

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**LA GESTIÓN SUSTENTABLE DE LA SEDIMENTACIÓN DE EMBALSES COMO  
ELEMENTO FUNCIONAL DE LOS ECOSISTEMAS RIBEREÑOS**

Opción de titulación  
**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Hidrología Ambiental)

Presenta:  
Olga Segura Jiménez

Dirigido por:  
Enrique González Sosa

Dr. Enrique González Sosa  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Pascal Breil  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en I. Pascual Cristóbal Bernabé  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Mónica Cervantes Jiménez  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

## **AGRADECIMIENTOS**

A México que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) financió y me permitió realizar esta investigación.

A mi director de tesis el Dr. Enrique González Sosa por su enseñanza y apoyo por lo que siempre estaré agradecida.

Gracias a las valiosas enseñanzas de mis sinodales: Dr. Eusebio Jr. Ventura, Dr. Pascal Breil, Dra. Mónica Cervantes Jiménez y el M.I. Pascual Cristóbal Bernabé.

Al Institut National de Recherche en Agriculture, Alimentation et Environnement (INRAE), por la estancia realizada y aportes para la realización de este trabajo.

A mis compañeros de maestría por tener la oportunidad de coincidir en esta vida; Pablo, Bere, Sandy, Tomás ... gracias por la oportunidad de conocerlos.

A mis padres por el apoyo brindado durante todo este proceso, gran parte de este logro es gracias a ustedes.

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	15
2.	ASPECTOS GENERALES .....	21
2.1	Erosión .....	21
2.2	Sedimentación de embalses en México .....	23
2.3	Manejo de sedimentos .....	28
2.4	Consecuencias de la sedimentación en embalses .....	30
2.5	Ecosistemas ribereños .....	33
2.6	Procesos de eutrofización en ríos y liberación de gases de efecto invernadero .....	36
2.7	Concepto de Gestión Sustentable .....	39
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	40
4.	JUSTIFICACIÓN.....	40
5.	MARCO TEÓRICO .....	42
5.1	Morfometría de la cuenca .....	42
5.2	Características Fisiográficas de una cuenca .....	43
5.3	Propiedades generales de los sedimentos .....	48
5.4	La sedimentación en embalses .....	51
5.5	Modelos de erosión laminar.....	53
5.6	Calidad del agua y nutrientes y sus relaciones con los sedimentos.....	55
5.7	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	58
6.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	59
6.1	Objetivo.....	59
6.2	Hipótesis .....	60
7.	METODOLOGÍA .....	60
7.1	Recolección de la información.....	60
7.2	Características generales de la cuenca de estudio.....	62
7.3	Base de datos para volúmenes de escurrimiento y sedimentos en la cuenca del río Balsas .....	65
7.4	Estimación de la erosión laminar de la cuenca .....	67
7.5	Determinación de los diámetros característicos de los sedimentos del río Balsas ..	77
7.7	Análisis de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	79

7.8	Análisis del cambio de la vegetación ribereña aguas arriba del embalse .....	82
7.9	Análisis de nutrientes y materia orgánica aguas arriba y aguas abajo del embalse	83
7.10	Dinámica del cambio de uso de suelo .....	86
7.11	Gestión sustentable de la sedimentación .....	102
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	104
8.1	Parámetros asociados a la cuenca.....	104
8.2	Curva hipsométrica .....	107
8.3	Análisis de la sedimentación con datos batimétricos .....	108
8.4	Análisis de volúmenes de escurrimiento y sedimentos .....	110
8.5	Erosión laminar de la cuenca .....	114
8.6	Dinámica del NDVI.....	119
8.7	Cambio de la vegetación ribereña aguas arriba del embalse.....	126
8.8	Cambio de uso de suelo.....	127
8.9	Nutrientes y materia orgánica.....	129
8.10	Muestreo de sedimentos .....	133
9.	CONCLUSIONES .....	135
10.	REFERENCIAS.....	137
11.	ANEXOS.....	141

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa generalizado del sedimento producido a nivel global .....	16
Figura 2.	El crecimiento en la capacidad de almacenamiento global .....	18
Figura 3.	Estimaciones del volumen total de sedimentos en los grandes embalses del mundo durante el período 1940 hasta 2050.....	18
Figura 4.	Tasas de sedimento para varios países alrededor del mundo.....	19
Figura 5.	Sedimentación actual y futura en la región central del continente americano....	24
Figura 6.	Comparación de capacidad de almacenamiento de los embalses en América Latina.....	25
Figura 7.	Capacidad de almacenamiento per cápita (m <sup>3</sup> /hab).....	26
Figura 8.	Ubicación de las principales presas de la cuenca del río Balsas.....	27
Figura 9.	Zona de mayor acumulación de azolve en el embalse de la P.H. El Caracol ....	28

Figura 10. Estrategias de desvío de sedimentos.....	29
Figura 11. Condiciones de la vegetación ribereña. ....	34
Figura 12. Esquema general de las interacciones entre río y vegetación ribereña.....	35
Figura 13. Procesos de nutrientes clave durante el ciclo de vida de un reservorio.....	38
Figura 14. Funciones de desarrollo sostenible y sedimentos .....	39
Figura 15. Formas de curvas hipsométricas de acuerdo a la fase de la cuenca .....	43
Figura 16. Distribución longitudinal más probable de los sedimentos a lo largo del eje longitudinal de un gran embalse .....	52
Figura 17. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse..	52
Figura 18. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días .....	57
Figura 19. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda química de oxígeno .....	57
Figura 20. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en los sólidos suspendidos totales .....	58
Figura 21. Clasificación de los valores de NDVI.....	59
Figura 22. Volumen de almacenamiento periodo 1986-2018 .....	62
Figura 23. Mapa de ubicación de la cuenca de estudio.....	63
Figura 24. Elevaciones de la cuenca con su red hidrográfica y estaciones hidrométricas de interés de la CFE .....	64
Figura 25. Ubicación de estaciones hidrométricas que se encuentran en las subcuencas .....	65
Figura 26. Mapa de regionalización nacional de factor R.....	68
Figura 30. Mapa espacial del factor R de erosividad de la lluvia en la cuenca .....	70
Figura 28. Mapa del factor K de susceptibilidad del suelo a la erosión en la cuenca .....	72
Figura 29. Factor topográfico LS que involucra el efecto de longitud y grado de pendiente, para la cuenca. ....	74
Figura 30. Mapa del factor C que involucra el tipo de cobertura en la cuenca. ....	76
Figura 31. Multiplicación de los factores para el cálculo de la erosión. ....	77
Figura 32. Acceso a la zona del sitio de muestreo .....	77
Figura 33. Sitio de muestreo de sedimento.....	78
Figura 34. Sección transversal de muestras de sedimento para granulometría .....	79

Figura 35. Dinámica de NDVI para antes y después del embalse de la subcuenca Caracol, periodo 1985-1990.....	80
Figura 36. Dinámica de NDVI para después del embalse de la subcuenca Caracol, periodo 2010 - 2018.....	81
Figura 37. Tramo a la entrada del embalse seccionado a cada 200 metros para evaluar los cambios en la superficie de la vegetación ribereña. ....	82
Figura 38. Tramo aguas arriba del embalse en la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo seccionado a cada 200 metros para evaluar los cambios en la superficie de la vegetación ribereña. ....	83
Figura 39. Sitios de monitoreo de interés aguas arriba y aguas abajo del embalse .....	84
Figura 40. Mapa de la Red Nacional de Monitoreo para aguas superficiales donde se muestran todas las estaciones sobre los ríos principales que miden la Demanda Bioquímica de Oxígeno para el año 2017. ....	85
Figura 41. Cuadro de módulo MOSAIC .....	87
Figura 42. Cuadro de módulo COMPOSITE .....	88
Figura 43. Composición de color natural para el mosaico .....	89
Figura 44. Composición de falso color para el mosaico .....	90
Figura 45. Cuadro del módulo VEGINDEX para el NDVI .....	91
Figura 46. Mosaicos de NDVI para los años 1990 y 2010.....	91
Figura 47. Cuadro del módulo de SEGMENTATION.....	92
Figura 48. Ráster generado para la segmentación del mosaico.....	92
Figura 49. Cuadro del módulo SEGTRAIN.....	93
Figura 50. Clasificación de los mosaicos de 1990 y 2010. ....	94
Figura 51. Cambio de uso de suelo para 1990 y 2010. ....	95
Figura 52. Cuadro del módulo Land Change Modeler.....	96
Figura 53. Pérdidas y ganancias de uso de suelo entre 1990 y 2010 .....	97
Figura 54. Mapa de distancia a carreteras en Terrset.....	98
Figura 55. Mapa de distancia a ríos en Terrset.....	98
Figura 56. Mapa 5TH Spatial tren .....	99
Figura 57. Mapa Evidence likelihood en Terrset .....	100
Figura 58. Cuadro del módulo Run Transition Sub- Model en Terrset.....	101
Figura 59. Mapa de potencial de transición en Terrset.....	101
Figura 60. Curvas hipsométricas para la cuenca y para las subcuencas .....	108

Figura 61. Capacidad de almacenamiento de la presa para los años 1986, 1992, 2011 y 2018. ....	109
Figura 62. Volúmenes en miles de m <sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: a1. Escurrimiento El Frayle; a2. Sedimentos El Frayle; b1. Escurrimiento Ixcamilpa; b2. Sedimentos Ixcamilpa; c1. Escurrimiento Atenango del río; c2. Sedimentos Atenango del río. ....	111
Figura 63. Volúmenes en miles de m <sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: d1. Escurrimiento Papalutla; d2. Sedimentos Papalutla; e1. Escurrimiento San Juan Tetelcingo; e2. Sedimentos San Juan Tetelcingo .....	112
Figura 64. Doble curva masa de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006 .....	113
Figura 65. Mapa de erosión de la subcuenca Atoyac .....	114
Figura 66. Mapa de erosión de la subcuenca Caracol .....	115
Figura 67. Mapa de erosión para condiciones actuales en la cuenca .....	116
Figura 68. Mapa de erosión potencial en la cuenca .....	118
Figura 69. Ubicación tramo #1 aguas arriba del embalse.....	119
Figura 70. Dinámica NDVI tramo #1 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018 .....	119
Figura 71. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #1 aguas arriba del embalse .....	120
Figura 72. Ubicación tramo #2 aguas arriba del embalse.....	120
Figura 73. Dinámica NDVI tramo #2 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018 .....	121
Figura 74. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #2 aguas arriba del embalse .....	121
Figura 75. Ubicación tramo #1 aguas abajo del embalse. ....	122
Figura 76 Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #1 aguas abajo del embalse .....	122
Figura 77. Dinámica NDVI tramo #1 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018.....	123
Figura 78. Ubicación tramo #2 aguas abajo del embalse. ....	123
Figura 79. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #2 aguas abajo del embalse .....	124
Figura 80. Dinámica NDVI tramo #2 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018.....	124
Figura 81. Resumen de las áreas de la vegetación ribereña a la entrada del embalse para diferentes años .....	126

Figura 82. Resumen de las áreas de la vegetación ribereña en el tramo de San Juan Tetelcingo para diferentes años.....	126
Figura 83. Probable crecimiento de la zona urbana en la cuenca para el año 2025.....	127
Figura 84. Demanda Bioquímica de Oxígeno aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019.....	129
Figura 85. Demanda Química de Oxígeno aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019.....	130
Figura 86. Sólidos Suspendidos Totales aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019 .....	130
Figura 87. Oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019 .....	131
Figura 88. Niveles de nitratos aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019 .....	131
Figura 89. Niveles de fosfatos aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019 .....	132
Figura 90. Curvas Granulométricas escala Phi para las 3 muestras de sedimentos tomadas en la sección aguas arriba del embalse.....	133
Figura 91. Mapa de erosión de la subcuenca Amacuzac .....	141
Figura 92. Mapa de erosión de la subcuenca Balsas .....	142
Figura 93. Mapa de erosión de la subcuenca Mixteco .....	142
Figura 94. Mapa de erosión de la subcuenca Nexapa .....	143
Figura 95. Mapa de erosión de la subcuenca Tlapanuco .....	144
Figura 96. Ubicación tramo #3 aguas arriba del embalse.....	144
Figura 97. Dinámica NDVI tramo #3 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018 .....	145
Figura 98. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #3 aguas arriba del embalse .....	145
Figura 99. Ubicación tramo #4 aguas arriba del embalse .....	146
Figura 100. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #4 aguas arriba del embalse .....	146
Figura 101. Dinámica NDVI tramo #4 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018 ....	147
Figura 102. Ubicación tramo #3 aguas abajo del embalse .....	147
Figura 103. Dinámica NDVI tramo #3 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018.....	148



Figura 104. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #3 aguas abajo del embalse .....	148
Figura 105. Crecimiento de algas resultantes de eutrofización .....	149
Figura 106. Orilla del río Balsas visto desde la canastilla donde se tomó la muestra B/3 .....	149
Figura 107. Tramo del río Balsas aguas arriba del embalse donde se tomó la muestra 2B/3 .....	150
Figura 108. Muestras obtenidas de sedimentos de la sección aguas arriba del embalse .....	151

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de una cuenca de acuerdo al área .....	44
Tabla 2. Características de las partículas sedimentarias .....	49
Tabla 3. Clasificación de los sedimentos por tamaño propuesto por Wentworth (1922) ...	51
Tabla 4. Ejemplos de modelos de erosión de suelo .....	54
Tabla 5. Ejemplos de fuentes de sedimentos y contaminantes de las cuencas fluviales ..	55
Tabla 6. Descripción de información vectorial y ráster utilizados .....	61
Tabla 7. Batimetrías P.H. El Caracol.....	61
Tabla 8. Información de las estaciones hidrométricas de la CFE .....	67
Tabla 9. Ecuaciones regionalizadas para la república .....	69
Tabla 10. Factor K para los tipos de suelo dentro de la cuenca.....	71
Tabla 11. Valores de C según el Uso de Suelo y Vegetación para la cuenca .....	75
Tabla 12. Porcentaje de superficie de cambio de NDVI, periodo 1985-1990.....	80
Tabla 13. Porcentaje de superficie de cambio de NDVI, periodo 2010 -2018.....	81
Tabla 14. Información descargada en archivo Excel de parámetros indicadores de degradación ambiental.....	85
Tabla 15. Características de las imágenes satelitales utilizadas .....	86
Tabla 16. Bandas para composición de color natural.....	88
Tabla 17. Bandas para composición de falso color .....	89
Tabla 18. Colores asignados para identificar cada uso de suelo en SEGTRAIN.....	93
Tabla 19. Superficie de la cuenca para el año 1990.....	95

