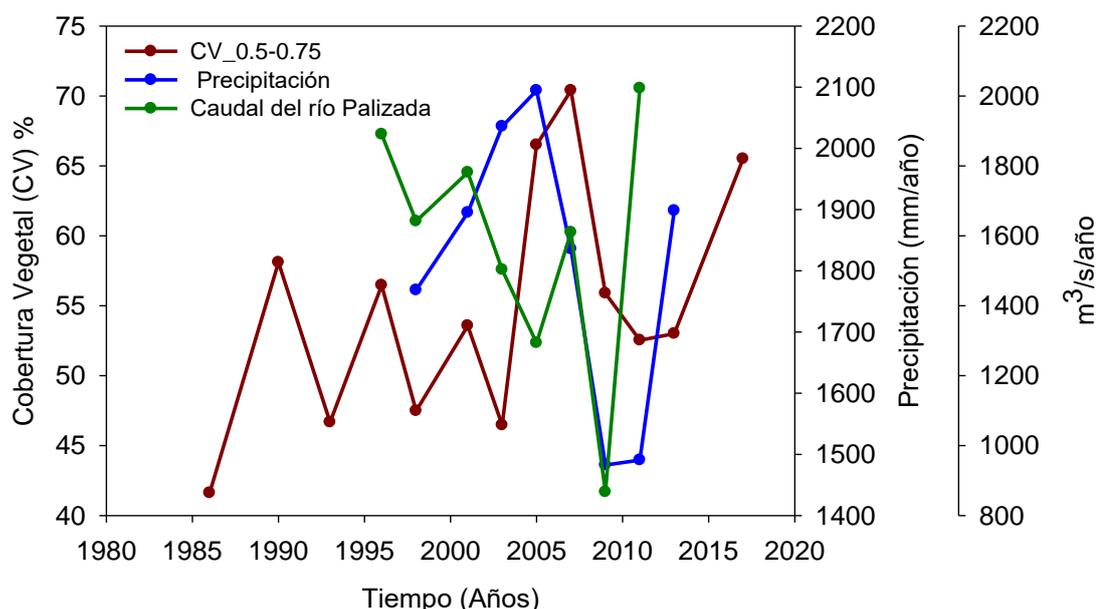


Figura 34. Precipitación pluvial, Caudal del río Palizada, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Palizada.

Correlaciones en la subcuenca Chumpán

En la figura 35 se observa que la mayor cobertura vegetal fue en 2007 con el 88% en la clase de vigor de vegetación de 0.5 a 0.75 (la clase más predominante), mientras que la mayor precipitación fue en 2005 con 4,437 mm y el mayor caudal fue en 1998 con 479 m³/s. Los valores mínimos de cobertura vegetal se observaron en 2003 con el 19%, mientras que la precipitación fue de 1,609 mm en el 2011 y el caudal en 2003 con 268 m³/s.

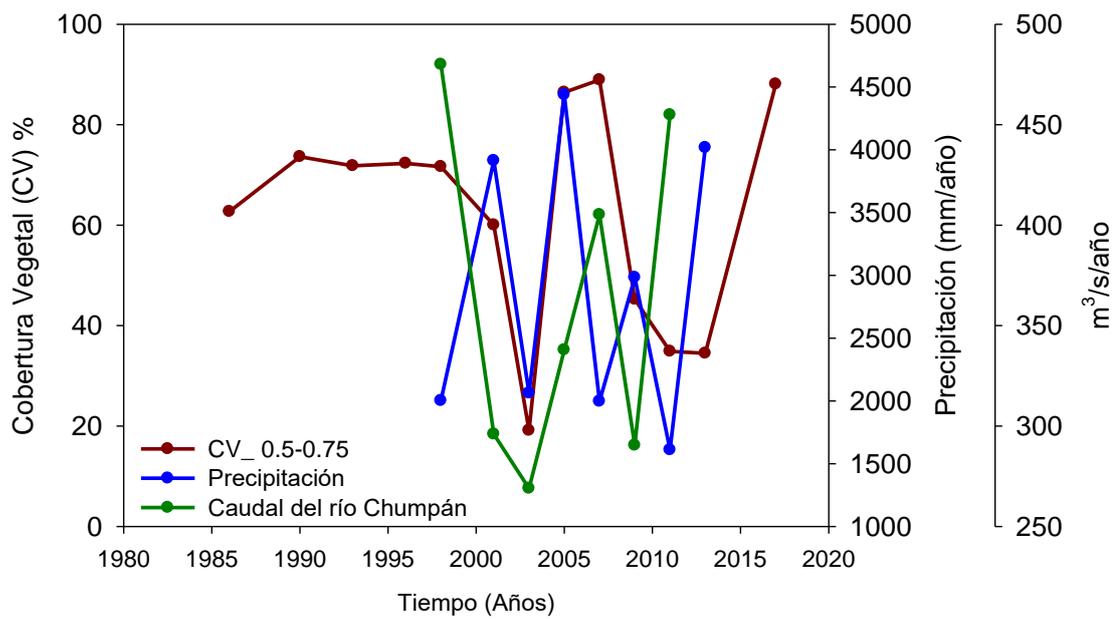


Figura 35. Precipitación pluvial, Caudal del río Chumpán, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75. Subcuenca Chumpán.

Correlaciones en la subcuenca Pom-Atasta

Para la subcuenca Pom-Atasta se observa en la figura 36 que los mayores valores de cobertura vegetal se encontraron en 2007 con el 83%, la TAM en 2013 con 0.11 g/cm²/año y la precipitación en el año 2001 con 2,008 mm. Los menores valores de estas series fueron en 1986 con el 42% de cobertura vegetal, la precipitación en 2009 con 1,233 mm y la TAM con 0.06 de 1998 a 2007.

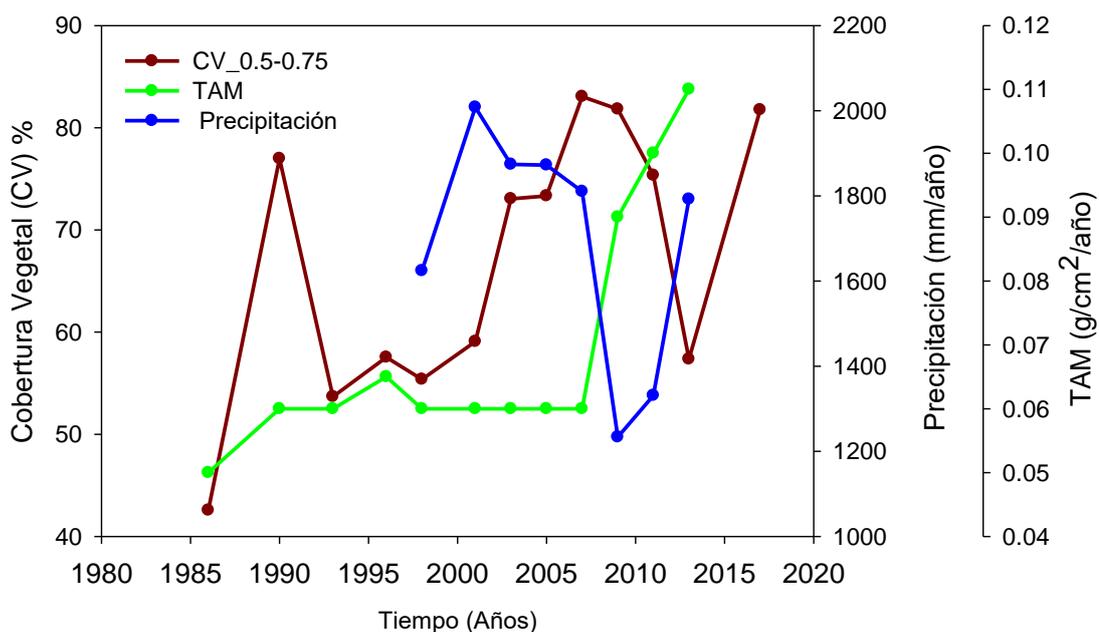


Figura 36. Precipitación pluvial, TAM, clase de vigor de la vegetación de 0.5-0.75 de la subcuenca Pom-Atasta.

9. DISCUSIÓN

9.1. Dinámica del cambio de cobertura vegetal de suelo

El análisis de los cambios ocurridos en la vegetación a través del tiempo permite entender que tanto se desarrollan los procesos de regeneración, sucesión o degradación de los ecosistemas. Los resultados de estos análisis indican que tanto puede influir la actividad antrópica en la transformación de los ecosistemas (Vitousek *et al.*, 1997). La cobertura y uso del suelo son dos de los elementos que mejor evidencian la transformación de la superficie terrestre por parte de la acción humana a través del tiempo (Reyes *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran la variación espacio-temporal de la cobertura del suelo, pero no pueden afirmar qué tanto influye la actividad antrópica en el área de estudio, pero si mostró la variación de la cobertura vegetal en el lapso de 30 años, sin embargo, se puede sustentar esta afirmación con los cambios de uso de suelo analizados por las series de INEGI. La matriz de transición obtenida muestra que uno de los usos de suelos que más aumentó de 1985 al 2016 fue los pastizales con 232, 710 ha en las subcuencas hidrográficas de estudio. Este aumento de los pastizales es el resultado de la influencia de la actividad antrópica.

La Laguna de Términos es una de las más estudiadas en todo el territorio de México, por su amplio ecosistema y biodiversidad. Entre sus estudios, uno de los menos realizados ha sido el cambio en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en esta laguna costera, siendo de mayor interés los cambios en los procesos más relacionados directamente dentro del cuerpo lagunar. El análisis realizado en el presente trabajo sobre los cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas de la Laguna de Términos adquiere relevancia debido a que no se han realizado trabajos en el área con respecto a este tema.

En los resultados de esta investigación referente a los cambios en la cobertura del suelo se subdividió la cobertura vegetal en clases de vigor de vegetación cobertura vegetal obtenidas a partir del NDVI, para determinar cuál de las subcuencas en el lapso de estudio había aumentado o disminuido su cobertura vegetal en general. Para esta investigación los cambios de la cobertura vegetal solo se determinaron mediante imágenes satelitales.

Para mostrar los cambios en la cobertura del suelo, la representación de ésta en clases que diferencian su vigor permitió saber qué subcuenca estaba aumentando o disminuyendo su cobertura vegetal, pero sin diferenciar que tipos de cobertura vegetal estaban cambiando. En el lapso de estudio de 1986 al 2017, los 13 mapas obtenidos (Figuras 8 y 9 y anexos del 1 al 8) muestran que cada subcuenca de estudio se comporta en términos generales de una forma diferente aunque presentan tendencias similares.

La disminución del vigor de la vegetación no está relacionada solamente con la deforestación o pérdida de ésta. El comportamiento espectral de la vegetación varía en función de los cambios fenológicos del follaje. Esto permite distinguir de entrada dos comportamientos: uno en la fase de crecimiento (desarrollo óptimo o vigoroso) y otro en la fase de senescencia (Mandazo-Delgado & Meave, 2003).

De acuerdo con los resultados sobre los cambios en el uso del suelo se observaron comportamientos diferentes en las subcuencas de estudio. De 1986 al 2001, las cuatro subcuencas tuvieron un comportamiento diferente al período de 2003 al 2017 en la clase de vigor (4). En el primer lapso del estudio se tiene porcentajes altos de la clase de mayor vigor de la vegetación (clase 4), lo cual es indicativo de

una vegetación más vigorosa. Estos valores de la clase (4) en este período se sustentan en los mayores valores de precipitaciones observados para las subcuencas (Fig. 20). Para este periodo, la subcuenca que mayor cobertura vegetal presenta es la de Candelaria-Mamantel (Anexo 12.15). Para el segundo período del 2003 al 2017 el vigor de la vegetación disminuyó considerablemente en la clase (4), esta disminución se refleja en la figura 20 con las precipitaciones registradas. Sin embargo, en general, para las cuatro subcuencas aumentaron las clases intermedias de 0.25 a 0.5 y de 0.5 a 0.75, siendo esta última la que más predominó durante todo el lapso estudiado de 1986 al 2017. Los cambios en la cobertura vegetal obtenidos no fueron muy representativos por la escala de trabajo de las imágenes satelitales utilizadas, pero sí se mostró que hay cambios evidentes en la cobertura vegetal de 1986 al 2017.

Las investigaciones realizadas sobre cambios en la cobertura del suelo mediante percepción remota buscan como fin obtener los cambios en los tipos de cobertura vegetal tanto temporal como espacial. Tal es el caso de los trabajos realizados por Cortina *et al.* (1998), Muñoz *et al.* (2008), Mendoza & García (2011). Para lograr estos resultados parten de información obtenida en trabajo de campo del área de estudio y clasifican las imágenes satelitales a partir de áreas de control obtenidas en el trabajo de campo. Las figuras 15 y 16, anexos del 12.16 al 12.19 muestran los cambios en el uso de suelo y vegetación del área de estudio a partir de las bases cartográficas de INEGI. A partir de la evaluación de la transición en el uso de suelo y vegetación se obtuvo que la ganancia de pastizales fue el más significativo con 232, 710 ha (Tabla 10).

9.2. Estimación de la erosión hídrica del suelo y aporte de sedimento a la Laguna de Términos.

La erosión hídrica del suelo es el efecto combinado de los factores causales de la erosión (lluvia, escurrimiento, suelo y topografía) (Montes-León *et al.*, 2011). De acuerdo con Dumas (2012) los principales factores que influyen en la erosión hídrica son la precipitación, edafología, la topografía, así como la vegetación y el uso del suelo.

Las cuencas que descargan en la Laguna de Términos no son ajenas al tema sobre la erosión hídrica. Teniendo en cuenta la clasificación de la FAO (1989) para la

estimación de la erosión hídrica se obtuvo para las cuatro subcuencas una erosión ligera de 5 a 10 t/ha/año (Tabla 12). Los resultados de la erosión hídrica del presente trabajo coinciden con los expuestos por Estrada & Ortiz (1979) en el que exponen que el estado de Campeche presenta un 100% de erosión hídrica ligera (5 a 10 t/ha/año).

SEMARNAT (sin fecha) también realizó una evaluación de la erosión hídrica para todo México en 2002 y obtuvo para el área de estudio una erosión mínima de 0 a 5 t/ha/año para la mayor parte del área de estudio, y una erosión ligera (5-10 t/ha/año) en la región noreste de la subcuenca Candelaria-Mamantel. Estos resultados coinciden con los obtenidos en el presente trabajo al ser la subcuenca Candelaria-Mamantel la que mayor erosión presenta en el lapso de 2002 a 2016 con valores de 8.8 t/ha/año en el 2002, mientras que las demás subcuencas tienen valores que no sobrepasan las 5 t/ha/año (erosión mínima).

Otros autores como Montes-León *et al.* (2011) obtienen la erosión hídrica potencial de México para el 2011, utilizando la clasificación propuesta por INEGI (2014^a). Sus resultados muestran que para el área de estudio en general corresponde una erosión baja (< 50 t/ha/año), esto coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Debido a los factores antes mencionados que influyen en la erosión del suelo, Coleman & Scatena (1986) plantean que la pérdida de suelo o la erosión está determinada principalmente por las características del suelo y de la vegetación o el uso que la sustenta. Sin embargo, el relieve es el que determina la degradación específica, al controlar su salida hacia los cauces de los ríos Coleman & Scatena (1986). Esto se sustenta con los resultados de este trabajo, al presentar el área de estudio un relieve prácticamente plano, excepto en la zona sur de las subcuencas Chumpán y Candelaria-Mamantel que presentan las mayores elevaciones, sin embargo, no tan significativas (18 grados) para arrastrar el sedimento ladera debajo de la pendiente (González, 1993).

También cabe destacar el hecho de que la vulnerabilidad a la erosión de los suelos depende de la textura, estabilidad estructural, capacidad de infiltración, entre otras características (González, 1993). En las cuatro subcuencas hidrográficas hay un predominio de los suelos gleysoles. De acuerdo con INEGI (2004) estos son suelos

pantanosos en los que se acumula y estanca el agua, lo cual juntamente con la pendiente suave que caracteriza al área no son favorables para el escurrimiento, la depositación de sedimento, ni para la erosión del área. Sin embargo, al sur de la subcuenca Candelaria-Mamantel los suelos son vertisoles caracterizados por ser suelos húmedos que pueden formar grietas en la superficie, incluso a determinada profundidad (50 cm y 1 m) (INEGI, 2004).

El uso de suelo y vegetación determina el grado de protección de una cuenca, ante la lluvia y por lo tanto a la erosión hídrica (Flores, 2016). De las subcuencas del área de estudio, la de Pom-Atasta es en la que menos se ha modificado la cobertura del suelo, con un predominio de manglar y vegetación hidrófila, además de encontrarse en el área protegida CETLAN, siendo la subcuenca que ocupa una mayor parte del área protegida de la flora y la fauna de la Laguna de Términos (a partir del año 1991). Esto se sustenta con el hecho de ser la subcuenca que menos valores de erosión hídrica presenta.

Los estudios sobre la erosión hídrica bajo condiciones físico-geográficas diferentes han sido de gran interés y objeto de varias investigaciones. Tal es el caso de los trabajos realizados por Flores (2016), García (2003), Castro (2013) al estimar la erosión hídrica para subcuencas con condiciones físico-geográficas diferentes, evidenciando la influencia de todos los parámetros que conforman la ecuación USLE.

Por otro lado, en el presente trabajo se estimaron los aportes de sedimento desde los cauces principales del área de estudio. Los valores fueron bajos para las cuatro subcuencas, menores a 1 t/ha/año. Los sedimentos producidos por erosión están asociados al transporte por escurrimiento superficial, eventos hidrológicos ordinarios característicos de la cuenca, relacionado con el régimen de lluvia (COBINABE, 2010). La cantidad de sedimentos generados en una cuenca hidrográfica también se van a ver reflejados en las mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos del agua. La subcuenca Pom-Atasta no presenta corrientes superficiales significativas, siendo el sistema lagunar Pom-Atasta su principal fuente de agua superficial. A esto le podemos atribuir el hecho de ser la subcuenca con menos sedimento exportado a la Laguna de Términos. Sin embargo, la mayor cantidad de sedimento exportado está en la subcuenca Candelaria-Mamantel. A esto podemos

asociar también la implicación de las precipitaciones, así como su intensidad, aunque no muy representativa para marcar diferencias entre las subcuencas, debido a que, para toda el área de estudio, la precipitación pluvial oscila entre 1,200 y 2,100 mm/año en el lapso de 1998 a 2016, pero sí influyen junto con la pendiente en el arrastre de sedimentos hacia la laguna.

9.3. Correlaciones de registros históricos.

Los factores y procesos dentro de una cuenca hidrográfica como se ha descrito durante este trabajo van a estar relacionados, y cambios de unos implican en el desarrollo y sustento de otros.

Las correlaciones lineales realizadas entre los registros ambientales por subcuencas (apartado 8.6) no mostraron una relación entre la cobertura del suelo con los caudales de los ríos y la precipitación pluvial, y la TAM (subcuenca Pom-Atasta) sin embargo, esto no determina que no exista dicha relación (Tabla 13).

10. CONCLUSIONES.

La subcuenca Pom-Atasta fue la que evidenció menos cambios en la cobertura vegetal al obtenerse aumentos en la clase (4) en el 2017. Esto en parte complementado por ser la que menos cambios en uso de suelo experimentó durante el periodo de 1986 al 2017. Mientras que la subcuenca Candelaria-Mamantel fue la que menor variación mostró en la cobertura vegetal de 1986 a 2017.

Las cuatro subcuencas de estudio presentaron una erosión hídrica de nula a ligera con valores entre 0 y 10 t/ha/año. Los valores más elevados se obtuvieron en la subcuenca Candelaria-Mamantel con 8.8 t/ha/año, siendo la subcuenca que mayor grado de pendiente presenta (18 grados) y suelos gleysoles que contribuyen a un mayor escurrimiento.

Los factores C y LS y resultaron ser los más determinantes en la erosión hídrica del suelo. Los menores valores de erosión fueron en la subcuenca Pom-Atasta, siendo esta la que menos cambios de uso de suelo y tipos de vegetación tuvo con valores menores a 1 t/ha/año.

La subcuenca con mayor aporte de sedimento a la Laguna de Términos fue la de Candelaria-Mamantel con 7.6 t/ha/año en 2016, mientras que el menor aporte de sedimento se obtuvo en la subcuenca Pom-Atasta al no tener una red hidrográfica superficial significativa con 1.5t/h/año.

Las precipitaciones pluviales no resultaron ser un factor determinante en la erosión hídrica del suelo. Para las cuatro subcuencas hidrográficas hubo valores durante el período de 1998 al 2016 que oscilaron entre los 1200 y 20100, debido a que se encuentran en el mismo tipo de clima y zona geográfica, sin accidentes geográficos significativos.

Las correlaciones lineales por cada una de las subcuencas no mostraron relación entre los registros históricos analizados. Sin embargo, sería conveniente realizar un estudio más profundo por cada uno de los registros históricos para la obtención de resultados mejores y más exactos.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aguíñiga-García S., J.A. Romo-Ríos., A. Sánchez-González., A. Tripp-Valdéz., F. Arreguín-Sánchez., E. Olivares-Rodríguez., A.H. Ruvalcaba-Díaz, 2016. Contraste de la contribución relativa de los productores primarios (SIAR- $\delta^{13}\text{C}$) a la materia orgánica sedimentaria entre 1984 y 2011 en Laguna de Términos, Campeche. XIX Congreso Nacional de oceanografía. Ciudad de México.
- Araneda, A., M. Cisternas., R. Urrutia, 1999. USLE y análisis isotópicos en la reconstrucción de la historia erosional en una cuenca lacustre. Unidad de Sistemas Acuáticos. Centro EULA-Chile.
- Bach, L., R. Claderon., M.F. Cepeda.,A. Oczkowski., S. Olsen., D. Robadue, 2015. Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio, Laguna de Términos y su Cuenca, México. USAID, The Nature Conservancy, Coastal Resources Center.
- Belda, F., Melia, J., Segarra, D. 1999. Relación entre el NDVI, precipitación y humedad del suelo. Aplicación a zonas forestales de la provincia de Alicante. VIII Congreso Nacional de Teledetección. España. pp. 80-83.
- Bojorquez- Sánchez, S. 2017. Evaluación de tasas de cambio en el nivel del mar y tendencias en flujos de elementos traza en Veracruz. México (Tesis Doctoral).
- Carabel, S., E. Godínez-Domínguez, P. Verísimo, L. Fernández y J. Freire. 2006. An assessment of sample processing methods for stable isotope analyses of marine food webs. *J Ex Mar Biol Ecol*, 336(2): 254-261
- Castro. I, 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Hidrociencias*.
- Chuvienco, E., 1995. Fundamentos de teledetección espacial. Madrid. Segunda edición.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas/.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <https://www.gob.mx/conabio/>.

- Cortés, T. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México, 1991.
- Cortina. S., P.M. Mendoza., Y.O. Himmelberguer, 1998. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México
- Cotler, H. Ríos, E. Pineda, R.F. González, I. Galindo, A. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Colección: Cuadernos de divulgación ambiental. SEMARNAT-CECADESU, Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. pp. 6-8.
- Dirección General de Geografía y Medio Ambiente (INEGI), 2010. Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica. Escala 1:50 000. Edición 2.0. pp. 8.
- Dumas. A, 2012. Riesgos de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo. España. Tesis para máster en Tecnologías de la Información Geográfica.
- Estrada. J: W & Ortiz. C.A (sin fecha). Plano de erosión hídrica del suelo en México. Su presentación: Escala 1:8 000 000, obtenido por la metodología FAO (1979).
- Falcón, O. 2014. Dinámica de cambio en la cobertura/uso del suelo, en una región del estado de Quintana Roo, México. El impacto de las políticas gubernamentales sobre el Manejo Forestal Comunitario. Tesis para optar por el grado de Maestro en Geografía Ambiental. México, DF.
- Fíchez, R., Archundia, D., Grenz, C., Douillet, P., Gutiérrez, F., Origel, M., Denis, L., Contreras, A., Zavala, 2016. Global climate change and local watershed management as potential drivers of salinity variation in a tropical coastal lagoon (Laguna de Terminos, Mexico).
- Figuroa, L., A. Ibáñez., R. Artega., L. Arellano., P. Vázquez, 2011. Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Montecillo. México. Universidad Autónoma Chapingo.56230.
- Flores, E. 2016. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo. Tesis para obtener el título Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Fonseca, D., Durigon, V., Homem, A., Sampaio, W., Sanchez, P. 2014. Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5. Brazil. Universidad Federal Rural de Río de Janeiro
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5a ed. Serie Libros 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Gaspari FJ., Senisterra GE., Delgado MI, Rodríguez Vagaría A, Besteiro S. 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina. pp.321.
- Gaspari, J, F., Rodríguez, AM., Delgado, M., Senisterra, G., Denegri, G. 2011. Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante sig. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Diagonal 113 N 469.
- Gómez, M.K. 2005. Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales.
- Gonneea, M; Paytan, A; Herrera-Silveira. 2003. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years. Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, USA.
- González. M, 1993. Erosión real y erosión potencial. Principales métodos para su estimación. Universidad Politécnica de Madrid. N°34.
<http://www.fao.org/home/es/>.
- INEGI, 2016-A. Datos de Relieve. Recuperado el 22 de diciembre de 2016 de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuo_elevaciones.aspx
- INEGI, 2016-B. Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0. Recuperado el 22 de febrero de 2018 de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/hidrologia/regiones_hidrograficas.aspx.
- INEGI, 2016-C. Edafología. Recuperado el 18 de noviembre de 2017 de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serie_ii.aspx.
- INEGI, 2016-D. Uso de suelo y vegetación. Recuperado el 18 de noviembre de 2017. de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>