Tabla 20. Superficie de la cuenca para el año 2010.....	95
Tabla 21. Parámetros morfométricos generales.....	105
Tabla 22. Parámetros asociados a la forma de la cuenca .....	105
Tabla 23. Parámetros asociados a la forma del relieve .....	106
Tabla 24. Parámetros asociados a la red de drenaje .....	106
Tabla 25. Erosión específica de acuerdo con los datos batimétricos .....	108
Tabla 26. Pérdida de capacidad de almacenamiento de la presa en porcentaje, 1986-2018. ....	109
Tabla 27. Rangos de clasificación de la erosión hídrica de toda la cuenca.....	116
Tabla 28. Simbología por colores de los usos de suelo en la cuenca .....	128
Tabla 29. Superficie de uso de suelo para los años 1990, 2010 y 2025.....	128

## INDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 Factor de forma de Horton.....	45
Ec. 2 Coeficiente de compacidad o Gravelius.....	45
Ec. 3 Relación de elongación.....	45
Ec. 4 Densidad de drenaje.....	46
Ec. 5 Coeficiente de torrencialidad.....	46
Ec. 6 Relación de bifurcación.....	47
Ec. 7 Tiempo de concentración (Kirpich).....	47
Ec. 8 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	58
Ec. 9 Ecuación de pérdida de suelo .....	67
Ec. 10 Factor C.....	72
Ec. 11 Exponente de la longitud de pendiente .....	73
Ec. 12 Factor L .....	73
Ec. 13 Factor S.....	73

## RESUMEN

La presencia de embalses, sin importar su tamaño, modifica el funcionamiento hidrológico de las cuencas, provocando alteraciones en el ambiente entre ellos la sedimentación, lo que a su vez reduce su vida útil inutilizándola para la generación de energía eléctrica y control de inundaciones. El conjunto de estas presas para la generación de energía eléctrica construido sobre el río Balsas, segundo sistema hidroeléctrico más grande de México. Por tal motivo, es importante tomar en cuenta los impactos del clima y los cambios de uso de suelo en los procesos hidrológicos y la sedimentación. Dentro de la cuenca del río Balsas se encuentra la Presa Hidroeléctrica “El Caracol” formalmente llamada Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa ubicada en el cauce del Río en la parte media del río y la proximidad del municipio de Apaxtla, Guerrero. Fue puesta en operación en 1986 y cuenta con una central hidroeléctrica que tiene capacidad de generar 600 mega watts de energía eléctrica. El objetivo del trabajo es estudiar la dinámica que interviene en los procesos de escurrimiento, erosión y sedimentación en la Presa “El Caracol” y su cuenca asociada a la Región Hidrológica 18, a partir de los datos históricos de 20 años de volúmenes de escurrimiento y de sedimentos y análisis de imágenes satelitales. Mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y datos de estaciones hidrométricas se buscan las correlaciones que permitan comprobar que el comportamiento de la erosión y escurrimiento se ve reflejado en las mediciones directas de sedimentos a través de una serie de batimetrías entre 1986 y 2018. Así mismo, identificar su correlación con los cambios de uso de suelo de acuerdo con el análisis de imágenes satelitales para el periodo 1990 y 2010, ya que la proporción de cambios de uso del suelo indican un aumento de vegetación perturbada, y una disminución de los suelos conservados, ocasionando un aumento significativo de la erosión-sedimentación y por ende una pérdida de capacidad de almacenamiento del PH Caracol de más del 70%, síntoma de una posible desaparición del embalse. De acuerdo con el análisis de la doble curva masa de cinco estaciones hidrométricas, se observa que a partir del año 1992 el material de lavado en

suspensión tiende a disminuir con el paso de los años. La comparación entre el RUSLE y los registros de sedimentos, sugieren una erosión severa; Si esta tendencia continua no solo afectará la generación de energía eléctrica, sino también impactará en los ecosistemas ribereños. En este contexto de erosión y sedimentación una primera idea sobre las consecuencias en los ecosistemas ribereños tanto de aguas arriba como aguas abajo es investigar los efectos mediante el mapeo de la dinámica del NDVI e identificar las zonas afectadas tanto por la migración de la vegetación como la erosión de las márgenes. No obstante que la presencia del embalse genera cambios en el régimen de escurrimientos aguas abajo del embalse, una parte de este trabajo es identificar cuáles son elementos que justifican su sustentabilidad mediante los procesos erosión - sedimentación en la cuenca. Los problemas de la sedimentación crecen mientras que los embalses de hoy envejecen y los enfoques tradicionales de la gestión de los sedimentos no han considerado un uso sustentable. En cualquier sitio donde se intente alcanzar un manejo sustentable de los sedimentos a largo plazo, será necesario gestionar tanto los sedimentos como el agua.

**Palabras clave:** sedimentos, erosión, NDVI, vegetación ribereña

## ABSTRACT

The presence of reservoirs, regardless of their size, modifies the hydrological functioning of the basins, causing alterations in the environment among them sedimentation, which in turn reduces its useful life by rendering it useless for the generation of electrical energy and flood control. The set of these dams for the generation of electrical energy built on the Balsas River, the second largest hydroelectric system in Mexico. For this reason, it is important to take into account climate impacts and changes in land use in hydrological processes and sedimentation. Within the Balsas river basin is the "El Caracol" Hydroelectric Dam formally called Carlos Ramírez Ulloa Engineer Dam located in the riverbed in the middle part of the river and near the municipality of Apaxtla, Guerrero. It was put into operation in 1986 and has a hydroelectric power plant that has the capacity to generate 600 megawatts of electricity. The objective of the work is to study the dynamics that intervene in the processes of runoff, erosion and sedimentation in the "El Caracol" Dam and its associated basin to Hydrological Region 18, based on the historical data of 20 years of runoff volumes and of sediments and satellite image analysis. Through the Universal Equation of Soil Loss and hydrometric station data, correlations are sought to verify that erosion and runoff behavior is reflected in direct sediment measurements through an 8 series of bathymetries between 1986 and 2018. Likewise, identify its correlation with the changes in land use according to the analysis of satellite images for the period 1990 and 2010, since the proportion of changes in land use indicate an increase in disturbed vegetation, and a decrease in conserved soils, causing a significant increase in erosion-sedimentation and therefore a loss of storage capacity of PH Caracol of more than 70%, symptom of a possible disappearance of the reservoir. According to the analysis of the double mass curve of five hydrometric stations, it is observed that from 1992 the suspension washing material tends to decrease over the years. The comparison between RUSLE and sediment records suggests severe erosion; If this trend continues, it will not only affect the generation of electricity, but will also impact riverine ecosystems.

In this context of erosion and sedimentation, a first idea about the consequences in the riverside ecosystems of both upstream and downstream is to investigate the effects by mapping the dynamics of the NDVI and identify the areas affected by both the migration of the vegetation and the erosion of the margins. Although the presence of the reservoir generates changes in the runoff regime downstream of the reservoir, a part of this work is to identify which are elements that justify its sustainability through erosion - sedimentation processes in the basin. Sedimentation problems grow as today's reservoirs age and traditional approaches to sediment management have not considered sustainable use. Wherever long-term sustainable sediment management is pursued, it will be necessary to manage both sediment and water.

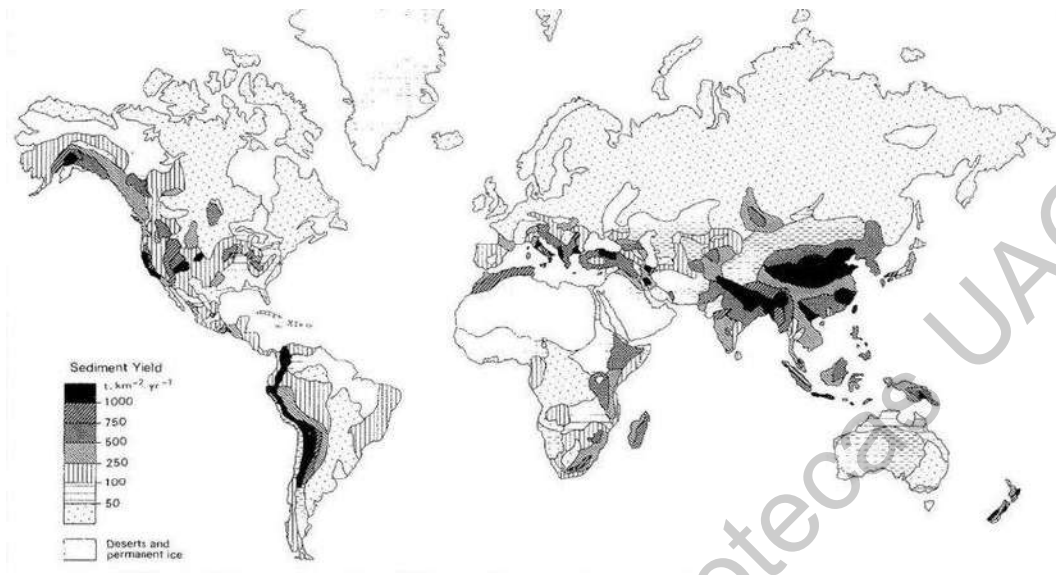
**Key words:** sediments, erosion, NDVI, riparian vegetation

## 1. INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos ha sido un tema de interés en la hidráulica desde los inicios de la humanidad. Civilizaciones como los egipcios y mesopotámicos se desarrollaron en sitios cercanos a ríos para facilitar el acceso al agua, en el caso de los egipcios con el Nilo y los mesopotámicos con el Tigris y el Éufrates. La necesidad de controlar las avenidas sobre sus territorios llevó a que desarrollaran teorías del comportamiento del agua y de los componentes que transporta una corriente como lo son los sedimentos. Desde los antiguos egipcios se comenzó a gestionar la deposición de sedimentos en las llanuras de inundación para proporcionar nutrientes a sus cultivos. (Guarín Corredor, 2014)

En muchas cuencas fluviales, los problemas relacionados con los sedimentos se ven afectados por la influencia de los embalses y las obras hidráulicas. La combinación de la captura de sedimentos y la regulación del flujo tiene un gran impacto en la ecología, el equilibrio de sedimentos, la cantidad de nutrientes y la morfología de una cuenca. (UNESCO, 2017)

En la Figura 1 se muestra el mapa con ocho zonas de producción de sedimentos diferentes con las unidades de toneladas por kilómetro cuadrado por año ( $t / km^2 \cdot año$ ). El rango de producción de sedimentos comienza en Desiertos y Hielo Permanente hasta 1000 ( $t / km^2 \cdot año$ ) y hacia arriba. No se especificó el límite superior, por lo que se asumió que el valor superior era 3000 ( $t / km^2 \cdot año$ ) (Basson, 2018)



**Figura 1. Mapa generalizado del sedimento producido a nivel global (Basson, 2018)**

A pesar de que no toda la sedimentación causa problemas y no todos los sedimentos son retenidos en los embalses. Los embalses existentes pierden entre el 0,5 y el 1,0 por ciento de su almacenamiento anual y, en promedio se estima una retención de 2000 millones de m<sup>3</sup> para embalse con 35 de años de antigüedad; ya se han utilizado las mejores presas y el aumento anual del almacenamiento no equilibra ni equilibrará la pérdida anual por sedimentación. Las pérdidas por sedimentación o capacidad muerta de las hidroeléctricas, representan el 6% de la inversión 1000 billones de dólares para su vida útil. En las hidroeléctricas el remplazo del de nuevas capacidades (viva y muerta) por nuevas presas representa una inversión 1700 billones de dólares. (International Commission on Large Dams, 2009)

Los grandes ríos transfieren sedimentos a través de miles de kilómetros, desde su nacimiento generalmente en las zonas montañosas, hasta su descarga al mar. Algunas veces atraviesan continentes y pueden tardar cientos, a miles de años en su viaje hacia la desembocadura. Del sedimento que se transporta por los grandes ríos hacia los océanos, de 80 a 90% son de arena fina en suspensión y del 10 a 20% es arena gruesa transportada en el fondo. Algunas cantidades más grandes



de sedimentos que se han llegado a acumular en la desembocadura de ríos en forma de abanico o delta son: el delta del río Amazonas con un área de 467,078 km<sup>2</sup>, el del Misisipi es con 28,568 km<sup>2</sup>, del Río Grijalva en México es de 17,028 km<sup>2</sup>, la del río Nilo es de 12,512 km<sup>2</sup>. (Espinosa Ayala, 2016)

El escurrimiento per cápita entre 1990 y 2050 para México pasará de 4424 a 2211 m<sup>3</sup>, en tanto para Brasil de 46 809 a 26291 m<sup>3</sup> a causa del crecimiento de la población. En cuanto a la sedimentación, de los 7000 Km<sup>3</sup> que son almacenados (incluye presas de 15 m de altura) 3000 Km<sup>3</sup> corresponde a la capacidad muerta de los embalses dedicados a la generación de energía eléctrica. De los 4000 Km<sup>3</sup> restantes 1000 Km<sup>3</sup> son dedicados a la agricultura, para agua potable, la industria y multiusos. (Engelman & Leroy, 1994)

La construcción de presas es una estrategia de larga duración para reducir la variabilidad espacial temporal del suministro de agua natural. Al regular el flujo de agua, las presas alteran el hidrograma natural para asegurar una fuente confiable de agua para una amplia variedad de necesidades humanas y ambientales como suministro de agua, producción de energía eléctrica, control de inundaciones, riego entre otros. Sin embargo, la presencia de embalses rompe el equilibrio erosión-sedimentación de los ríos y de los ecosistemas ribereños. Esto sucede cuando la interrupción del paso del río con la construcción de una presa rompe el equilibrio entre la erosión y la sedimentación, lo que aumenta los niveles de agua y a menudo causa desbordamiento. (Ehsani Nima, 2017)