- INEGI. 2010. Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica. Escala 1:50000. Segunda edición. pp 8. Recuperado el 10 de octubre de 2017 de:
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrografica_s.aspx.
- Köppen, W. 1936. Das geographische System der Klimate in Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C., Berlín, pp 1-44.
- Kummerow, C., J. Simpson., O. Thiele., W. Barnes., A.T. Chang., E. Stocker., R.F. Adler., A. Hou., R. Kakar., F. Wentz., P. Ashcroft., T. Kozu., Y. Hong., K. Okamoto., T. Iguchi., H. Kuroiwa., E. Im., Z. Haddad., G. Huffman., B. Ferrier., W.S. Olson., E. Zipser., E.A. Smith., T.T. Wilheit., G. North., T. Krishnamurt., K. Nakamura, 2000. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. American Meteorological Society. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins. Colorado.
- Loredo et al., 2007. Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí. Libro Técnico N°.3.
- Loredo, O., 1994. Efecto de la reforestación sobre el control de la erosión hídrica. Tesis de maestría en ciencias. UAAAN. pp. 25.
- Mandazo-Delgado. L & Meave. J. A, 2003. La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota.
- Mas, J. F. (1998). "Deforestación y fragmentación forestal en la región de la Laguna de Términos, Campeche: un análisis del período 1974-91", Memorias de la IX Reunión Nacional SELPER-México en CD-Rom, archivo te3.doc, Zacatecas, Zao, 8-9 oct. de 1998, <http://epomex.uacam.mx/selp98.htm>
- Mas, J., Velázquez, A., Couturier, S. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. Investigación ambiental. Ciencia y Política Pública 1: 23-39.
- Masera, O. 1996. Desforestación y degradación forestal en México. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada. GIRA. Pátz-cuatro.
- Masera, O., Ordoñez, M., Dirso, R. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios, Climatic Change

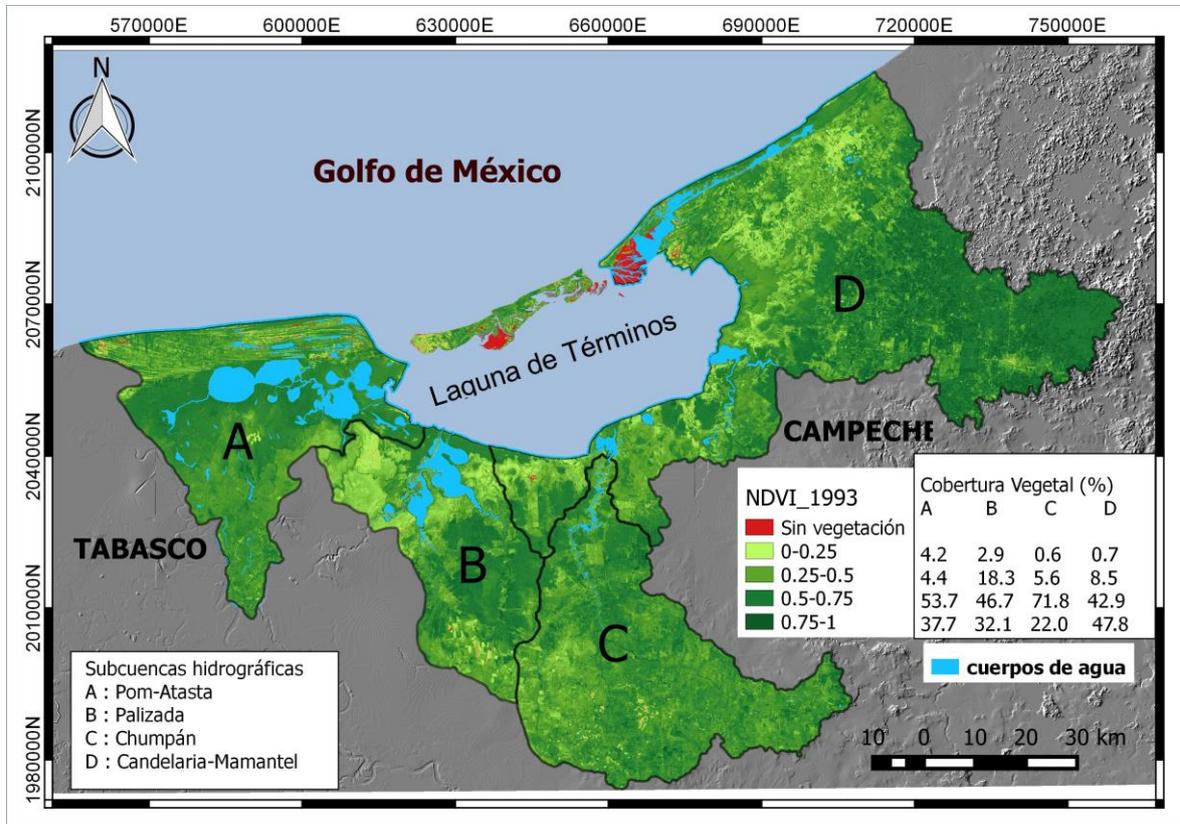
- 35: 265--295. Centro de Ecología, Universidad Nacional de México (UNAM).
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., Meyer, L. D. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE 30: 1387-1396.
- MeFeeters, S. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. Int. J. Remote sensing. Vol.17, No 7,1425-1432.
- Mendoza. E.G & García. K.P, 2011. Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el municipio de Manaure-Guajira, Colombia, implementando imágenes Landsat.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Montes-León, M., Uribe-Alcántara, E. & García-Celis, E., 2011. Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua, II (1), pp. 5-17.
- Montes-León. M.A., Uribe-Alcántara. E.M., García-Celis. E, 2011. Mapa Nacional de Erosión Potencial. México. Tecnología y Ciencias del Agua. pp. 5-17.
- Muñoz. D., M. Rodríguez., M.R. Hernández, 2008. Análisis multitemporal de cambios de uso de suelo y coberturas, en la microcuenca Las Minas, corregimiento de la laguna, municipio de Pasto, departamento de Nariño
- Nágera, O., Bojórquez, JI., Cifuentes, JL., Flores, M. 2010. Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. México. Revista Biociencias. pp. 20.
- Natural Capital Project, 2018. Natural Capital Sediment Retention. [Online] Recuperado el 10 de marzo de 2018 de: <http://data.naturalcapitalproject.org/nightlybuild/invest-users/guide/html/sdr.html>
- Olaya, V. 2014. Sistemas de Información Geográfica.
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma. Italia. pp. 86.

- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), 2016. El estado de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: Desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)., 2015. Evaluación de los recursos forestales mundiales. Roma.
- Osuna, A.K., Días, J.J., Sánchez, J.A., Villegas, E., Gallardo, J., Dávila, G. 2015. Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. México.
- Pedraza. A, 2015. Estimación de la erosión hídrica mediante dos métodos de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) en la cuenca del río Chapingo. Tesis de licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de México.
- Ríos-Berber, J. D. (1987). Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. 544p.
- Romo, A. 2013. Productores primarios y su relación con la distribución de la ictiofauna en Laguna de Términos y plataforma continental adyacente, Campeche, México. Tesis para obtener el grado de maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos.
- Rouse, J., 1973. Monitoring the verbal advancent and retrogradation (Green wave effect of natural vegetation). Texas A & M University Remote Sensing Center. College Station.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds). Third Earth Resources Technology Satellite-1. Syposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.
- Rullán-Silva, L.M., A. Gama., A. Galindo.,A.E. Olthoff, A.E, 2013. Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes Landsat ETM+. Universidad y Ciencia. www.ujat.mx/publicaciones/uciencia

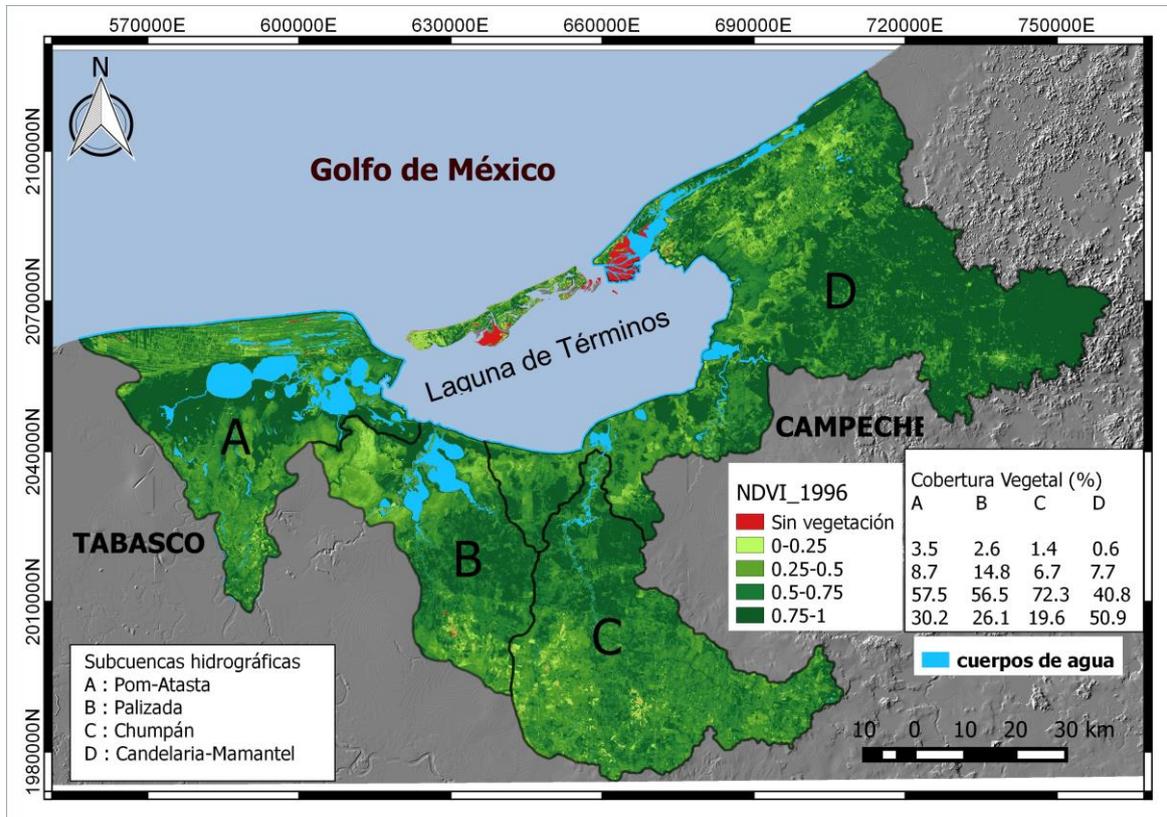
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT).1997. Programa de manejo del área de protección de flora y fauna "Laguna de Términos". pp. 19-40.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT) (Sin Fecha), Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000. México.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT). 1995. Programa de manejo de la zona de protección de flora y fauna, Laguna de Términos.
- Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://landsat.usgs.gov/>).
- Song, C., C.E. Woodcock., K.C. Seto., M.P. Lenney., S.A. Macomber, 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? Remote Sensing of Environment 75, 230-244.
- Soto, E., Piera, J & López, P. 2010. Spatial and temporal land cover changes in Términos Lagoon Reserve, México.
- Soto, J., J. Gómez., O. Díaz., A. Golen, 2000. Estudio de tasas de sedimentación y datación de sedimentos en la bahía de Santander (España). Universidad de Cantabria. Santander, España. Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares. La Habana, Cuba.
- Torres, E.,1984. Manual de conservación de suelos agrícolas. México. Ed. Diana.
- Villéger, S., Ramos, J., Flores, D., Mouillot, D. 2010. Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation.
- Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J., Melillo, J. 1997. Human Domination or Earth is Ecosystems. Science, New Series, Vol. 277, N°5325.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D.,1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. Disponible en: <http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>.

12. ANEXOS

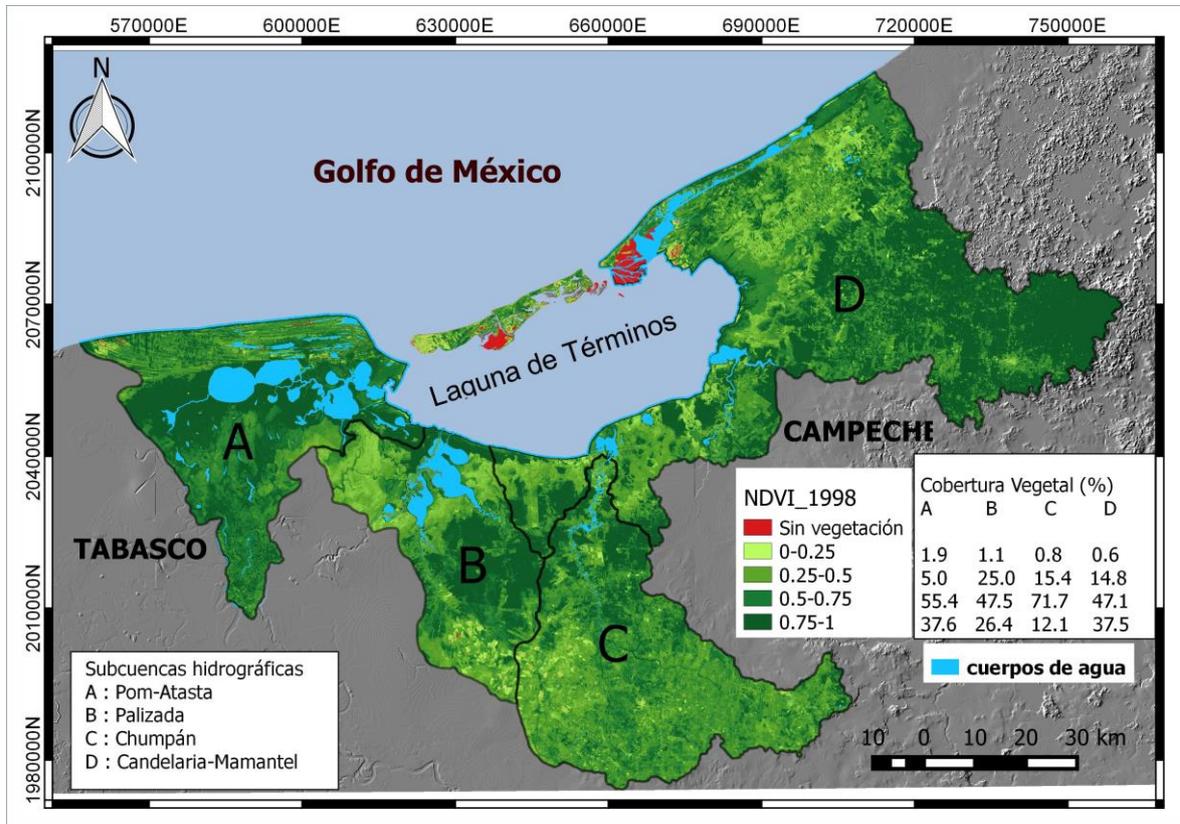
Anexo 12.1. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 1993