La presencia de una presa provoca sedimentación en el embalse aguas arriba y dicha retención de sedimentos puede ejercer una importante influencia en la reducción del transporte de sedimentos aguas abajo. Muchos ríos alrededor del mundo han proporcionado evidencia de la disminución de los sedimentos debido a la construcción de una presa. (Des E., 2012)

En términos del crecimiento del almacenamiento acumulado por las grandes presas incluidas en el registro de la Comisión Internacional de Grandes Presas la Figura 2 indica que la construcción de presas tuvo un bajo impacto antes de 1950. Sin embargo, gracias a la construcción de presas después de los años sesenta, se

dio como resultado un rápido incremento en la capacidad de almacenamiento del yacimiento. (International Commission on Large Dams, 2009)

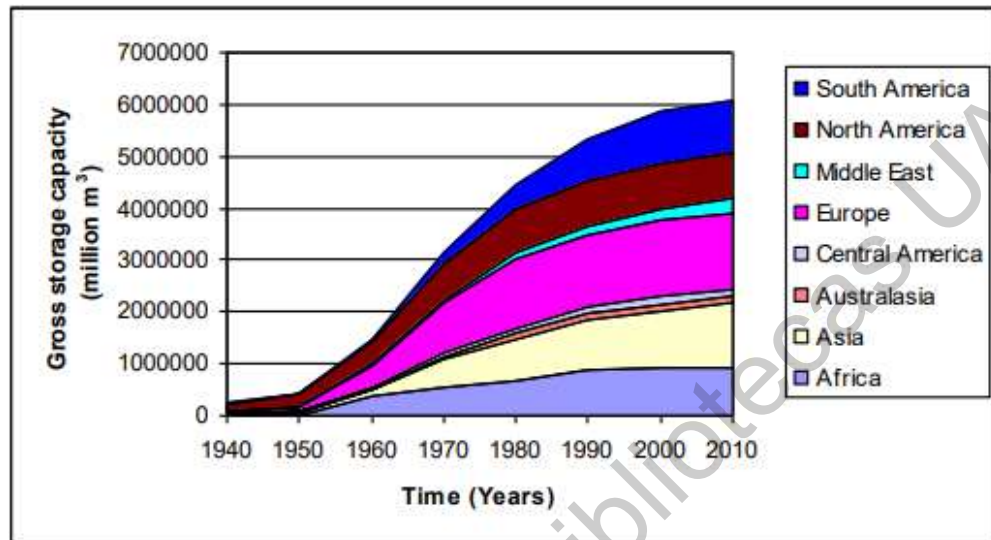


Figura 2. El crecimiento en la capacidad de almacenamiento global (ICOLD, 2009)

La Figura 3 indica que para 2050 hasta dos tercios de la capacidad de almacenamiento original de las presas del mundo podrían haberse perdido debido a los sedimentos depositados en su interior.

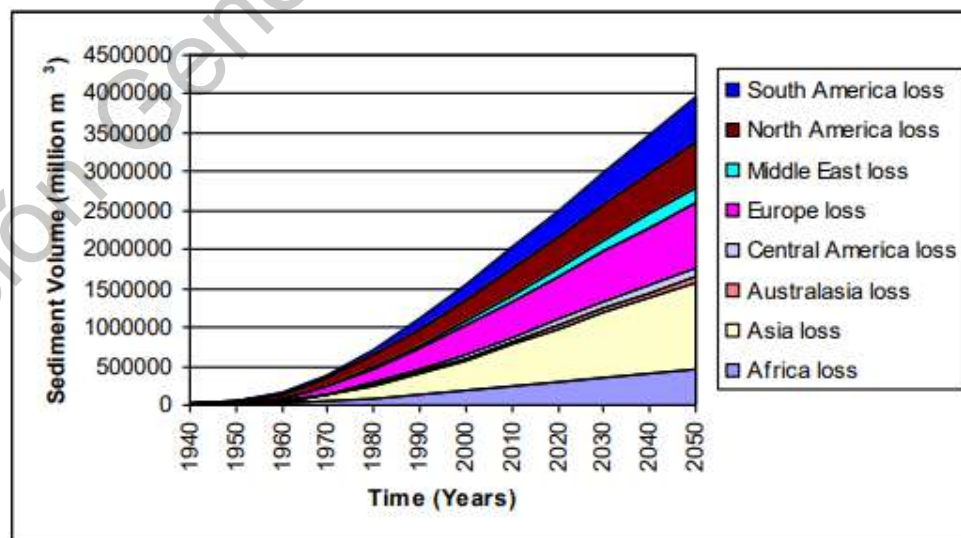


Figura 3. Estimaciones del volumen total de sedimentos en los grandes embalses del mundo durante el período 1940 hasta 2050 (ICOLD,2009)

Cada presa tiene una "eficiencia de trampa" única. Esto se refiere a la proporción del sedimento que fluye hacia la presa que queda atrapada detrás de ella. La mayoría de las grandes presas tienen eficiencias de trampa cercanas al 100%, aunque algunas presas en las que la relación de capacidad - escorrentía media anual es muy baja podrían tener eficiencias de trampa inferiores al 20%. La tasa a la que los depósitos pierden capacidad debido a la sedimentación generalmente se expresa como un porcentaje de la capacidad de almacenamiento inicial perdida por año. Por ejemplo, si una presa se está sedimentando a una tasa de 0.6% / año, esto significa que cuando el reservorio tenga 50 años, se perderá aproximadamente el 30% de la capacidad de almacenamiento inicial de la presa. (UNESCO, 2017)

La sedimentación de reservorios se produce en todo el mundo a una tasa promedio de alrededor del 0,9 por ciento anual (Figura 4). Aunque en muchos países como Asia los valores son mayores, México se encuentra dentro del promedio anual. (ICOLD,2009)

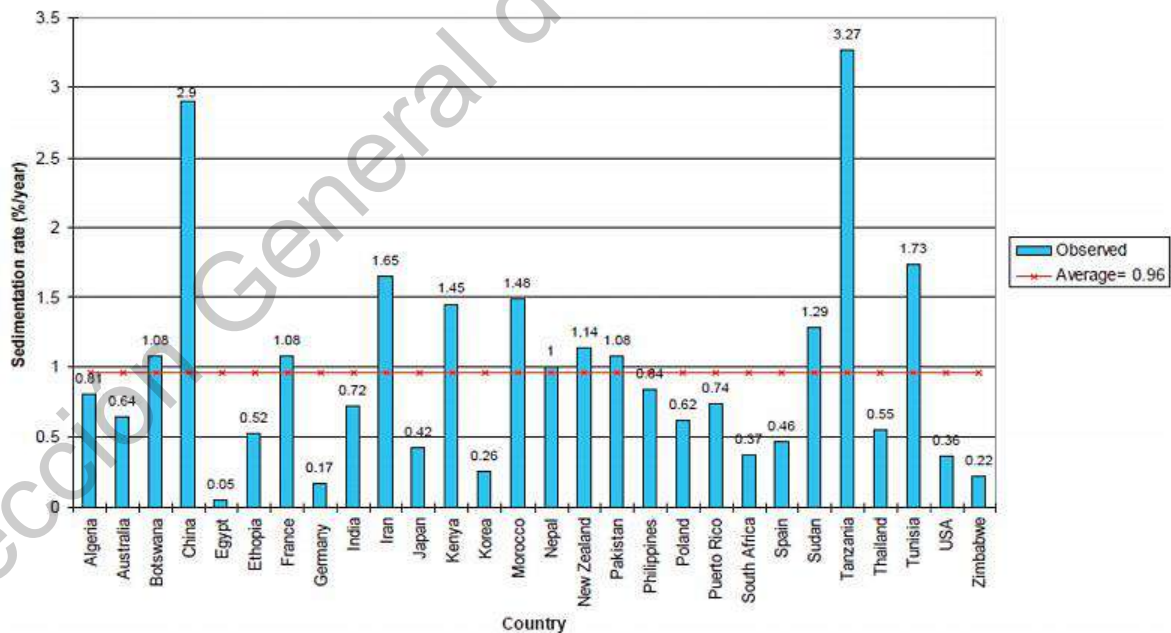


Figura 4. Tasas de sedimento para varios países alrededor del mundo (ICOLD, 2009)

Los problemas de sedimentación debido al aumento de la población humana (resultando en cambios de uso de suelo y aumento de consumo de agua), el aumento de estructuras hidráulicas, así como la importancia de los nutrientes y contaminantes a través del transporte de sedimento ha implicado un desafío técnico y ambiental con relación al manejo de los sedimentos. Debido a esto la sedimentación de los embalses debe abordarse como un recurso natural sustentable para garantizar los beneficios del embalse para el cual son construidos. La sustentabilidad en términos de la sedimentación incluye: reducción de la carga de sedimentos, trayecto del depósito, remoción, estimar volumen de depósito o volumen muerto, y sitios para la remoción de sedimentos. (Flores Sotomayor, 2016)

Existe una creciente preocupación en todo el mundo por la creciente tasa de deterioro de los entornos naturales de los ríos. La manipulación de los regímenes de caudal como resultado de las presas, ha sido un factor importante que afecta la condición de los ríos, con un reconocimiento emergente de los problemas ambientales y sociales más amplios. La erosión de las orillas del río Nilo ha sido controlada en parte por el crecimiento de la vegetación natural. Lo mismo para Bear Creek, EE.UU., aguas abajo del lago Bear Creek. El ancho aumentó solo en 0,5 m durante un período de 15 años, lo que acreditaron al crecimiento de vegetación ribereña. (International Commission on Large Dams, 2009)

Las perturbaciones que se producen en la vegetación tanto aguas arriba como aguas debajo de un embalse debido a la alteración del flujo natural de un río por una presa, se pueden analizar por diferentes métodos para medir en índice de vegetación con técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. (Bid, 2016)

## 2. ASPECTOS GENERALES

### 2.1 Erosión

La erosión del suelo se da a través de un proceso de tres etapas: desprendimiento, transporte y deposición.

La erosión comienza con el desprendimiento de las partículas del suelo causado por el impacto de la gota de lluvia o el arrastre del agua. Estas partículas desprendidas son transportadas por el flujo de agua depositándose cuando la velocidad del agua disminuye por efecto de la pendiente, cobertura del suelo o por alguna obstrucción. Si la pendiente es demasiado pronunciada no permite la acumulación de sedimentos, en cambio sí es reducida disminuye la velocidad de la corriente. El tamaño de las partículas transportadas es directamente proporcional a la velocidad del agua, mientras que la deposición está relacionada con la concentración y densidad del tamaño de los sedimentos. (Lal, 2001)

La intensidad de la lluvia y el volumen de escurrimiento son los principales determinantes de la erosión. Sin embargo, la principal causa de erosión en pendientes pronunciadas o en áreas con escasa cobertura vegetal, es el flujo concentrado y las capacidades de transporte el cual determina la tasa de erosión del flujo concentrado. (Hajigholizadeh, Melesse, & Fuentes, 2018)

Si se toman en cuenta las pendientes fuertes junto con precipitaciones torrenciales dentro de la cuenca, se generan grandes avenidas en tiempos muy cortos, que junto con la deforestación provoca erosión y transporte de sedimentos considerable. Esta erosión trae consigo impactos ambientales, como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico, degradación de la cubierta vegetal, pérdida de biodiversidad, disminución de la vida útil de las obras hidráulicas, sedimentos en el lecho de los ríos y desestabilización de laderas, que ponen en riesgo a personas, viviendas e infraestructura. (Valencia Vargas, 2015)

Muchos estudios han reportado que las intervenciones humanas como medidas de conservación de suelos, los cambios en la temperatura y precipitación desempeñan un papel importante en las reducciones de escorrentía y la carga de sedimentos en los tramos medios del río (Gao, Mu, Wang, & Li, 2011). Por otro lado, la deforestación, desertificación y urbanización provocan un aumento de las inundaciones, mayor ocurrencia de sequías y la degradación de suelo relacionada con la erosión hídrica. El aumento en la temperatura del aire provoca un aumento en el vapor de agua en la atmósfera alterando la ocurrencia e intensidad de la precipitación, esto debido a que la erosión del suelo se da principalmente por el resultado de eventos de precipitación extremos en un tiempo corto. Estos cambios en la intensidad de la precipitación influyen también en el proceso de erosión del suelo. Por tal motivo, es importante tomar en cuenta los impactos del clima y los cambios de uso de suelo en los procesos hidrológicos y el rendimiento de sedimento. (Depeng, y otros, 2016)

Dentro del corredor del río, las fuentes adicionales de sedimentos incluyen:

- Erosión de las orillas del canal por la migración del canal lateral (aquí definido como parte del canal del río ya que marca el límite del canal del río y se encuentra dentro de su llanura de inundación)
- Erosión de los depósitos de la llanura aluvial (por caudales sobre la ribera durante las inundaciones)
- Resuspensión del sedimento del lecho del canal (de grano fino y grueso) debido a cambios en las condiciones del flujo
- Erosión de acantilados y áreas costeras (especialmente relevante en las partes bajas de la cuenca del río)

Además, las fuentes de sedimentos relativamente recientes debido a actividades antropogénicas se pueden dar por minas geológicas, sitios de construcción, red de carreteras urbanas, material mineral y orgánico de fuentes puntuales como de

residuos mineros y sólidos de obras de tratamiento de aguas residuales y descargas puntuales industriales. (Taylor, Owens, Batalla, & Garcia, 2008)

En México existen una enorme cantidad de ríos con dimensiones y características hidrológicas diferentes. La erosión del suelo se presenta de manera natural tanto en las cuencas como en los cauces de los ríos, esto debido al impacto de la gota de lluvia y el escurrimiento que ocurre posteriormente. Aunado a esto, las actividades antrópicas han acelerado los procesos erosivos al modificar la cobertura del suelo. Como consecuencia, en los cauces de los ríos se incrementa el transporte de sedimentos, estos materiales vienen de la cuenca o de los márgenes de los ríos y al aumentar la velocidad los escurrimientos o después de un evento fuerte de precipitación, la corriente los arrastra aguas abajo depositando los materiales en lugares donde la misma corriente ya no puede seguir transportándolos. Este transporte de sedimentos muchas veces es la causa de desastres naturales. (Sánchez Jiménez, 2007)

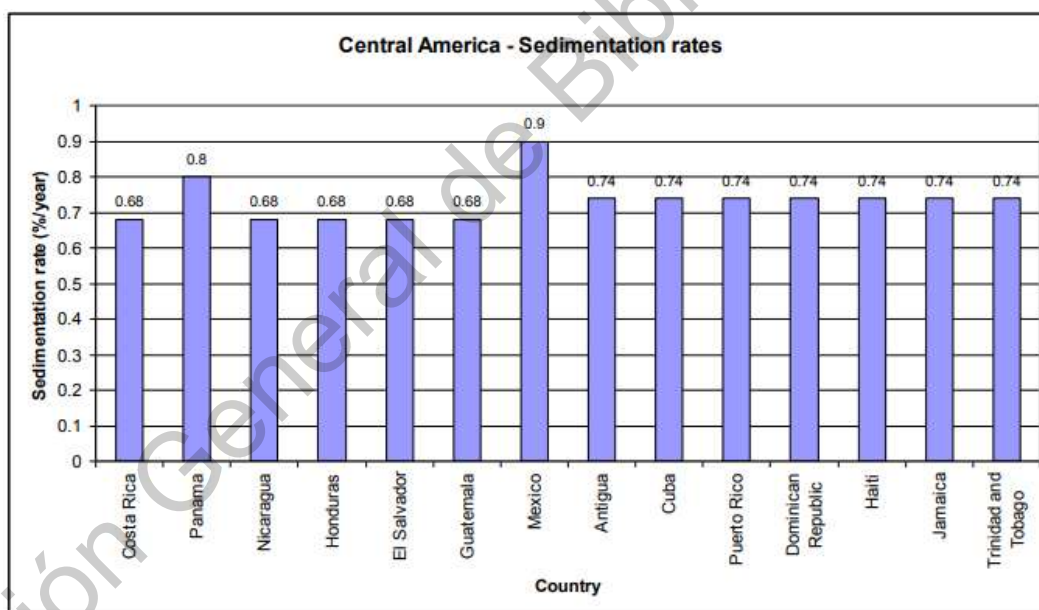
## **2.2 Sedimentación de embalses en México**

Debido al desarrollo a mediados del siglo XX en México, se propuso que el camino más viable para mejorar las condiciones de los espacios rurales era con la infraestructura hidroeléctrica para el aprovechamiento de las cuencas.

La pérdida de la capacidad de almacenamiento es uno de los muchos problemas relacionados con la sedimentación. Entre 0.5 y 1 por ciento de la capacidad total de almacenamiento de los grandes embalses en el mundo se pierde anualmente debido a la sedimentación. El número de embalses inhabilitados por la pérdida total de capacidad de almacenamiento aumenta continuamente, debido a esto y a la escasez de sitios para la construcción de nuevas presas, así como el impacto ecológico que generan, la rehabilitación de embalses azolvados y el control de la sedimentación han recibido importante atención en años recientes. (Domínguez, 2019)

La operación de embalses de almacenamiento se ve impactada severamente para el tiempo en que la mitad del volumen se ha sedimentado, pero otros problemas severos pueden aparecer cuando tan sólo un pequeño porcentaje del almacenamiento se ha perdido.

Los embalses se construyen para ayudar a la población a controlar su entorno y generar bienestar a través del almacenamiento de agua, generación de energía, control de inundaciones entre otras actividades. Pero el abastecimiento de agua y otros beneficios que se derivan de los embalses no representan un recurso renovable a menos que se controle la sedimentación, ya que como puede observarse en la Figura 5, el problema de la sedimentación es severo comparado con otros países.



**Figura 5. Sedimentación actual y futura en la región central del continente americano (ICOLD, 2009)**

Gracia Sánchez advierte que a medida que envejecen los embalses, donde la mayoría son de los años 50 ó 60, se acentúa el problema de sedimentación y al mismo tiempo la capacidad de almacenamiento se ve reducida. La mayoría de los



embalses están diseñados para una vida de 100 años, pero algunos llegan a acumular el suficiente sedimento para reducir su vida útil hasta 50 años.

En la Figura 6 se observa que México comparado con otros países latinoamericanos la pérdida de capacidad de almacenamiento de los embalses es mayor. Se observa que para el año 2050 podría perder más del 40 % de su vida útil, esto en menos de 50 años.

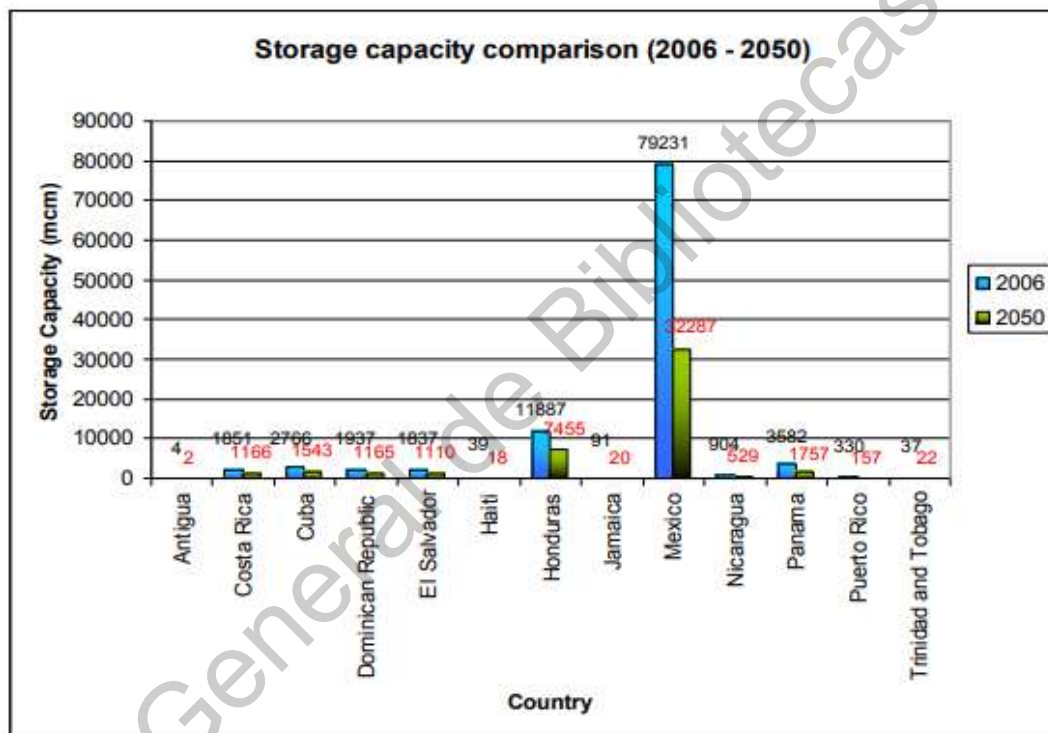


Figura 6. Comparación de capacidad de almacenamiento de los embalses en América Latina (ICOLD, 2009)

Existen más de 5 mil presas y bordos en México, algunas de las cuales se clasifican como grandes presas, de acuerdo con la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas. Se tiene un registro incompleto de los bordos, a la fecha se realizan esfuerzos para registrar estas pequeñas obras de almacenamiento, en su mayoría de terracería. La capacidad de almacenamiento de las presas del país es de aproximadamente 150 mil hm<sup>3</sup>. Un indicador que permite su valoración es la capacidad de almacenamiento per cápita. Cabe destacar que,

de acuerdo a FAO, México ocupa el lugar número 35 a nivel mundial en capacidad de almacenamiento per cápita. En la Figura 7 se muestran los últimos datos disponibles por país. (Comisión Nacional del Agua, 2018)



Figura 7. Capacidad de almacenamiento per cápita (m³/hab) (CONAGUA,2018)

El conjunto de presas para la generación de energía construido sobre el río Balsas representa el segundo sistema hidroeléctrico más grande de México (Figura 8), inmediatamente después del sistema construido sobre los ríos Grijalva-Usumacinta en el sureste, integrado por las presas El Infiernillo (1965), La Villita (1968) y El Caracol (1987) y el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007)



**Figura 8. Ubicación de las principales presas de la cuenca del río Balsas (CONAGUA 2017)**

En la presa hidroeléctrica “El Caracol” se comparó el estudio de pronóstico de sedimentación contra la capacidad calculada a partir del levantamiento batimétrico. Según la encuesta batimétrica de 1986-1992, el embalse perdió el 12,2% de la capacidad original, por lo que continuar en 30 años podría perder hasta el 60% de la capacidad útil. (González Sosa & Torres Osuna, 1994)

De acuerdo con los estudios topo batimétricos de la P.H. El Caracol para el año 2018, en la Figura 9 se muestra la zona que presenta mayor azolve es la que se localiza frente al poblado Viejo Balsas hasta el lugar conocido como La Parota, incluso ya se observa la presencia de acumulación de residuos. Cabe señalar que al centro de esta zona se encuentra el cerro Santa Rosa que sirve como muro de retención. (Comisión Federal de Electricidad, 2018)



**Figura 9. Zona de mayor acumulación de azolve en el embalse de la P.H. El Caracol (CFE, 2018)**

En el caso de los llanos deltaicos del río Balsas en México, la construcción de las centrales hidroeléctricas El Infiernillo y La Villita en 1964 y 1973, respectivamente, provocó una marcada regresión del delta, así como varios cambios morfodinámicos en las zonas ribereñas y costeras. Los cambios más significativos en la regresión del delta, con tasas regresivas máximas de  $-20.5 \text{ m / año}$ , ocurrieron durante la etapa de caudales controlados entre 1963 y 1974, debido al cierre de embalses. (Ortiz Pérez, Hernández Santana, & Figueroa Mah Eng, 2017)

### **2.3 Manejo de sedimentos**

La construcción de embalses, requiere que los sitios cuenten con características hidrológicas, geológicas, topográficas y geográficas únicas, y los embalses existentes generalmente han ocupado los mejores sitios disponibles. Debido a los altos costos y múltiples problemas asociados con la remoción y disposición de sedimentos en una escala masiva, la sedimentación de embalses grandes es en gran medida un proceso irreversible. Si se pretende que las generaciones futuras

se beneficien de los servicios esenciales provistos por los embalses será en gran parte gracias a la preservación y utilización continua de los embalses existentes, no a la continua explotación del inventario de nuevos sitios potenciales que continúa reduciéndose. El abastecimiento de agua y otros beneficios derivados de los embalses no constituyen un recurso renovable a menos que se controle la sedimentación.

El uso sustentable se alcanza aplicando las siguientes estrategias utilizadas globalmente para el manejo de sedimentos. (Montañez Guillén, 2017; Flores Sotomayor, 2016)

#### 1. Reducción del aporte de sedimentos aguas arriba

Considera las cuencas tributarias de los embalses y el control sobre el aporte de sedimentos con el fin de reducir la entrada de sedimentos al embalse. El aporte de sedimentos se puede reducir mediante técnicas como control de erosión de la cuenca desde la superficie del yacimiento, control de erosión en el canal y retención de sedimentos erosionados aguas arriba.

#### 2. Desvío de sedimentos.

El desvío de sedimentos consiste en que una parte o la totalidad de la carga de sedimentos entrante puede ser desviada hidráulicamente evitando su acumulación en el embalse con técnicas como el vaciado del embalse en épocas de avenidas cargadas con sedimentos, depósitos laterales, bypass de sedimentos y desfogue de las corrientes de densidad (Figura 10).

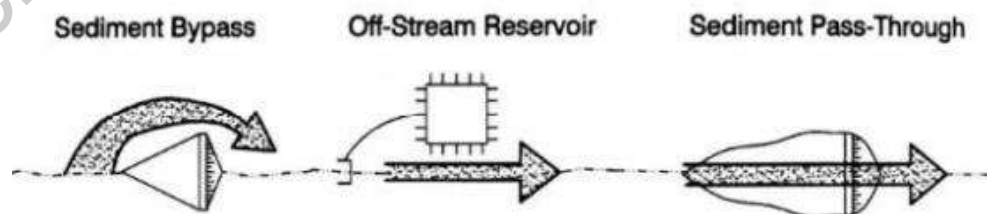


Figura 10. Estrategias de desvío de sedimentos (Morris&Fan, 1998)

El desvío de los sedimentos puede ser visto como la técnica para la gestión de sedimentos más amigable con el ambiente, pero una de las principales desventajas de esta estrategia es la pérdida de una cantidad significativa de agua durante las inundaciones para transportar la carga de sedimentos.

### 3. Remoción de sedimentos.

La remoción de depósitos de sedimentos y lavado de sedimentos comprende las técnicas que permiten remover los sedimentos acumulados en el embalse. Los sedimentos depositados pueden ser removidos periódicamente mediante flushing, dragado hidráulico o excavación en seco. Estos métodos son ampliamente utilizados a nivel global para reducir la acumulación de sedimentos y recuperar la capacidad de almacenamiento del embalse. Una de las principales limitaciones son que se tiene que vaciar el embalse en su totalidad.

### 4. Estrategias de adaptación

Esta categoría comprende las estrategias para combatir los impactos de la sedimentación que no implican el manejo o manipulación de sedimentos como: reasignar el almacenamiento y mejorar la eficiencia operativa, aumentar el almacenamiento elevando la presa o construyendo otra presa más alta aguas abajo, desmantelar la presa cuando los costos de operación sean mayores a los beneficios económicos y sociales.

## **2.4 Consecuencias de la sedimentación en embalses**

### 2.4.1 Consecuencias aguas arriba

Un amplio rango de consecuencias puede ocurrir aguas arriba de las presas debido a la captación de sedimentos. (Flores Sotomayor, 2016)

#### 1. Pérdida de almacenamiento.

La deposición del sedimento en el embalse reducirá la capacidad de almacenamiento útil de la presa, perdiendo la funcionalidad por la cual fue construido inicialmente.