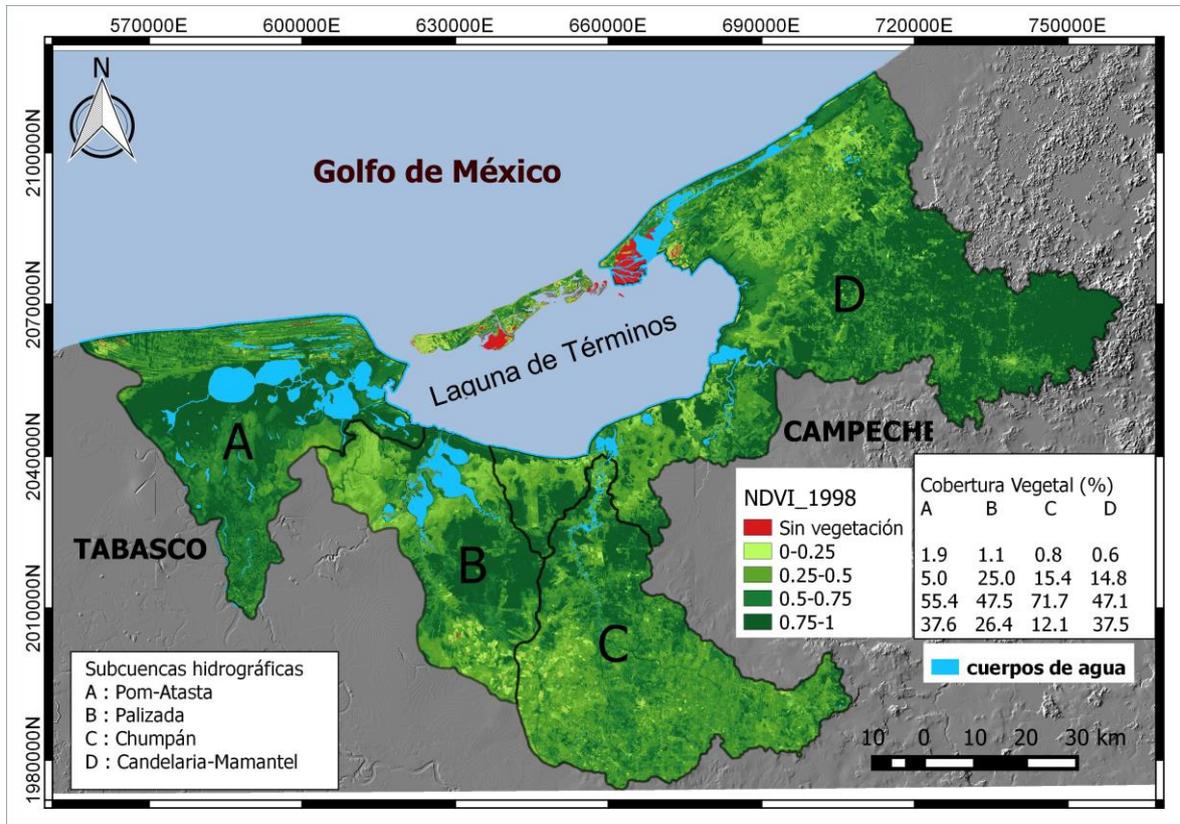
Anexo 12.2. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 1996



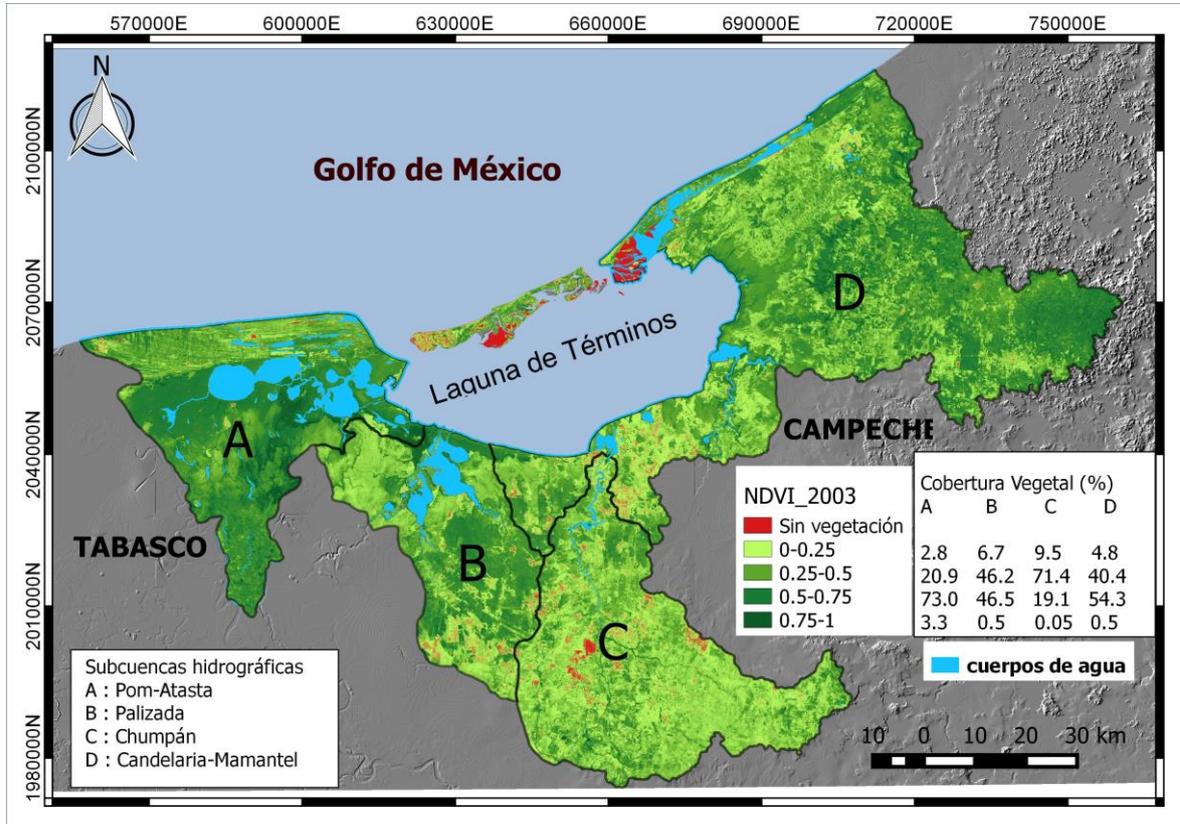
Anexo 12.3. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 1998



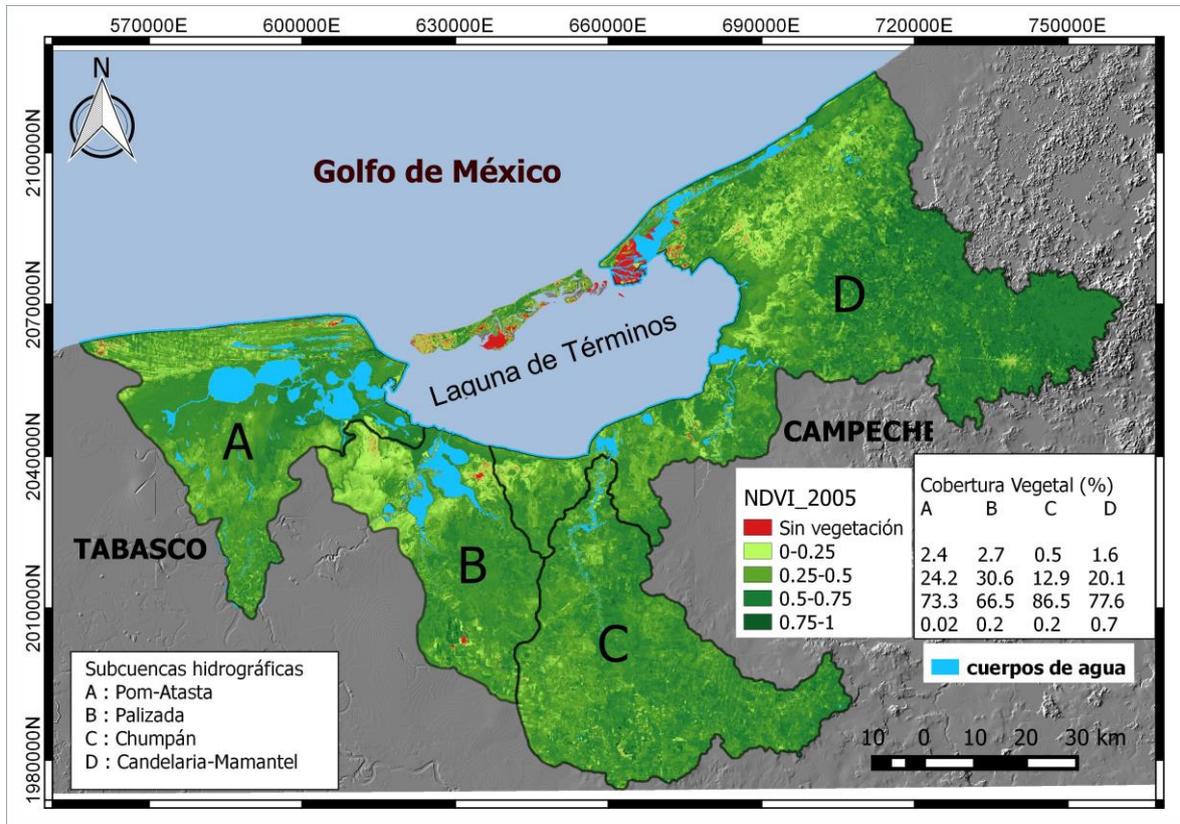
Anexo 12.4. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2001



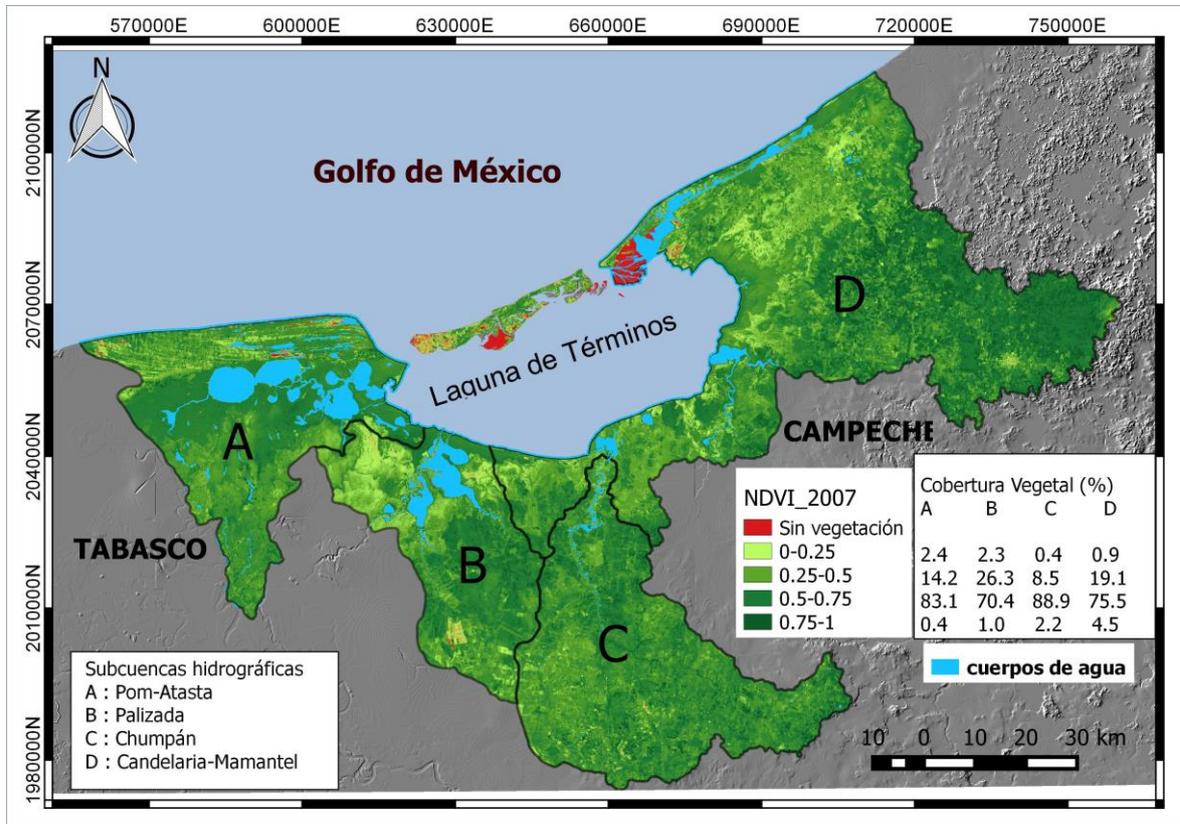
Anexo 12.5. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2003



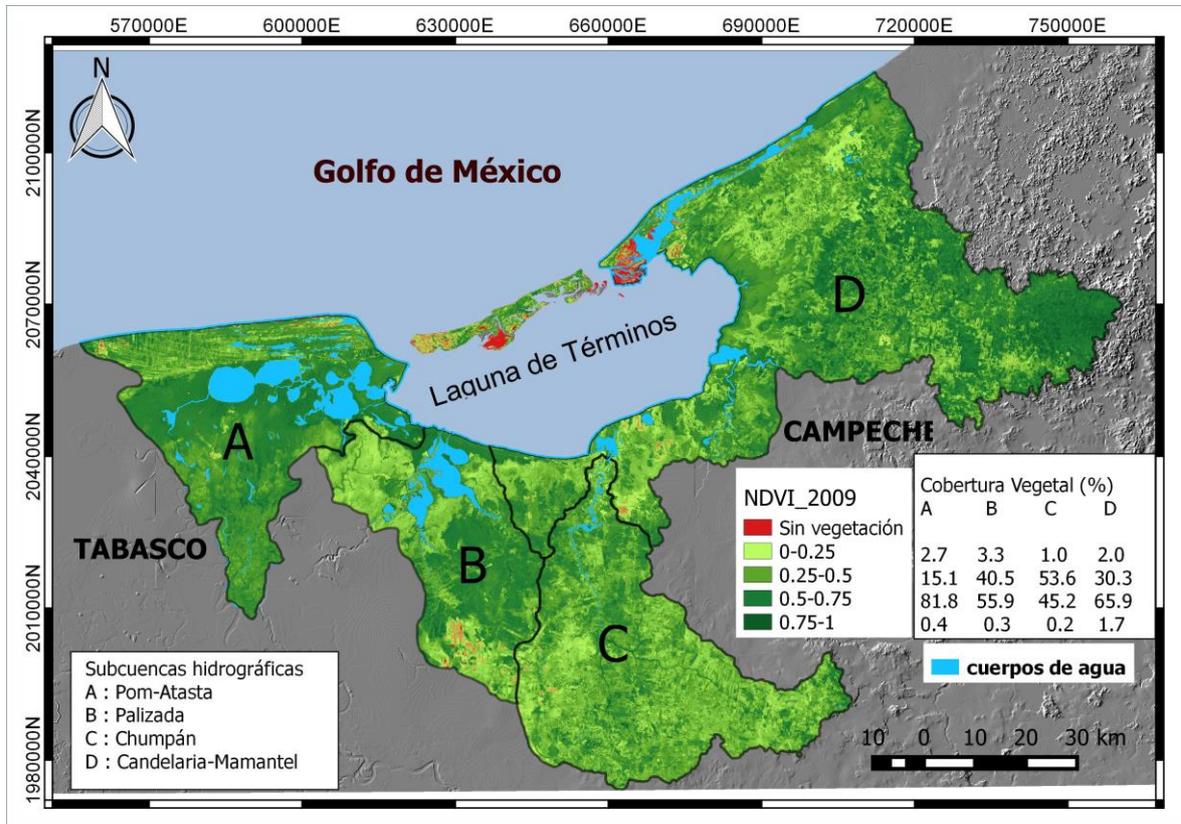
Anexo 12.6. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2005



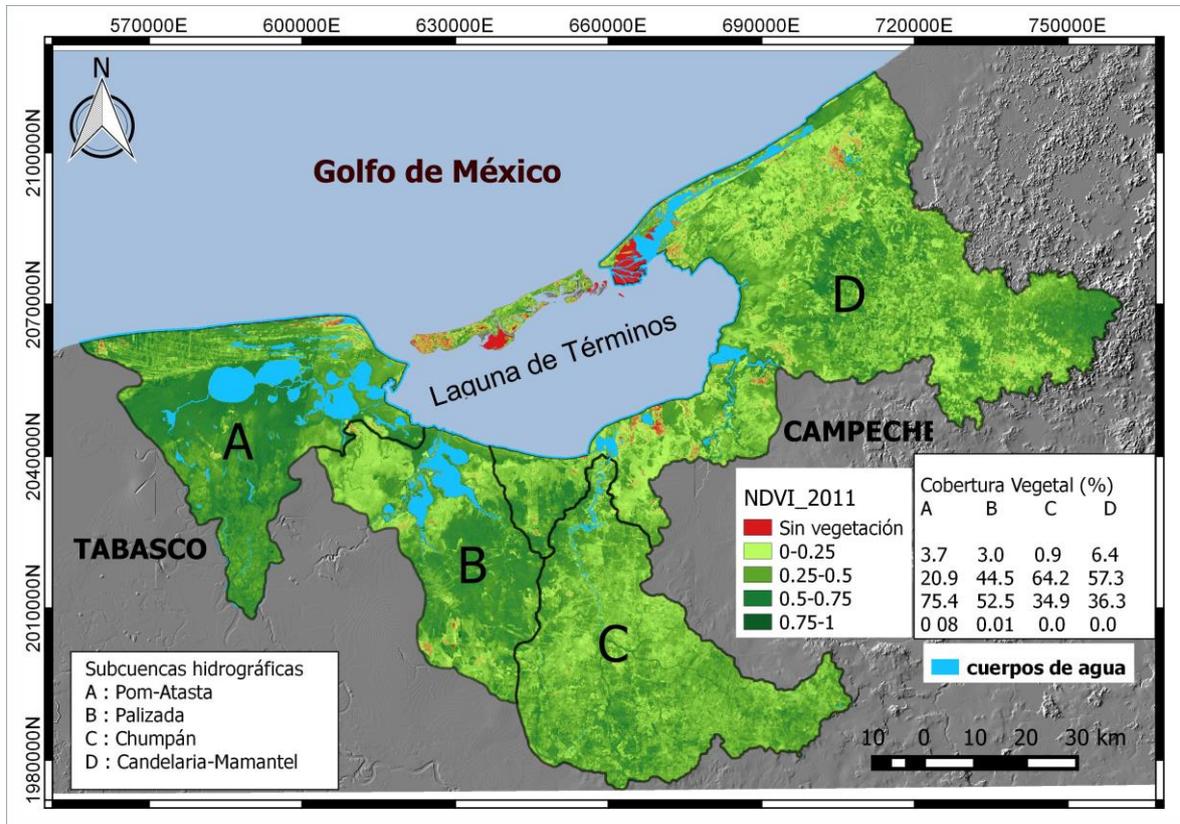
Anexo 12.7. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2007



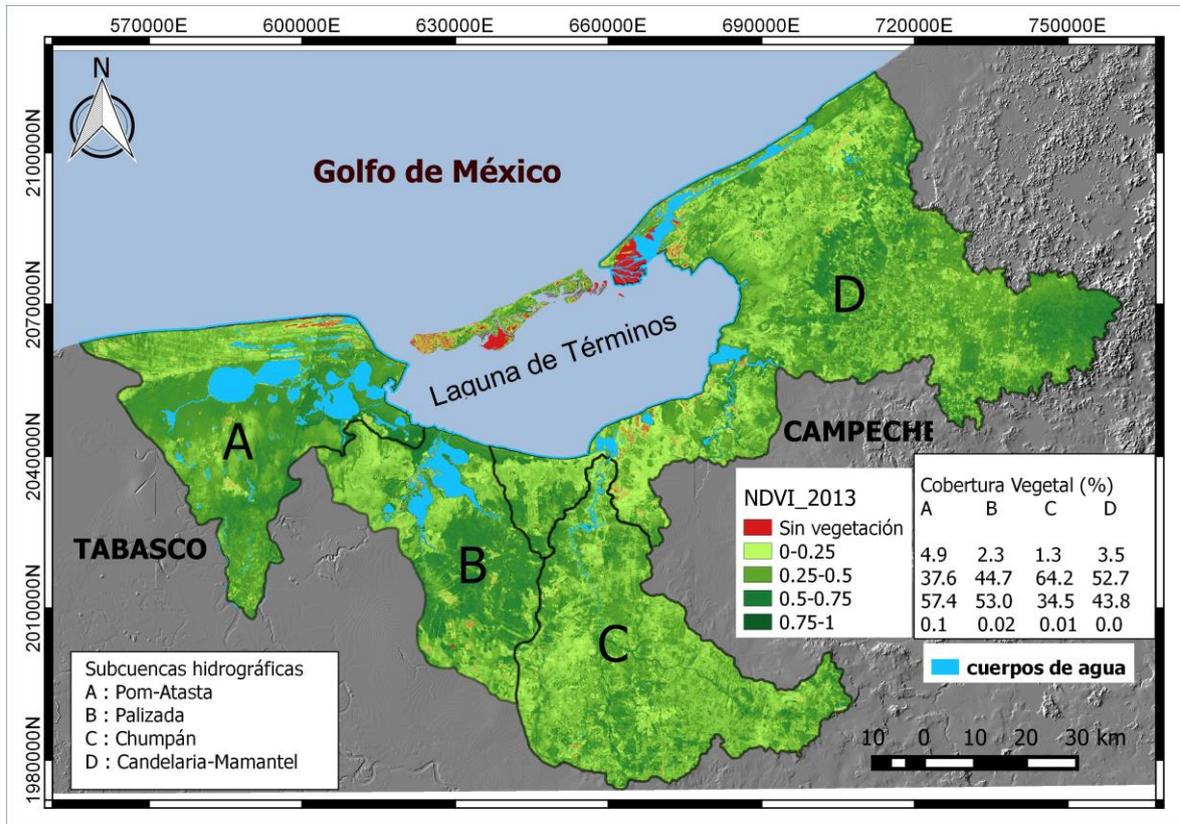
Anexo 12.8. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2009



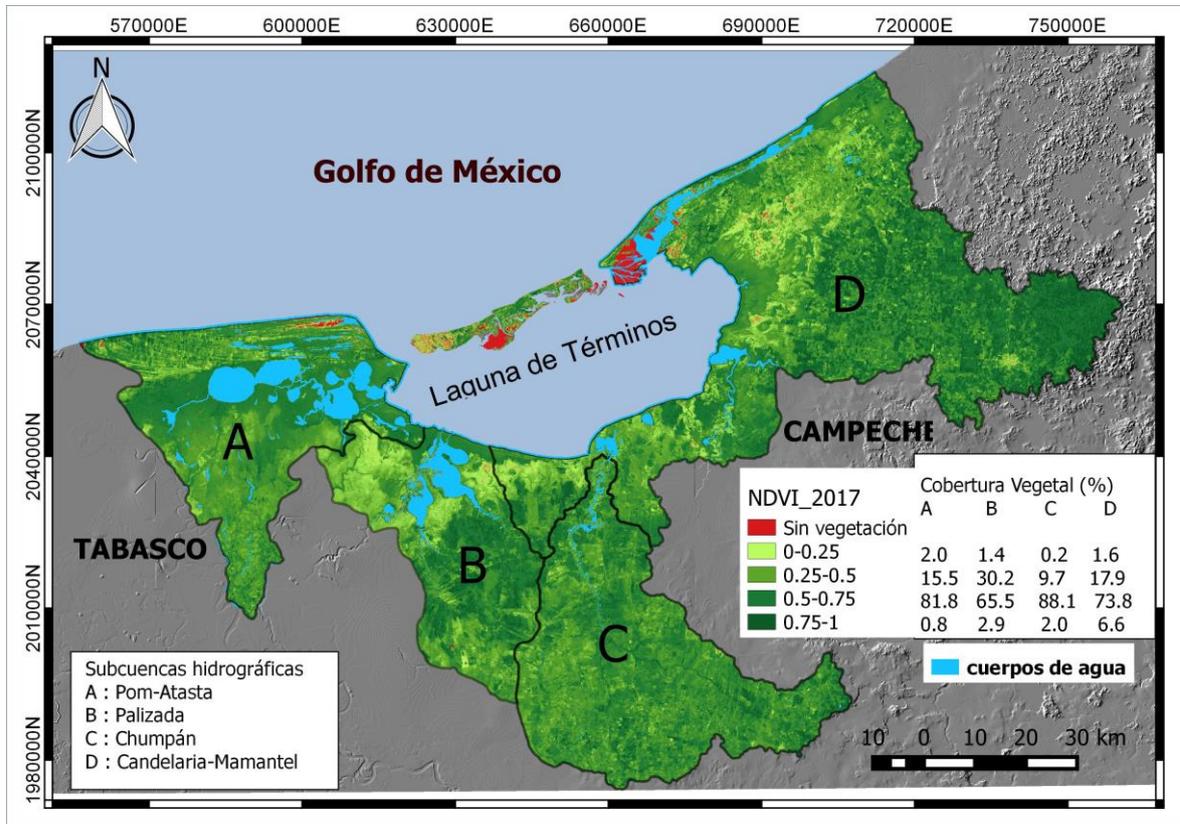
Anexo 12.9. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2011



Anexo 12.10. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2013



Anexo 12.11. Cambios en la cobertura del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en Laguna de Términos. 2017



Anexo 12.12. Clase de vigor de la vegetación de 0-0.25 (%) en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 1986-2017