## 2. Deposición del delta.

La formación de los deltas agota la capacidad de almacenamiento de los embalses y puede provocar la sobre elevación del fondo extendiéndose kilómetros aguas arriba del embalse. Al incrementar la vegetación en las áreas de los deltas aguas arriba del embalse los niveles de inundación podrían incrementar debido a que la vegetación provoca que se atrapen más sedimentos.

## 3. Peligro en zonas de temblores

Los depósitos de sedimentos tienen una masa mayor que el agua, y algunas investigaciones sugieren que la presencia de sedimento recargado en la presa incrementa significativamente la fuerza de un temblor contra la estructura.

## 4. Pérdida de energía.

La pérdida de almacenamiento elimina el potencial de capturar altos flujos para la generación de energía eléctrica. Cuando una serie de plantas hidroeléctricas se construyen a lo largo de un río, la descarga de una estación puede estar en la zona del delta de otro embalse aguas abajo.

## 5. Tomas y desagües.

Los sedimentos pueden bloquear u obstruir las obras de toma o desagües en las cotas inferiores de la presa y obstruir o dañar las compuertas que no estén diseñadas para el paso de sedimentos.

## 6. Ecología.

Los cambios en la carga sedimentológica y la acumulación de sedimento en el embalse pueden alterar dramáticamente la ecología del embalse, afectando a las

especies, la composición y tanto a la pesca recreativa como la pesca como medio de sustento. En áreas donde la sedimentación continúe sin disminución, los ecosistemas acuáticos se transformarán en humedales y eventualmente en mesetas debido a la continua deposición del sedimento arriba de la elevación normal del embalse en épocas de inundación. Una gran fracción de los componentes orgánicos, nutrientes y contaminantes ocurren en forma de partículas, o es absorbida por arcillas, y la deposición de los sedimentos orgánicos puede jugar un rol muy importante en el presupuesto de oxígeno del embalse.

#### 2.4.2 Consecuencias aguas abajo

Los tramos aguas abajo de la presa sufren impactos ambientales debido a la reducción del flujo, a la reducción del suministro de sedimentos que sirve como material de fondo, la dinámica alterada de los nutrientes, cambios en la temperatura, y al obstáculo que representa la presa a la migración de especies. Los caudales reducidos aguas abajo de una presa generalmente también reducirán la frecuencia de las inundaciones sobre la ribera, pero al mismo tiempo, el canal principal puede experimentar períodos más largos de mínimos bajos. El agua en el cauce del río aguas debajo de la presa tiende a erosionar el fondo provocando acorazamiento y volviéndolo inapropiado para hábitat de especies nativas. Los niveles de sólidos suspendidos en muchos ríos se han incrementado dramáticamente debido a la deforestación y a las zonas urbanas aguas arriba, sin embargo, la captación de sedimentos en los embalses puede beneficiar a los sistemas acuáticos que son sensibles a estos sólidos. (Flores Sotomayor, 2016)

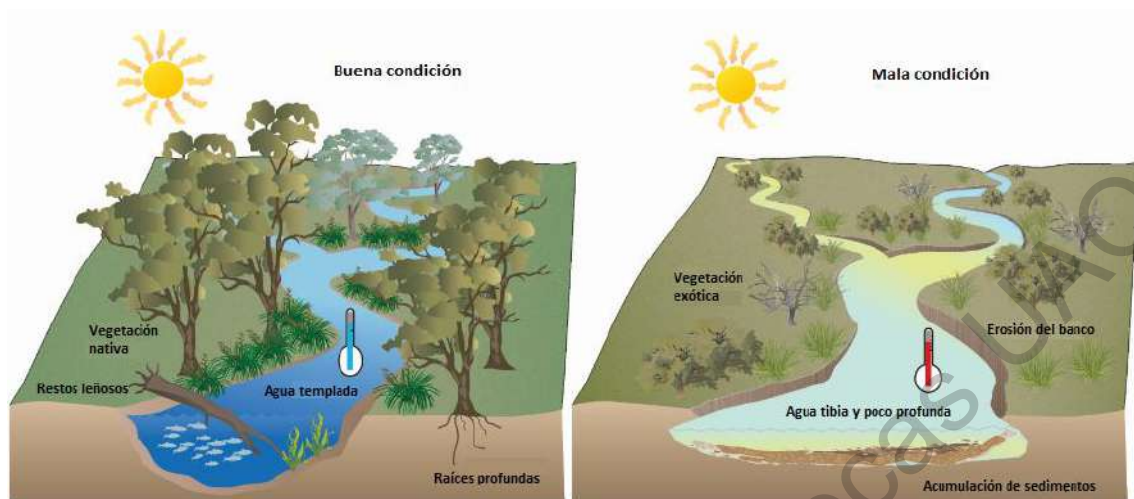
Dado que las cargas de nutrientes aguas abajo se ven afectadas por los cambios aguas arriba, las estrategias de gestión que se centran en reducir la limitación de Nitrógeno la limitación de Fósforo en los sistemas de agua dulce pueden dañar inadvertidamente las zonas costeras. Además, la gestión de nutrientes centrada en la costa que se centra únicamente en la reducción de las cargas de Nitrógeno puede resultar ineficaz en ríos con grandes represas, debido a la eliminación preferencial de Fosforo sobre Nitrógeno en los embalses (Maavara, y otros, 2020).



## 2.5 Ecosistemas ribereños

Dentro de las zonas ribereñas, los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos interactúan generando un paisaje dinámico que está sujeto a la energía del flujo, siendo esta energía igual a la energía de la corriente. Las raíces de las plantas afectan las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo dando como resultado la resistencia a la erosión de los bancos, por lo tanto, la vegetación ribereña afecta el campo de flujo, los procesos de movilización, transporte y deposición de los sedimentos. Los flujos de agua, sedimentos minerales y la materia orgánica son los impulsores fundamentales de la morfodinámica de estas zonas, a través de la transferencia asociada de organismos y nutrientes. (Camporeale, Perucca, Ridolfi, & Gurnell, 2013)

La vegetación afecta a cada elemento básico del sistema morfodinámico, modifica el campo de flujo y su estructura turbulenta. En los ríos serpenteantes, la vegetación tiende a desarrollarse preferentemente en el interior de las curvas de meandros y también pueden establecerse en sedimentos desnudos expuestos o depositados por procesos de erosión y deposición fluvial. Un efecto positivo de la vegetación es que las raíces de la vegetación pueden modificar la resistencia del material del banco y soportar fuerzas de tensión, esto provoca una reducción en la velocidad del flujo produciendo una disminución en la erosión. (Alldredge & Moore, 2012)



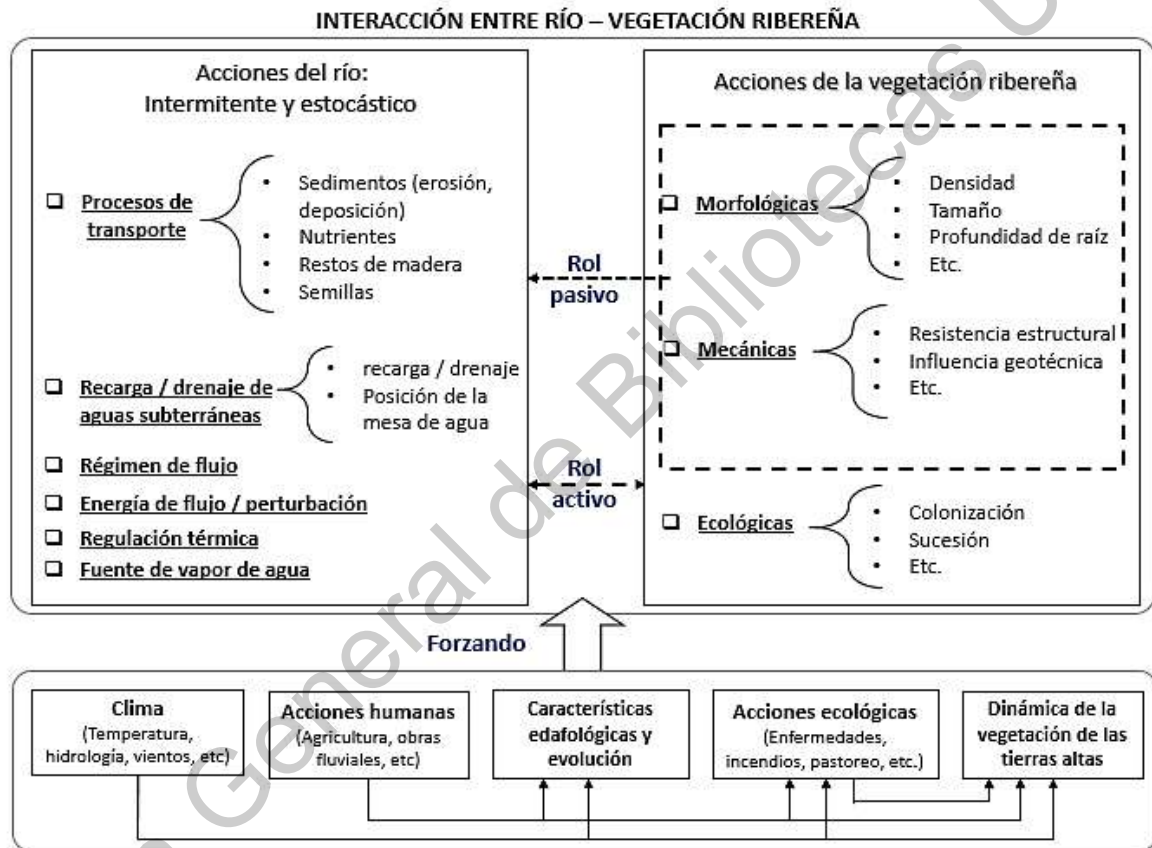
**Figura 11. Condiciones de la vegetación ribereña. (University of Maryland Center for Environmental Science, 2020)**

En la Figura 11 se muestran las diferentes condiciones de la vegetación ribereña. Del lado izquierdo se muestra una buena vegetación la cual contraerá y profundizará el canal, grandes restos leñosos proporcionan hábitat y las raíces profundas ayudan a mantener la estructura del banco reduciendo la erosión. Del lado derecho se muestra vegetación pobre el cual hará el canal más ancho y menos profundo, sin grandes restos leñosos perdiendo hábitat y vegetación aumentando la inestabilidad del canal y la erosión. (University of Maryland Center for Environmental Science, 2020)

Cualquier modificación en el balance de sedimentos influye en la distribución de la vegetación a lo largo de un río. Se ha observado que la construcción de un embalse impacta la vegetación ribereña en gran medida al reducir el transporte de sedimentos y nutrientes, tanto en términos de estrechamiento / ensanchamiento como de biomasa total. La resistencia de la vegetación en condiciones previas y posteriores a la presa es diferente, ya que la vegetación cambia. Si se produce un estrechamiento de la vegetación, el nivel de agua correspondiente a la descarga máxima aumenta con respecto a las condiciones previas a la presa, ya que la vegetación se ha movido hacia el centro del canal. El estrechamiento a menudo va

acompañado de un aumento en la biomasa y, por lo tanto, un aumento en el número de tallos por área unitaria, que ofrece resistencia al flujo adicional. (Tealdi , Camporeale, & Ridolfi, 2010)

La Figura 12 resume las principales interacciones río-vegetación dentro de la zona ribereña y algunas de sus características clave.



**Figura 12. Esquema general de las interacciones entre río y vegetación ribereña (Modificada de Camporeale, Perucca, Ridolfi, & Gurnell, 2013)**

Los ríos poseen un gran valor ambiental debido a su influencia sobre otros ecosistemas, sin embargo, en México más del 70% de los ríos muestran algún tipo de deterioro. En 2014 se propuso que en la formulación de la nueva ley general de aguas se considerara la regulación de la vegetación ribereña, debido a su influencia en la rehabilitación del estado ecológico de los ríos. Se sugiere que en esta nueva

ley contenga una sección de protección a la vegetación ribereña como elemento clave para la restauración de los ríos. Además, se debe tomar en cuenta que la vegetación se apegue a las condiciones naturales del cauce y que la reforestación sea de especies nativas de cada región. (Mendoza Cariño, y otros, 2014)

## **2.6 Procesos de eutrofización en ríos y liberación de gases de efecto invernadero**

El problema ambiental de origen antropogénico que se presenta con mayor frecuencia en los cuerpos de agua es la eutrofización. Esta alteración se describe como la sobre fertilización de los sistemas acuáticos con nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y/o materia orgánica, originando un descenso en la calidad del agua lo que limita su uso. La alta disponibilidad de nutrientes en aguas iluminadas ocasiona crecimientos rápidos y masivos de algas, lo que tiene efectos negativos en los ecosistemas estimulando la liberación de gases de efecto invernadero. El agua tiende a tornarse de color verde o café formando capas espesas de algas que al dar sombra limitan el crecimiento de otras plantas que viven en el fondo. Las algas que se produce en los sistemas eutrofizados mueren en poco tiempo y son degradadas por bacterias, este proceso consume oxígeno de forma proporcional a la cantidad de materia orgánica producida. Cuando la falta de oxígeno se extiende a todo el cuerpo de agua se dice que un sistema alcanza una “eutrofización crítica” al rebasar la capacidad del sistema para reponer su oxígeno. Al agotarse este oxígeno se vuelve más lenta la degradación de la materia orgánica, por lo que entran en acción otros oxidantes como nitratos y sulfatos. (Merino Ibarra, Valdespino, Monroy Ríos, & Ramírez Zierold, 2014)

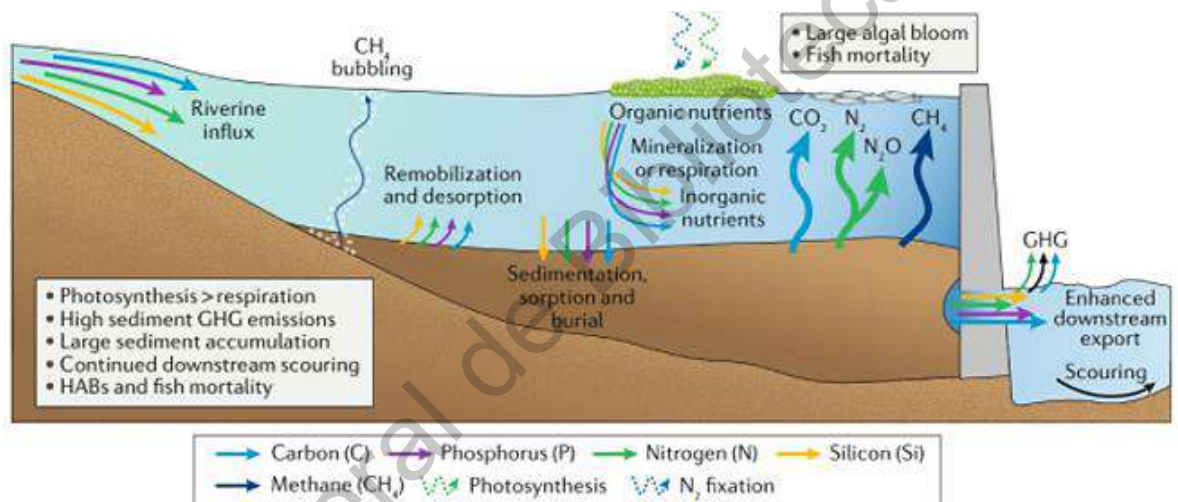
En México al igual que en el resto del mundo, los problemas de eutrofización aumentaron durante el siglo XX como resultado directo del crecimiento poblacional y de las actividades agrícolas. El incremento en las actividades agrícolas, urbanas e industriales durante el último siglo ha superado la velocidad de liberación de nitrógeno y fósforo por causas naturales, incrementando de manera excesiva estos

elementos lo que amenaza la calidad del agua y la integridad biótica de estos ecosistemas. Conforme aumenta la población, más alimentos se necesitan para abastecerla, por lo que se espera una intensificación de las actividades agrícolas para proveer esos alimentos, lo ocasionará una mayor carga de nutrientes a los ecosistemas acuáticos. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2020)

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales es un problema ambiental importante en todo el mundo, en México más del 70% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación. Muchos de los ríos del país están gravemente afectados, como el río Balsas, uno de los ríos más importantes de México debido a la extensión de su cuenca (6% del territorio nacional). Dentro de la región hidrológica de Balsas se encuentra la cuenca del Alto Atoyac donde se encuentra el río Atoyac, uno de los ríos más contaminados de México. Basado en la contaminación orgánica y bacteriológica detectada del río Atoyac así como las condiciones anóxicas de las aguas superficiales, el río presenta un alto grado de deterioro (Pérez Castresana, y otros, 2018)

La energía hidroeléctrica se ha promovido como una fuente de energía sostenible durante décadas, proporcionando una alternativa a los combustibles fósiles. Sin embargo, los gases de efecto invernadero a menudo se emiten desde los reservorios durante la eliminación de nutrientes a través del metabolismo que impulsa los flujos difusivos desde la superficie del reservorio y la ebullición o burbujeo de los sedimentos del reservorio. Para muchos sistemas fluviales represados, la eutrofización en curso está impulsando los embalses hacia una mayor autotrofia, ya que el aumento de las concentraciones de nutrientes permite a las comunidades planctónicas aumentar la fotosíntesis en relación con la respiración. La consecuencia de este cambio de productividad es un mayor secuestro de carbono a través del entierro en sedimentos de reservorios. Los embalses pueden ser fuentes notables de gases invernaderos en los años posteriores a la construcción de la presa (Figura 13). La descomposición del suelo inundado y la materia orgánica de la biomasa impulsa las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>

durante más de una década después del embalse, y está influenciada por la edad del embalse, el área de superficie, la masa de OC inundado y la temperatura. De manera similar, las oscilaciones en los niveles de agua estacionales pueden contribuir a un aumento de las emisiones a través de ciclos repetidos de humectación y secado. El N y el P se han enriquecido a nivel mundial debido al uso de fertilizantes agrícolas y la descarga de aguas residuales. (Maavara, y otros, 2020)



**Figura 13. Procesos de nutrientes clave durante el ciclo de vida de un reservorio. Dinámica simplificada de C (azul, con metano en flechas azul oscuro), N (verde), P (violeta) y Si (amarillo). (Maavara, 2020)**

La calidad del agua es un atributo que se define en función del uso que se le asigna (por ejemplo, como agua potable, para recreación, para uso agrícola o para uso industrial). La calidad del agua de un cuerpo superficial o subterráneo depende de múltiples factores, algunos de los cuales la reducen directa o indirectamente, mientras que otros pueden revertir los efectos de la contaminación. Por otro lado, y actuando para mejorar la calidad del agua, está la capacidad natural de los ecosistemas acuáticos para descomponer o inmovilizar los contaminantes. (de Alba & Martín Cerón, 2019)

## 2.7 Concepto de Gestión Sustentable

El concepto de desarrollo sustentable implica limitaciones por el estado actual de la tecnología y la organización social sobre los recursos ambientales y por la capacidad de la biosfera para absorber los efectos de las actividades humanas. Pero la tecnología y la organización social se pueden gestionar y mejorar para crear un crecimiento económico. El concepto de gestión sustentable se puede aplicar específicamente a los problemas de sedimentos. El sedimento juega un papel esencial en los sistemas fluviales. En la Figura 14 varias funciones de los sedimentos están relacionadas y categorizadas a lo largo de las tres esquinas del desarrollo sustentable.

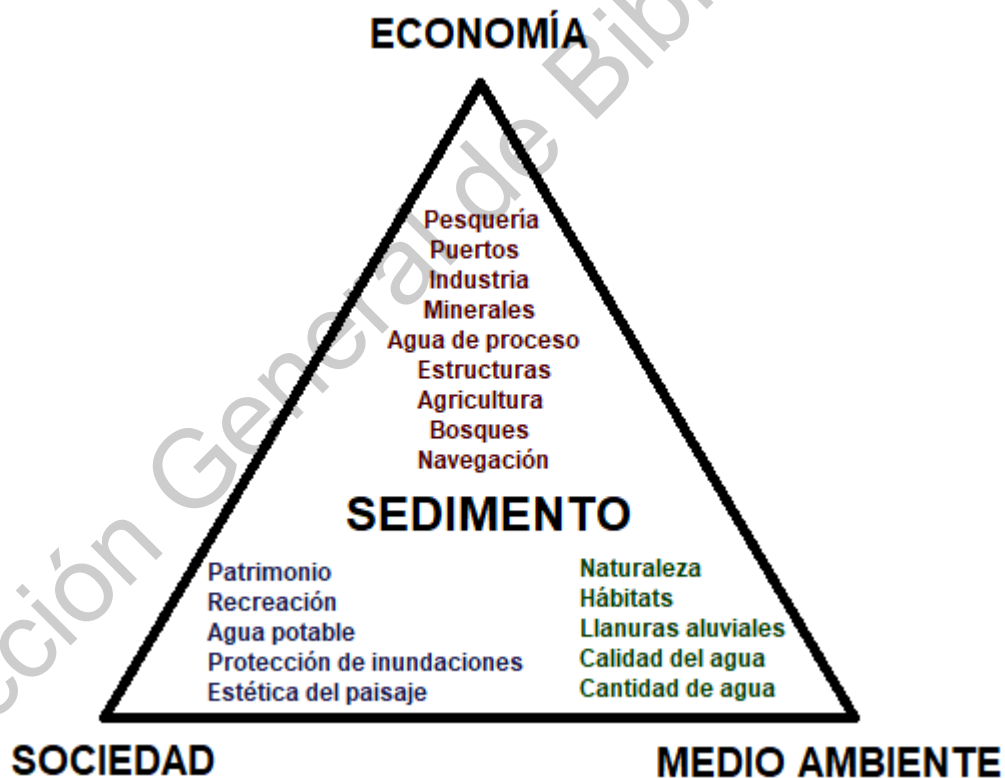


Figura 14. Funciones de desarrollo sostenible y sedimentos (Modificado de Owens, 2008)

Para lograr un uso más sustentable de las cuencas hidrográficas, es necesario desarrollar soluciones que operen a escala de cuenca y que aborden las numerosas

funciones ambientales, económicas y sociales que desempeñan los sedimentos dentro de las cuencas. En este sentido, el control de las fuentes de sedimentos y contaminantes asociados representa quizás la mejor solución a largo plazo. También puede representar una de las soluciones más rentables en muchos casos porque la solución apunta a la causa y no solo al efecto. Identificar las fuentes puede ser fácil, pero la implementación de una estrategia de gestión para controlar realmente la movilización y el transporte de sedimentos y contaminantes una vez que se ha identificado el tipo de fuente o el área de la fuente, puede ser más problemático y puede haber muchos obstáculos para desarrollar un plan de manejo exitoso. (Owens, Slob, Liska, & Brils, 2008)

### **3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La presencia de embalses rompe el equilibrio de erosión –sedimentación de los ríos al interrumpir el flujo con la construcción de una presa provocando sedimentación aguas arriba y aguas abajo ejerciendo una influencia importante en los flujos modificando propiedades físico-químicas y biológicas del agua de los cauces que afectan la vegetación ribereña. Cualquier modificación en el balance de sedimentos influye en la distribución de la vegetación a lo largo de un río. Por lo tanto, se deduce que los embalses al retener los sedimentos pueden afectar en gran medida la vegetación ribereña tanto en términos de estrechamiento / ensanchamiento como de biomasa total.

### **4. JUSTIFICACIÓN**

Son varios los procesos ecológicos que ocurren en un ecosistema ribereño. La fuerza de la corriente y los cambios morfológicos del cauce influyen sobre la flora ribereña y, al controlar la deposición y erosión de sedimentos, tienen un papel fundamental en los procesos que ocurren dentro de los cuerpos de agua. Además, la vegetación estabiliza las márgenes de los ríos y arroyos, provee de hojarasca y



de madera de gran tamaño a los cuerpos de agua, retiene y recicla nutrientes, modificando las condiciones microclimáticas. (Meli, Ruiz, & Carabias, 2015)

Durante las últimas décadas, la expansión de la agricultura, la ganadería y el aumento de la mancha urbana ha eliminado o reducido al mínimo la vegetación ribereña en muchos ríos, lo que ha modificado la función ecológica que desempeña, y los servicios ambientales que aporta, como la calidad del agua de los ríos. Se han realizado estudios en arroyos donde se observaron las características y su funcionamiento, considerando la presencia o la ausencia de la vegetación ribereña. En presencia de vegetación ribereña, se encontró que el nivel del agua fue constante durante todo el año y la calidad del agua era mejor, más transparente, ya que tenía menos sedimentos suspendidos y con pocos nutrientes. En cambio, en ausencia de la vegetación ribereña, se observó que los ríos tenían más agua durante de la época de lluvias, pero disminuía drásticamente en las secas, además estaba con más sedimentos suspendidos, con muchos nutrientes y contaminantes. (Vázquez, Martínez , & García Franco, 2020)

Los embalses reciben nutrientes procedentes de los afluentes y en mayor o menor medida, hay un aporte de materia orgánica que se va a ir depositando en el embalse, provocando que su Demanda Bioquímica de Oxígeno aumente el consumo exagerado de oxígeno en el embalse. Al tiempo que se va “eliminando” el oxígeno del agua al crear una zona anóxica en la parte profunda del embalse, el agua que va aguas abajo, acabará provocando problemas de oxidación de compuestos férricos, floración de bacterias de azufre o la modificación de la temperatura del agua. Esta modificación de la temperatura, provoca una modificación en la flora de algas y patrones ecológicos en la fauna del río.

Otro problema existente, es el de la sedimentación natural del río, ya que el embalse retiene a la sedimentación natural creando una barrera al flujo del agua. Esta barrera provoca efectos no sólo en el embalse con la acumulación de los sedimentos, también los provoca aguas abajo por la ausencia de sedimentos que contienen

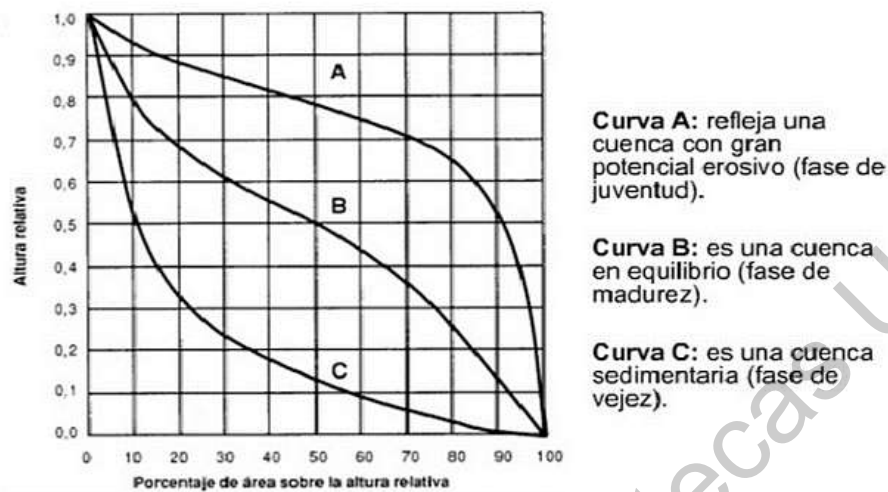
nutrientes y que son los responsables de mantener la fertilidad de suelos agrícolas aguas abajo. (Rodríguez, 2010)

Los impactos socioeconómicos y ambientales de los procesos de erosión y sedimentación en la gestión de las cuencas hidrográficas son importantes. Lamentablemente, se estima que más del 50% de la capacidad de almacenamiento de embalses del mundo podría perderse debido a la sedimentación en las próximas décadas. Debido a esto, deben mejorarse las prácticas de gestión de sedimentos. Aunque en la actualidad tenemos a nuestra disposición varios modelos de transporte de sedimentos, el poco conocimiento sobre los procesos de producción de sedimentos presenta un obstáculo para el progreso en la resolución de los problemas.