Años	0-0.25			
	Candelaria-M	Pom-Atasta	Palizada	Chumpán
1986	1.35	5.40	3.27	0.71
1990	1.86	3.63	6.53	1.66
1993	0.71	4.19	2.94	0.55
1996	0.58	3.54	2.62	1.37
1998	0.58	1.98	1.10	0.84
2001	1.54	2.73	2.89	0.85
2003	4.78	2.76	6.77	9.47
2005	1.58	2.43	2.72	0.49
2007	0.87	2.36	2.29	0.40
2009	2.01	2.72	3.32	1.02
2011	6.44	3.66	2.99	0.91
2013	3.50	4.88	2.29	1.31
2017	1.64	1.98	1.41	0.20

Anexo 12.13. Clase de vigor de la vegetación de 0.25 – 0.5 (%) en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 1986-2017

Años	0.25-0.5			
	Candelaria-M	Pom-Atasta	Palizada	Chumpán
1986	5.30	6.96	17.34	8.70
1990	31.55	18.91	35.24	24.63
1993	8.48	4.40	18.31	5.57
1996	7.67	8.73	14.84	6.71
1998	14.75	5.04	25.03	15.37
2001	21.38	18.58	16.86	33.66
2003	40.41	20.93	46.22	71.36
2005	20.13	24.22	30.61	12.86
2007	19.08	14.15	26.32	8.49
2009	30.32	15.05	40.46	53.59
2011	57.30	20.91	44.47	64.22
2013	52.67	37.63	44.69	64.21
2017	17.97	15.45	30.24	9.72

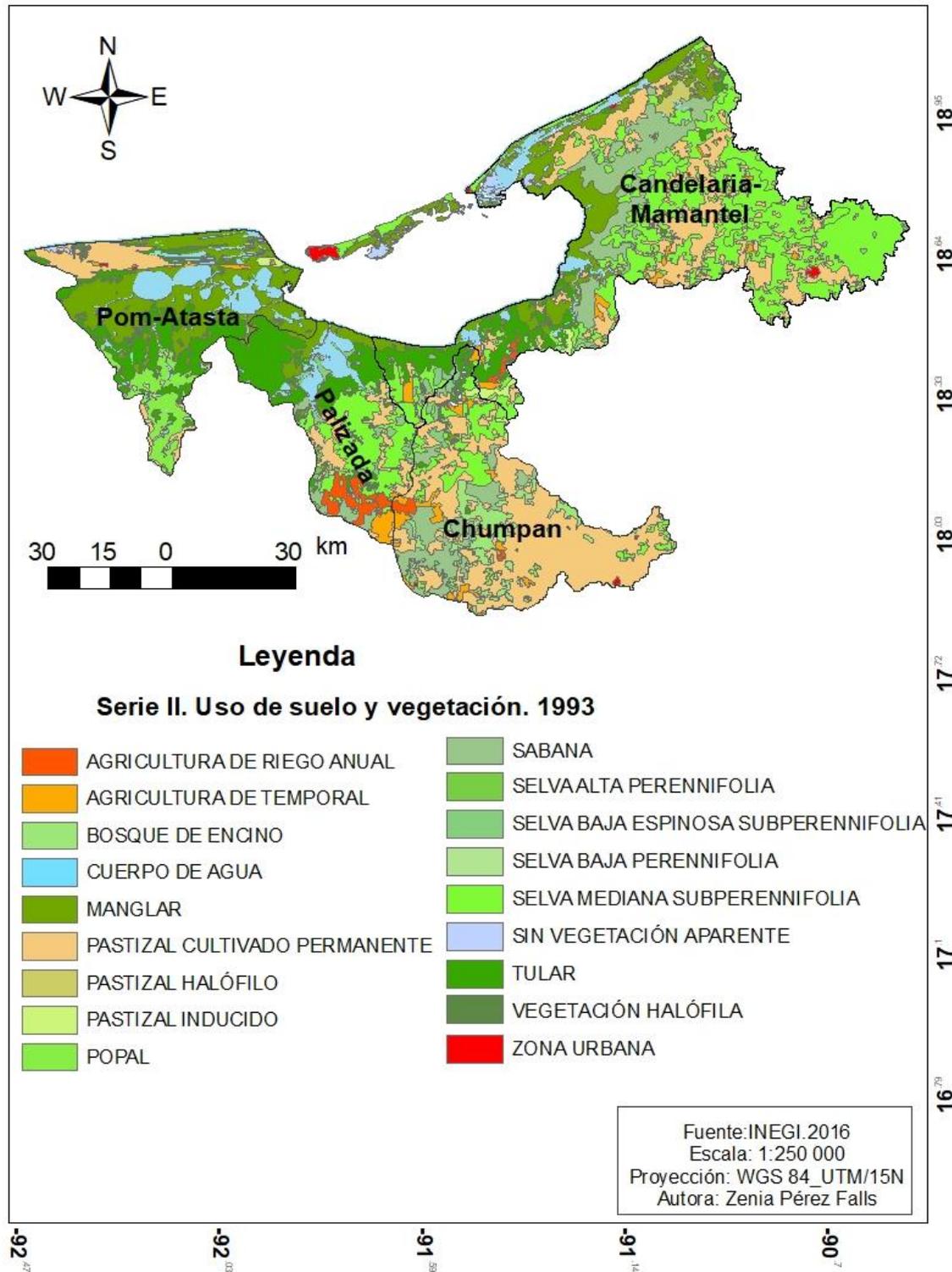
Anexo 12.14. Clase de vigor de la vegetación de 0.5 – 0.75 (%) en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 1986-2017

Años	0.5-0.75			
	Candelaria-M	Pom-Atasta	Palizada	Chumpán
1986	34.27	42.57	41.61	62.71
1990	65.73	76.98	58.10	73.63
1993	42.98	53.68	46.68	71.81
1996	40.81	57.53	56.46	72.31
1998	47.12	55.37	47.48	71.65
2001	54.49	59.07	53.57	60.03
2003	54.31	73.04	46.47	19.12
2005	77.58	73.33	66.50	86.45
2007	75.51	83.05	70.39	88.93
2009	65.97	81.82	55.89	45.24
2011	36.25	75.35	52.53	34.86
2013	43.83	57.36	53.00	34.47
2017	73.84	81.75	65.50	88.09

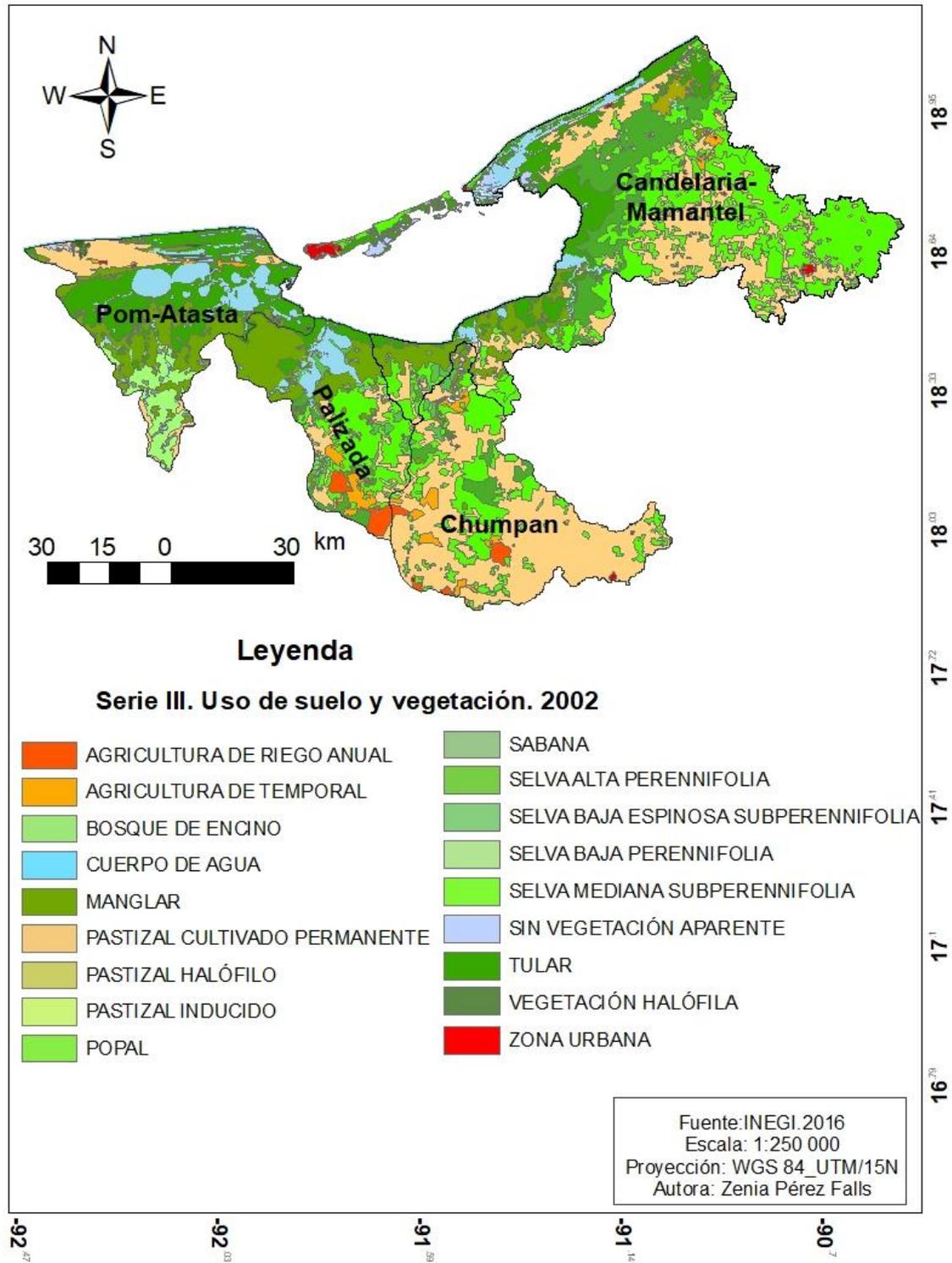
Anexo 12.15. Clase de vigor de la vegetación de 0.75 – 1 (%) en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 1986-2017

Años	0.75-1			
	Candelaria-M	Pom-Atasta	Palizada	Chumpán
1986	59.07	45.07	37.77	27.88
1990	0.87	0.47	0.13	0.08
1993	47.82	37.73	32.08	22.07
1996	50.94	30.20	26.08	19.62
1998	37.54	37.61	26.39	12.14
2001	22.58	19.63	26.69	5.47
2003	0.49	3.27	0.54	0.05
2005	0.71	0.02	0.16	0.20
2007	4.54	0.43	1.00	2.17
2009	1.70	0.41	0.32	0.15
2011	0.01	0.08	0.01	0.00
2013	0.00	0.13	0.02	0.01
2017	6.56	0.81	2.85	1.99

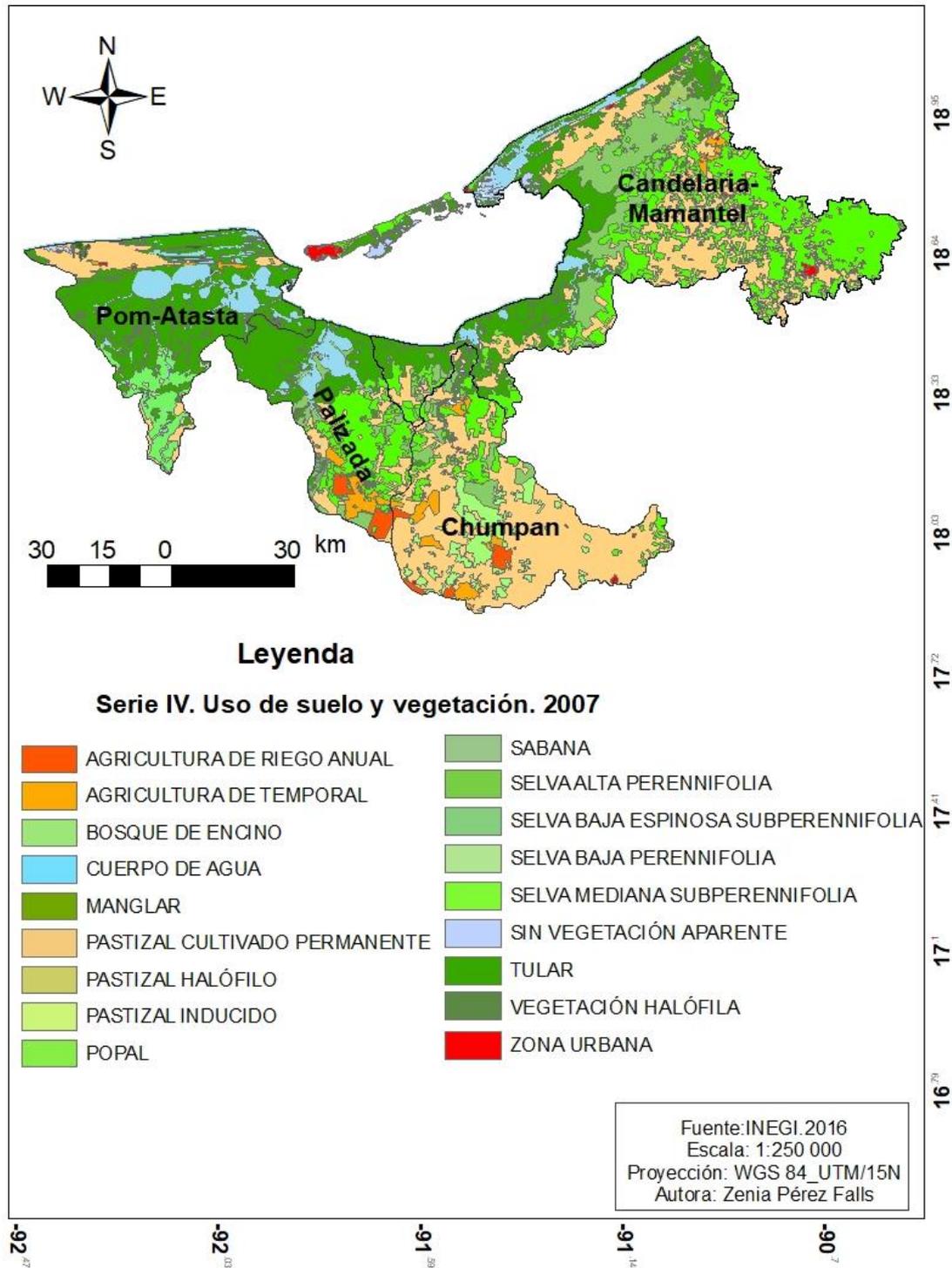
Anexo 12.16. Cambios en el uso del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 1993