## **5. MARCO TEÓRICO**

### **5.1 Morfometría de la cuenca**

Las características físicas de una cuenca son elementos de gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma. Cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una menor longitud de ladera, con una mayor velocidad de escurrimiento. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta como el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal, etc.



**Figura 15. Formas de curvas hipsométricas de acuerdo a la fase de la cuenca (Rojas, 2015)**

En términos simples, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. (Rojas, 2015)

En la Figura 15 la curva superior refleja una cuenca con un gran potencial erosivo, la curva intermedia es característica de una cuenca en equilibrio y la curva inferior es típica de una cuenca sedimentaria.

## 5.2. Características Fisiográficas de una cuenca

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta como el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal, etc.

### *Parámetros asociados a la forma de la cuenca*

El área de la cuenca sirve de base para determinar otros elementos, generalmente los caudales crecen a medida que aumenta el área de la cuenca. Al ser menor el área de la cuenca es más común detectar crecientes instantáneos y de respuesta inmediata que las cuencas de mayor área.

**Tabla 1. Clasificación de una cuenca de acuerdo al área**

<b>Tamaño de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descripción</b>
0-25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Pequeña-Media
500-2500	Grande-Media
2500-5000	Grande
>5000	Muy grande

Los valores de longitud de cauce dependen del flujo de acumulación previamente seleccionado, ya que a menor acumulación mayor será la longitud de los cauces y viceversa, a mayor acumulación menor longitud.

La longitud axial de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo y otro punto aguas arriba, donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas de igual superficie y formas diferentes se espera un comportamiento hidrológico también diferente.

El factor de Forma de Horton (Kf) es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.

$$k_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Mide cuan redonda o alargada puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.

El coeficiente de compacidad o de Gravelius compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia (cercano a la unidad) y permite analizar la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea.

$$k_c = \frac{0.282P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

P= perímetro de la cuenca

A= área de la cuenca

La relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y cuyo diámetro sea igual la longitud de la cuenca.

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad \text{Ec. 3}$$

El valor de la relación de elongación se acerca a la unidad cuando la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales, la relación de elongación está entre 0.5 y 0.8.

*Parámetros asociados al relieve de la cuenca*

La elevación es uno de los parámetros más determinantes del movimiento del agua a lo largo de la cuenca. De ella dependen en gran medida la cobertura vegetal, el clima, el tipo y uso del suelo y otras características fisiográficas de un territorio.

La pendiente media de la cuenca es el valor medio del declive del terreno y la inclinación respecto a la horizontal, de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca.

#### *Parámetros relativos al drenaje*

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal, entre más alto el orden de la cuenca, indica un drenaje más eficiente que desalojara rápidamente el agua.

La densidad de drenaje expresa la capacidad de desalojar un volumen de agua dado. Este parámetro es muy representativo respecto a la topografía de las cuencas.

$$Dd = \frac{\text{Longitud de corrientes (km)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad \text{Ec. 4}$$

Con el fin de catalogar una cuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de densidad de drenaje próximo a  $0.5 \text{ km}^{-1}$  o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje.

El coeficiente de torrencialidad nos dice que a mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor. Este resultado significa que el agua recorre muy poco para dirigirse a los cauces y la velocidad de descarga es mayor.

$$Ct = \frac{\text{\#cauces orden 1}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}} \quad \text{Ec. 5}$$

La relación de bifurcación es la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden  $Nu$  y el número de segmentos de orden inmediatamente superior  $Nu+1$ .

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Ec. 6

El tiempo de concentración de una cuenca es el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante.

El promedio de estos valores parciales se puede tomar como un valor representativo de la cuenca y es considerado característico del sistema y de su torrencialidad. Cuando los valores de la bifurcación son bajos, existen picos fuertes en el hidrograma y cuando son altos el hidrograma es más uniforme. Las relaciones de bifurcación pueden variar de 3.0 a 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje, pero en general para condiciones naturales el valor promedio es 3.5.

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado.

El método más utilizado para el cálculo del tiempo de concentración en México es la ecuación de Kirpich.

$$Tc = 0.066 \left( \frac{L_{cp}}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.77}$$

Ec. 7

donde

$L_{cp}$ = Longitud del cauce principal en m

$S_c$ = Pendiente del cauce en %

### 5.3. Propiedades generales de los sedimentos

Los sedimentos son todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua, que después de cierto acarreo se depositan finalmente a lo largo de los cauces, lagos o lagunas, en el mar, o en las partes más bajas de la cuenca. (García Flores & Maza Álvarez, 1985)

De acuerdo con Las partículas de sedimento se clasifican en:

#### - Materiales no cohesivos o granulares

Los materiales no cohesivos o granulares están formados por partículas sueltas gruesas como lo son la arena y las gravas. En los granos gruesos la fuerza de gravedad predomina sobre cualquier otra fuerza, por esto las partículas gruesas tienen un comportamiento similar. Esto quiere decir que el peso de las partículas es la fuerza principal que resiste las fuerzas de arrastre de la corriente, al disminuir esta acción del agua, las partículas por fuerza de gravedad se van depositando.

#### - Materiales cohesivos

Los materiales cohesivos están formados de partículas muy pequeñas que ofrecen resistencia al flujo de agua. Estas partículas se mantienen unidas entre sí debido a la fuerza de cohesión, que es la que se resiste a las fuerzas de arrastre causadas por el flujo de agua. Se necesitan velocidades de corriente altas para erosionar estas, pero una vez que esta fuerza es vencida la partícula puede comportarse como un material granular y ser transportada en suspensión debido a su peso y tamaño reducidos.

Las principales características que interesan de un sedimento no cohesivo, se refieren a las partículas que forman el sedimento (Tabla 2).



**Tabla 2. Características de las partículas sedimentarias**

Propiedad	Relación	Definiciones
Densidad	$\rho_s = \frac{M}{V}$	<b>M</b> Masa sólida de la partícula <b>V</b> Volumen de la partícula
Peso específico	$\gamma_s = \frac{W}{V}$ $\gamma_s = g\rho_s$	<b>W</b> peso de la partícula <b>V</b> Volumen de la partícula $\rho_s$ Densidad <b>g</b> Gravedad.
Densidad relativa	$S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$	$\rho_s$ Densidad de la partícula sólida $\rho$ Densidad del agua.
Peso específico de la materia sólida sumergida	$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$	$\gamma_s$ peso específico del sedimento $\gamma$ el peso específico del agua
Diámetro nominal	$D_n = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3}$	<b>V</b> Volumen de la partícula
Esfericidad	$E = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{1/3}$	<b>V<sub>p</sub></b> volumen de la partícula <b>V<sub>s</sub></b> volumen de la esfera
Velocidad de caída	$W = \left(\frac{4}{3} * \frac{1}{C_d} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right) * gD\right)^{1/2}$	$\gamma_s$ peso específico de la fase sólida de la partícula $\gamma$ peso específico del líquido que cae <b>g</b> aceleración de la gravedad <b>D</b> diámetro de la partícula <b>C<sub>d</sub></b> coef. de arrastre adimensional

Elaboración propia

### 5.3.1 Diámetro característico

Es el diámetro que tiene una esfera de igual densidad y velocidad de caída que la partícula de que se trata, al caer ambas en el mismo líquido a una temperatura

conocida. El diámetro de sedimentación se emplea con frecuencia para definir el tamaño de partículas muy finas, como las de los limos y arcillas y se determina a partir de su velocidad de caída mediante la ley de Stokes.

Existen varias escalas granulométricas pero la escala de Wentworth (1922) es la adoptada internacionalmente para la clasificación granulométrica de partículas sedimentarias. Parte de 1mm, y dividiendo o multiplicando por 2, en sentido decreciente o creciente de tamaño respectivamente, se definen los límites de diámetro de cada clase.

Posteriormente se propuso que los límites de la escala de grado deberían ser transformados logarítmicamente en unidades phi ( $\phi$ ), usando las expresiones 1) y 2):

$$1) D(\phi) = -\log_2 d(\text{mm})$$

$$2) d(\text{mm}) = 2^{-D(\phi)}$$

donde D es el diámetro de grano en unidades phi y d es el tamaño de grano en unidades milimétricas. A incrementos en tamaño grano, la medida phi decrece (Tabla 2).

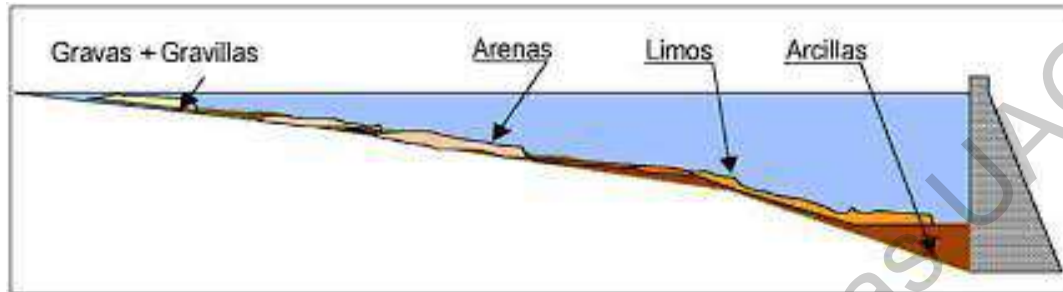
**Tabla 3. Clasificación de los sedimentos por tamaño propuesto por Wentworth (1922)**

mm	Phi ( $\phi$ )	Nombre	
256	-8	Boleos	Conglomerado De gravas
128	-7	Cantos rodados	
64	-6		
32	-5		
16	-4	Guijarros	
8	-3		
4	-2		
2	-1	Gravas	Arenas Areniscas
1	0	Arena Muy Gruesa	
0.5	1	Arena Gruesa	
0.25	2	Arena Media	
0.125	3	Arena Fina	
0.063	4	Arena muy fina	Barro
0.031	5	Limo grueso	
0.0156	6	Limo Medio	
0.0078	7	Limo Fino	
0.0039	8	Limo muy Fino	
		Arcilla	

#### 5.4 La sedimentación en embalses

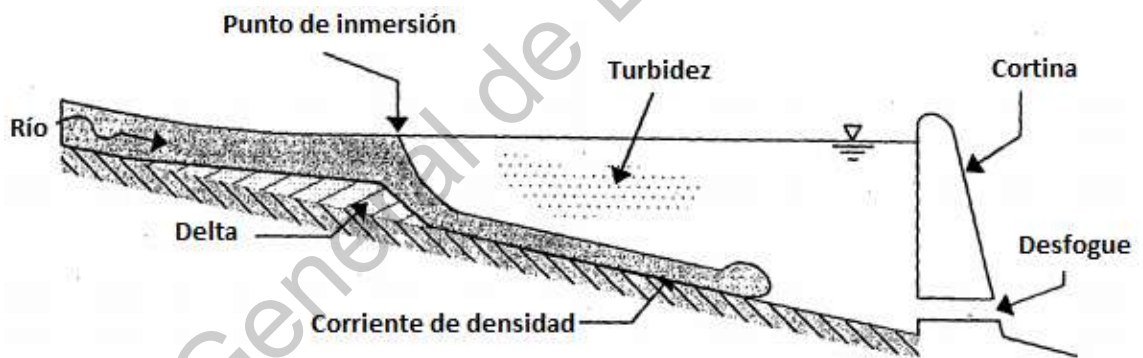
Al entrar la corriente del río al embalse, conforme va disminuyendo la velocidad del agua debido al efecto de la ampliación del cauce, el material grueso (gravas y gravillas) se depositará en la “cola” del vaso denominado delta. El sedimento más fino debido a su facilidad para mantenerse en suspensión, puede continuar aguas abajo de los embalses. Esto da como resultado un sedimento que se distribuye a lo largo del embalse siguiendo un gradiente granulométrico decreciente desde delta hasta el fondo de la presa, como se esquematiza en la Figura 16. Se pueden presentar flujos continuos de sedimentos llamado corriente de densidad, sin embargo, existen embalses en los que dicha corriente no se llega a formar, y se produce en el vaso, o en gran parte del mismo, una turbidez generalizada que

evolucionará, según la dinámica particular del almacenamiento, generando mala calidad del agua para su abastecimiento (Figura 17). (Gracia Sánchez , 1998)



**Figura 16. Distribución longitudinal más probable de los sedimentos a lo largo del eje longitudinal de un gran embalse (Modificada de Palau Ybars 2002)**

Generalmente en los embalses con poca pendiente el depósito ocurre principalmente en la entrada del vaso. En aquellos donde la pendiente es más pronunciada, el depósito ocurre cerca de la cortina.



**Figura 17. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse (Gracia Sánchez, 1998)**

El movimiento de sedimentos en un embalse está gobernado por 2 fuerzas dinámicas:

- 1) Una componente en la dirección del flujo debida al movimiento del agua.
- 2) Una componente vertical debida a la gravedad y a la turbulencia del agua.

Hasta hace algún tiempo se creía que el sedimento siempre se depositaba en las partes más profundas del embalse. Sin embargo, se deposita en dos formas características (Sepúlveda, 2015):

a) Barras en forma de delta

Se encuentran al inicio del embalse, generalmente compuesta por gravas, arenas y a veces algo de limos. La formación de estos depósitos tiene como consecuencia una elevación en la curva de remanso provocando aguas estancadas, saturación de la tierra y aumento de concentración de sedimentos.

b) Deposición de sedimentos en suspensión

Se extienden por todo el embalse. Solo en casos donde la pendiente del fondo está disponible, se forman corrientes de densidad que llevan este material fino a mayor profundidad. Si la pendiente en el embalse es pronunciada puede llegar hasta la presa. Hay áreas donde se pueden llegar a formar depósitos de material fino que se mueve dentro del embalse debido a la gravedad.