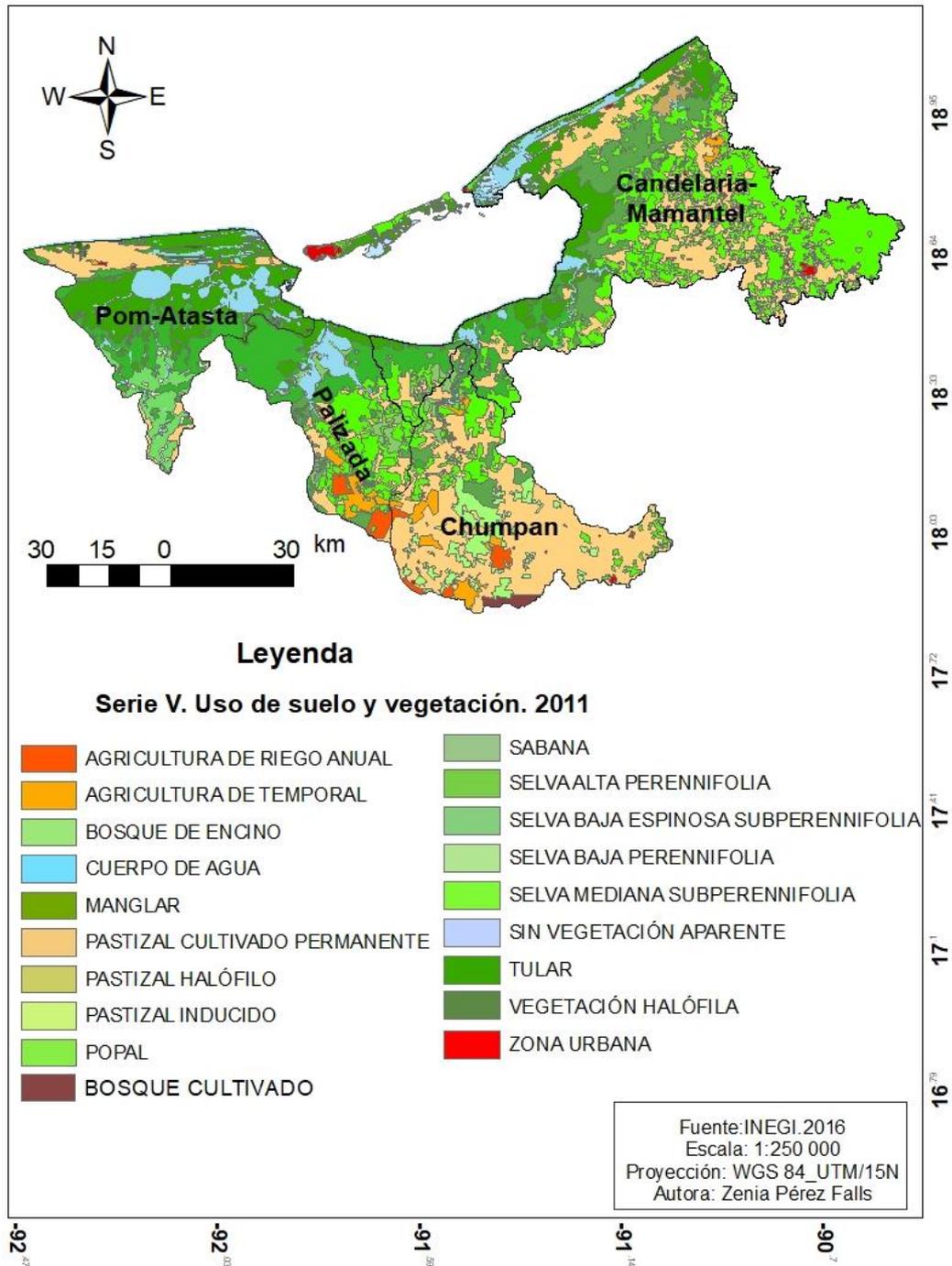
Anexo 12.17. Cambios en el uso del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 2002



Anexo 12.18. Cambios en el uso del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 2007



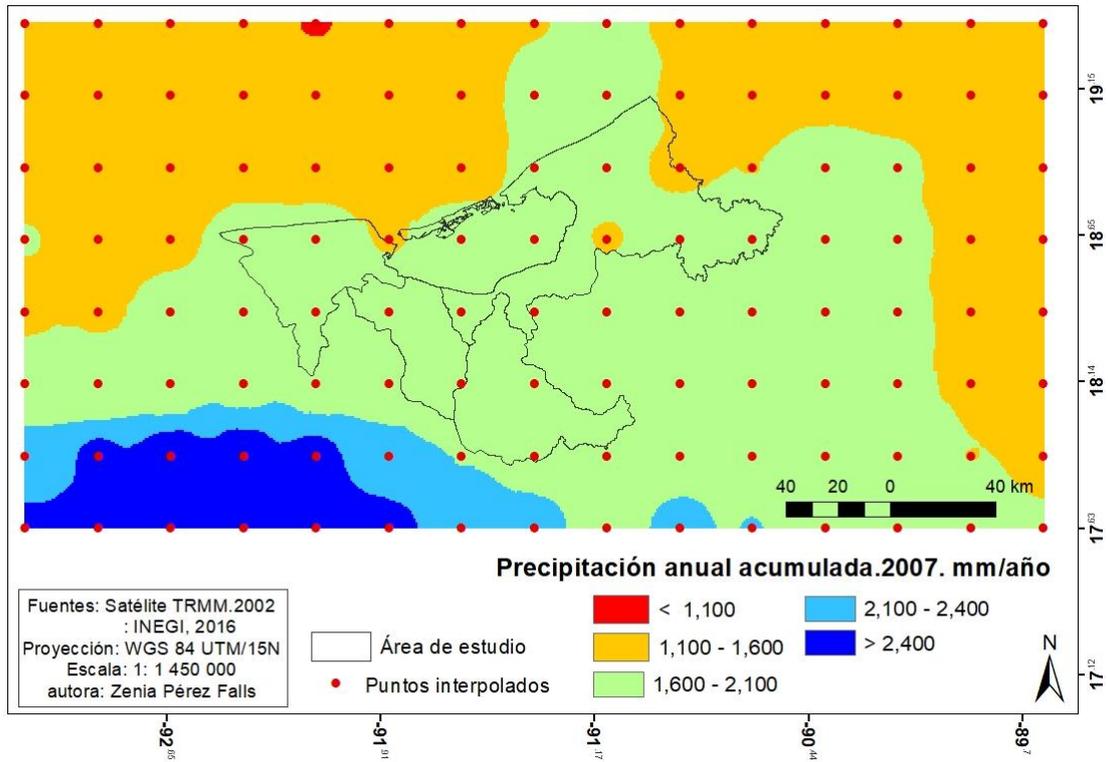
Anexo 12.19. Cambios en el uso del suelo en las subcuencas hidrográficas que descargan directamente en la Laguna de Términos. 2011.



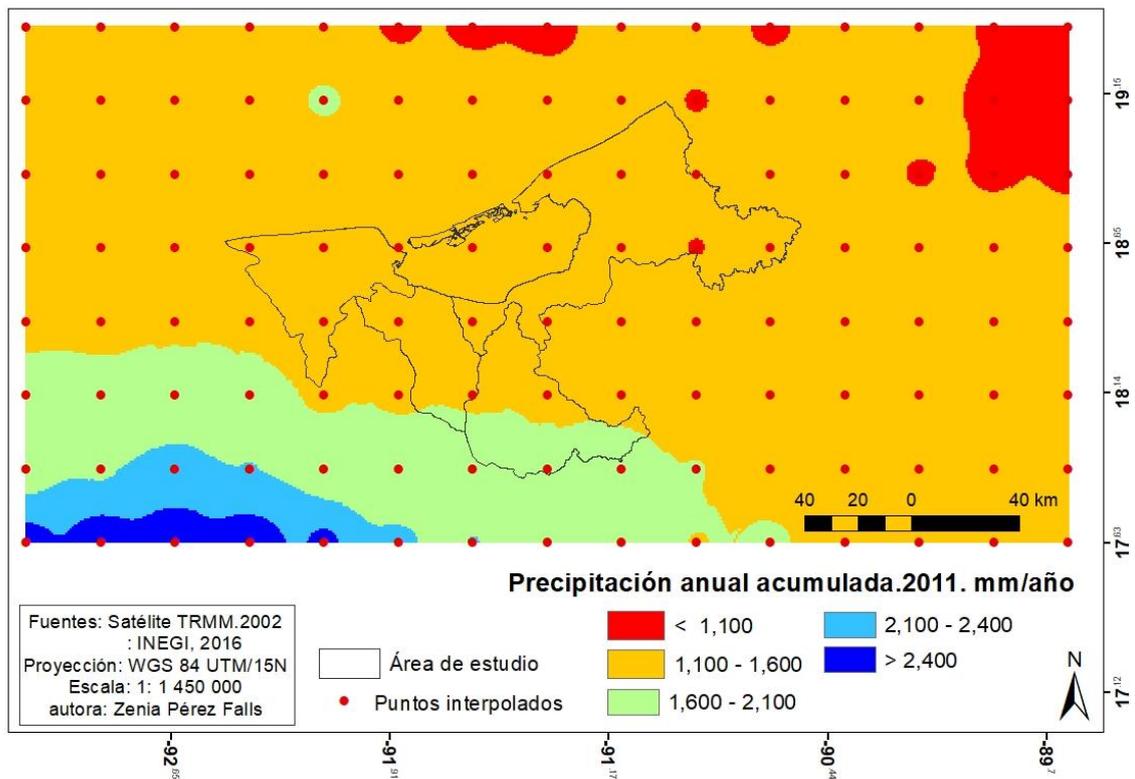
Anexo 12.20. Tabla biofísica para el factor C. Uso de suelo y vegetación

LULC	lucode	usle_c	usle_p	LULC_veg
Selva mediana subcaducifolia	1	0.45	1	1
Pastizal cultivado permanente	2	0.027	1	1
Selva baja espinosa subperennifolia	3	0.5	1	1
Selva mediana subperennifolia	4	0.45	1	1
Tular	5	0.01	1	1
Agricultura de humedad anual	6	0.25	1	1
Asentamientos humanos	7	1	1	0
Agricultura de temporal anual	8	0.25	1	1
Manglar	9	0.05	1	1
Sin vegetación aparente	10	0.9	1	0
Pastizal halófilo	11	0.25	1	1
Cuerpo de agua	12	0.001	1	0
Sabana	13	0.01	1	1
Agricultura de riego anual	14	0.004	1	1
Bosque cultivado	15	0.1	1	1
Vegetación halófila	16	0.85	1	1
Popal	17	0.01	1	1
Selva baja perennifolia	18	0.5	1	1
Selva mediana perennifolia	19	0.45	1	1
Selva alta perennifolia	20	0.45	1	1
Selva de galería	21	0.45	1	1
Bosque de encino	22	0.18	1	1
Pastizal inducido	23	0.027	1	1

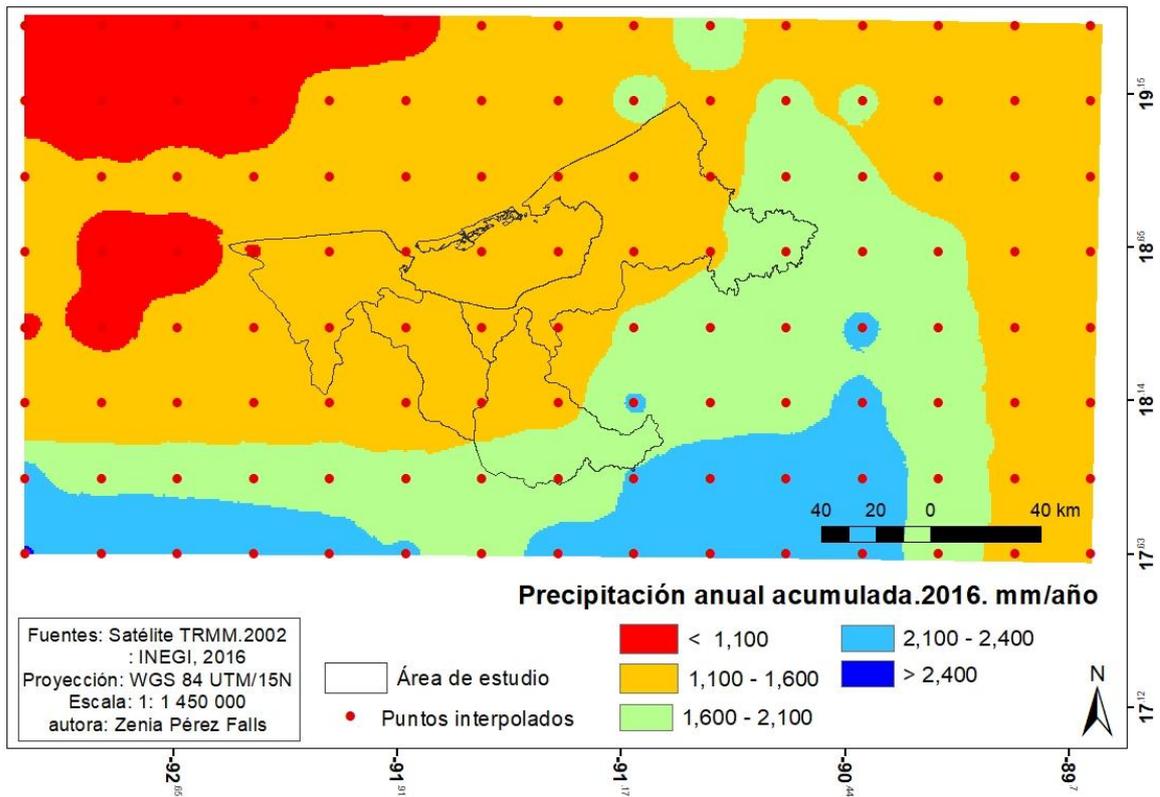
Anexo 12.21. Interpolación de los puntos obtenidos del satélite TRMM. 2007



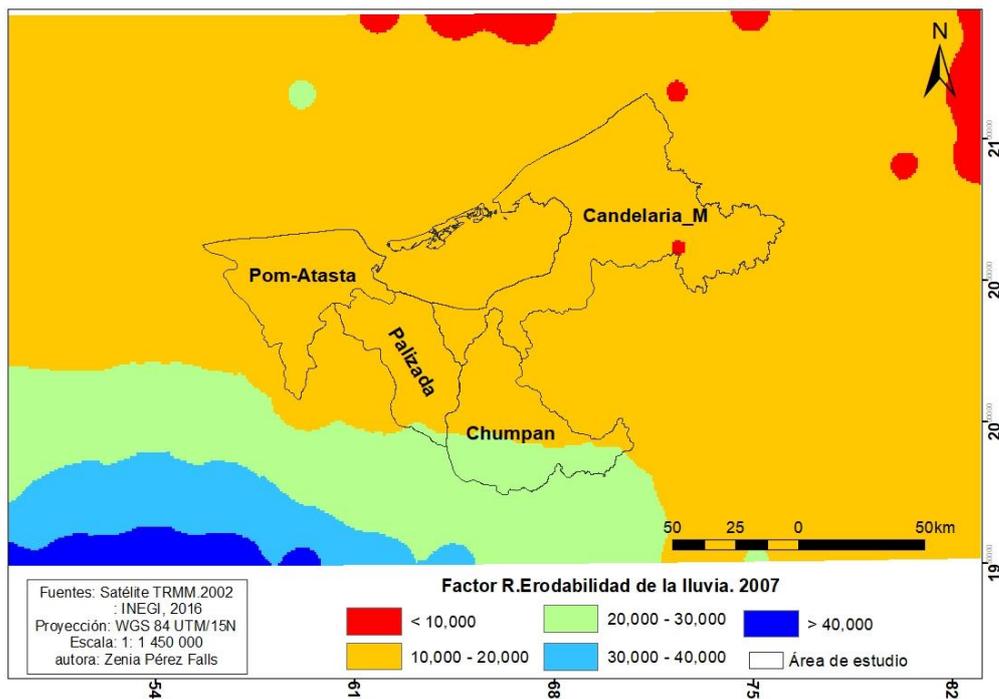
Anexo 12.22. Interpolación de los puntos obtenidos del satélite TRMM. 2011



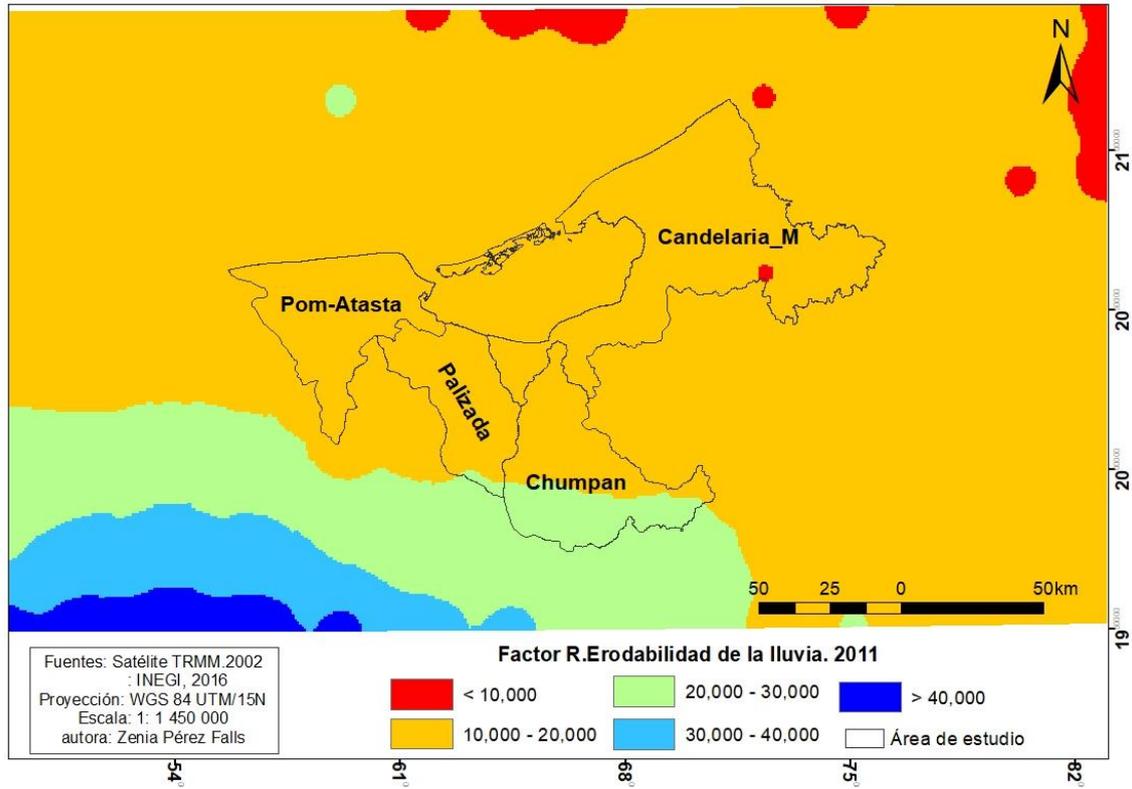
Anexo 12.23. Interpolación de los puntos obtenidos del satélite TRMM. 2016



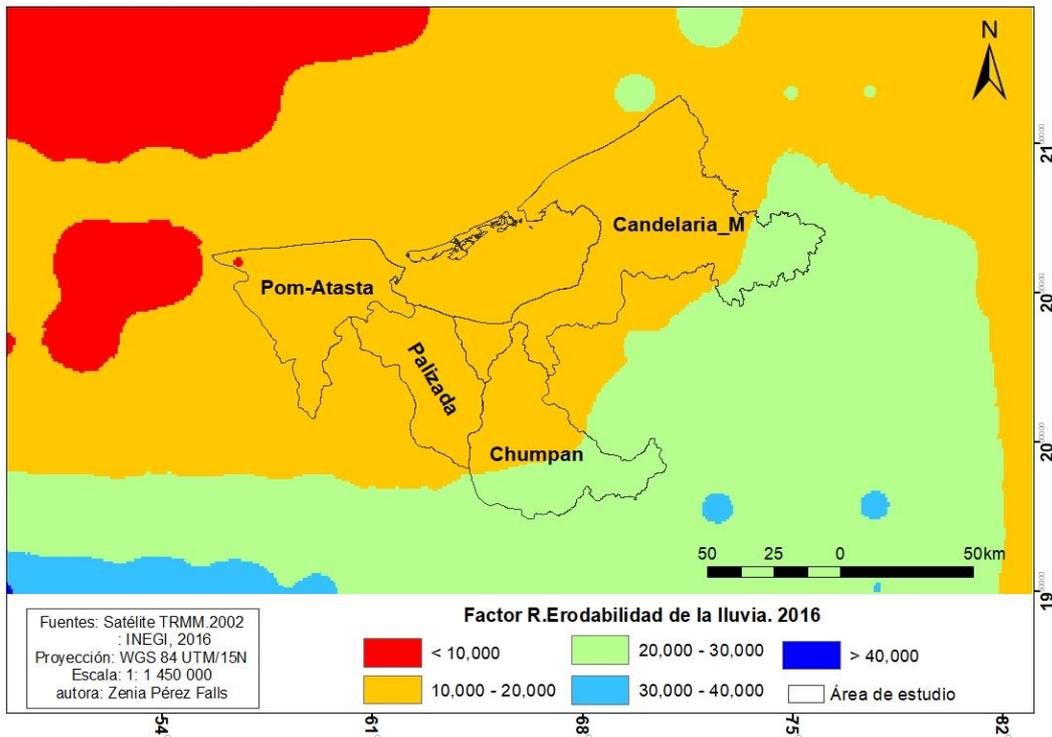
Anexo 12.24. Factor R. Erodabilidad de la lluvia del área de estudio. 2007



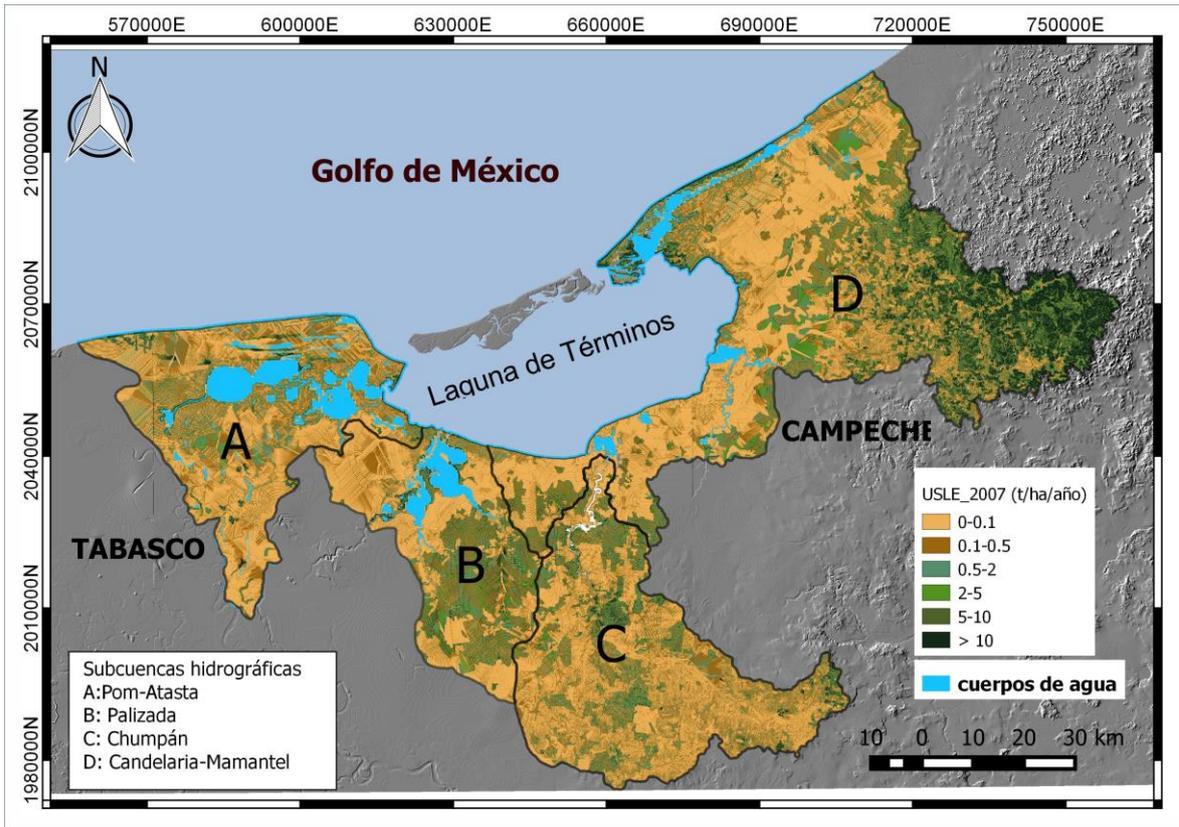
Anexo 12.25. Factor R. Erodabilidad de la lluvia del área de estudio. 2011



Anexo 12.26. Factor R. Erodabilidad de la lluvia del área de estudio. 2016



Anexo 12.27. Erosión hídrica del suelo del área de estudio. 2007



Anexo 12.28. Erosión hídrica del suelo del área de estudio. 2011