## **5.5 Modelos de erosión laminar**

La mayoría de los modelos de erosión se han desarrollado para aplicaciones de campo o de pequeña escala de captación, inicialmente como ayudas para la planificación de la conservación del suelo. En general, estos modelos describen los procesos de erosión en láminas (entre surcos) y en arroyos, ya que son los procesos de erosión dominantes en las laderas agrícolas. Algunos modelos también tienen en cuenta la erosión de los barrancos, pero otros mecanismos de producción de sedimentos, por ejemplo, los deslizamientos de tierra, los flujos de escombros y la erosión de las riberas de los ríos, que pueden ser importantes fuentes de sedimentos en las cuencas de captación montañosa, generalmente se ignoran.

La Tabla 4 enumera algunos modelos comunes de erosión del suelo que operan a diferentes escalas espaciales y temporales.

**Tabla 4. Ejemplos de modelos de erosión de suelo (M. van der Perk et al., 2008)**

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Escala temporal</b>	<b>Resolución temporal</b>	<b>Extensión espacial</b>
EUROSEM	European Soil Erosion Model	Evento	Minuto	Campos / cuencas pequeñas
LISEM	Limburg Soil Erosion Model	Evento	Minuto	Campos / cuencas pequeñas
ANSWERS-2000	Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation	Evento - meses	Minuto	Campos / cuencas pequeñas
WEPP	Water Erosion Prediction Project	Evento - meses	Día	Campos / cuencas pequeñas
USLE	Universal Soil Loss Equation	Largo plazo	Estancia estable	
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation	Largo plazo	Día	Campos
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	Largo plazo	Día	Campos

Los modelos USLE y RUSLE representan el enfoque de modelado menos complejo, pero no tienen en cuenta el transporte de sedimentos con capacidad de transporte limitada. Estos modelos no estiman la deposición de sedimentos debido a que no consideran la capacidad de transporte de sedimentos, que es una función de la profundidad y velocidad del flujo terrestre, la pendiente y la capacidad de transporte de las partículas del suelo. Por lo tanto, solo son capaces de estimar la pérdida de suelo en secciones de laderas del tamaño de un campo. (Owens P. N., 2008)

## 5.6. Calidad del agua y nutrientes y sus relaciones con los sedimentos

Un contaminante se define como una sustancia (natural o artificial) que, a un nivel por encima de un umbral, aumenta el riesgo de un efecto perjudicial sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Los contaminantes de las cuencas fluviales adoptan diversas formas, incluidos metales, elementos inorgánicos, compuestos orgánicos y radionucleidos, y las principales fuentes de estos contaminantes se destacan en la Tabla 5. Es importante tener en cuenta que muchos de estos contaminantes pueden obtenerse de procesos naturales, así como de actividades antropogénicas, aunque en la mayoría de los casos los insumos antropogénicos tienden a dominar. Un nutriente es un elemento esencial para el crecimiento de organismos. Los nutrientes más importantes en las cuencas hidrográficas son el nitrógeno (N) y el fósforo (P). El nitrógeno está presente predominantemente como una fase disuelta, mientras que más del 90% del P está unido a sedimentos y, por lo tanto, es el nutriente de mayor preocupación desde el punto de vista de la gestión de sedimentos. (Owens P. N., 2008)

**Tabla 5. Ejemplos de fuentes de sedimentos y contaminantes de las cuencas fluviales (Modificado de Owens, 2008)**

Materiales	Fuentes
Sediment (organic and inorganic)	Erosión de tierras rurales, agrícolas y boscosas, bancos de canales, polvo y construcción de carreteras urbanas, sólidos de aguas residuales, deposición atmosférica, insumos de áreas de mareas y zonas costeras (durante el ciclo de inundaciones y reflujos).
Metales y metaloides (Ag, Cd, Cu, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, As)	Geología, minería, industria, drenaje ácido de roca, tratamiento de aguas residuales, escorrentía urbana
Nutrients (P, N)	Escorrentías agrícolas y urbanas, aguas residuales y tratamiento de aguas residuales

Compuestos orgánicos (pesticidas, herbicidas, hidrocarburos, dioxinas)	Agricultura, industria, alcantarillado, vertedero, escorrentía urbana, combustión
Xenobiotica y antibióticos	Obras de tratamiento de aguas residuales, industria, agricultura
Radionucleidos	Industria de la energía nuclear, militar, geología, agricultura (fuente secundaria)

En México se consideran principalmente estos indicadores que aportan contaminantes al agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST).

La  $DBO_5$  indica la cantidad de materia orgánica biodegradable, en tanto que la DQO indica la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de la  $DBO_5$  incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, el aumento de los valores de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales. La DQO determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Los SST miden la cantidad de sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal. Tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van: desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta el agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa. (Comisión Nacional del Agua, 2018)

A continuación, se presentan las diferentes escalas de clasificación para aguas superficiales de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2015).



Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
$DBO_5 \leq 3$	<b>EXCELENTE</b> NO CONTAMINADA	<b>AZUL</b>
$3 < DBO_5 \leq 6$	<b>BUENA CALIDAD</b> AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE	<b>VERDE</b>
$6 < DBO_5 \leq 30$	<b>ACEPTABLE</b> CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. AGUAS SUPERFICIALES CON CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN O CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE	<b>AMARILLO</b>
$30 < DBO_5 \leq 120$	<b>CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN MUNICIPAL	<b>NARANJA</b>
$DBO_5 > 120$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES	<b>ROJO</b>

Figura 18. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (CONAGUA, 2015).

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
$DQO \leq 10$	<b>EXCELENTE</b> NO CONTAMINADA	<b>AZUL</b>
$10 < DQO \leq 20$	<b>BUENA CALIDAD</b> AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE Y NO BIODEGRADABLE	<b>VERDE</b>
$20 < DQO \leq 40$	<b>ACEPTABLE</b> CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. AGUAS SUPERFICIALES CON CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN O CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE	<b>AMARILLO</b>
$40 < DQO \leq 200$	<b>CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN MUNICIPAL	<b>NARANJA</b>
$DQO > 200$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES	<b>ROJO</b>

Figura 19. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda química de oxígeno (CONAGUA, 2015).

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
SST ≤ 25	<b>EXCELENTE</b> CLASE DE EXCEPCIÓN, MUY BUENA CALIDAD	<b>AZUL</b>
25 < SST ≤ 75	<b>BUENA CALIDAD</b> AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS, GENERALMENTE CONDICIONES NATURALES. FAVORECE LA CONSERVACIÓN DE COMUNIDADES ACUÁTICAS Y EL RIEGO AGRÍCOLA IRRESTRINGIDO	<b>VERDE</b>
75 < SST ≤ 150	<b>ACEPTABLE</b> AGUAS SUPERFICIALES CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE. CONDICIÓN REGULAR PARA PECES. RIEGO AGRÍCOLA RESTRINGIDO	<b>AMARILLO</b>
150 < SST ≤ 400	<b>CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES DE MALA CALIDAD CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS. AGUAS CON ALTO CONTENIDO DE MATERIAL SUSPENDIDO	<b>NARANJA</b>
SST > 400	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES CON ALTA CARGA CONTAMINANTE. MALA CONDICIÓN PARA PECES	<b>ROJO</b>

Figura 20. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en los sólidos suspendidos totales (CONAGUA, 2015).

### 5.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se desarrolla para estimar la cobertura de vegetación a partir de las bandas reflectantes de datos satelitales. El NDVI facilita identificar la presencia de cobertura vegetal en la superficie y explicar también explica su variación espacial y temporal (López Pérez, Martínez Menes, & Fernández Reynoso, 2015)

El algoritmo NDVI se calcula restando los valores de reflectancia roja del infrarrojo cercano y lo divide por la suma de las bandas de infrarrojo cercano y rojo. La función utilizada sigue (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{Ec. 8}$$

Mientras que NIR representa la reflectancia espectral en la banda infrarroja cercana el RED representa la banda roja.

Los valores de NDVI para cada subcuenca se agruparon utilizando como valores de referencia los propuestos (López Pérez, Martínez Menes, & Fernández Reynoso, 2015).

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 - 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 - 0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2 - 0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

Figura 21. Clasificación de los valores de NDVI

Los valores de NDVI varían de -1 a 1. El valor muy bajo de NDVI corresponde a áreas áridas de roca, arena, nieve, nubes, etc. Los valores moderados representan arbustos y pastizales, mientras que un valor alto indica vegetación densa y húmeda como bosques templados y tropicales. El suelo desnudo se representa con valores NDVI más cercanos a 0 y los cuerpos de agua se representan con valores NDVI negativos (Merg, y otros, 2011).

## 6. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 6.1 Objetivo

Evaluar la funcionalidad de los sistemas a través de la sedimentación

Particulares:

- Estudiar la dinámica temporal de la capacidad útil de la presa.

- Estudiar la dinámica del cambio de uso de suelo que intervienen en los procesos de escurrimiento, erosión y sedimentación en la cuenca asociada al embalse mediante imágenes satelitales.
- Investigar los efectos de la erosión y la sedimentación en los ecosistemas ribereños aguas arriba y aguas abajo del embalse a través de la dinámica del NDVI para identificar áreas afectadas por la migración de la vegetación y la erosión de los márgenes.
- Muestreo de sedimentos con el fin de determinar los diámetros característicos de los sedimentos.

## **6.2 Hipótesis**

Los sedimentos retenidos en un embalse afectan los ecosistemas ribereños porque rompe el equilibrio natural del aporte de materiales disueltos y suspendidos sobre las llanuras de inundación.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1 Recolección de la información**

Para conocer el contexto en el que se trabajará es necesario realizar un diagnóstico previo de la zona. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) así como la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) tienen diversas capas de información las cuales serán de utilidad para esta investigación.

**Tabla 6. Descripción de información vectorial y ráster utilizados**

<b>Capas Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Características</b>	<b>Escala</b>	<b>Formato</b>
Edafología	Información geoespacial que muestra la distribución de los principales tipos de suelo en el territorio nacional, así como los atributos físicos y químicos.		1:250 000	Vectorial (polígono)
Hidrografía	Es información estructurada como un sistema lineal que modela el drenaje a través de arroyos y ríos en cada cuenca hidrográfica.		1:250 000	Vectorial (puntos, polígonos y/ líneas)
Red Nacional de Caminos	Es cartografía de carreteras, caminos y vialidades y elementos asociados a este tema.		1:1 000 000	Vectorial (poli línea)
Continuo de Elevaciones Mexicano	Contiene información acerca de la distribución de elevaciones.		100 m	Ráster
Uso de Suelo y Vegetación- Serie I, II, III, IV, V, VI	Información geoespacial que muestra la distribución del uso del suelo agrícola, de la vegetación natural e inducida del país, además de otros usos que se presentan en el territorio relacionados con la cubierta vegetal.		1:250 000	Vectorial (polígono)

Fuente: Elaboración propia

Obtener la gráfica de elevaciones, áreas y capacidades del embalse en condiciones actuales de la Central Hidroeléctrica.

Se presenta en la tabla 6 los datos de diferentes estudios batimétricos anteriores y el más reciente (Comisión Federal de Electricidad, 2018)

**Tabla 7. Batimetrías P.H. El Caracol**

<b>Batimetría</b>	<b>1986</b>	<b>1990</b>	<b>2002</b>	<b>2011</b>	<b>2014</b>	<b>2018</b>
Capacidad (MM <sup>3</sup> )	1,739.558	1,587.396	1,527.262	1,288.105	1,040.878	1,010.463

También se muestra un histograma que representa gráficamente los datos de la Figura 22.

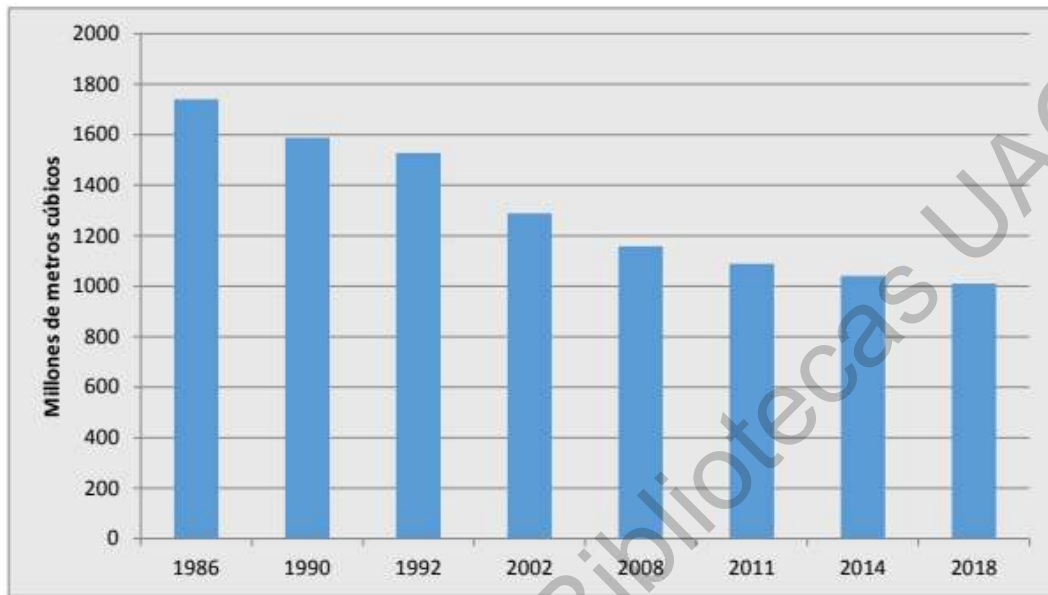


Figura 22. Volumen de almacenamiento periodo 1986-2018 (CFE, 2018)

## 7.2. Características generales de la cuenca de estudio

Dentro de la cuenca de estudio se encuentra la Presa Hidroeléctrica El Caracol formalmente llamada Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa, es una presa ubicada en el cauce del río Balsas en el municipio de Apaxtla, Guerrero. Fue construida aguas arriba de El Infiernillo sobre la sierra de Teloloapan, cuenta con una capacidad de 1,860 millones de  $m^3$  de agua, mide 50 km de largo y cuenta con una cortina de 126 m de elevación. Fue puesta en operación en 1986 y cuenta con una central hidroeléctrica que tiene capacidad de generar 600 mega watts de energía eléctrica.

La presa El Caracol, construida aguas arriba de El Infiernillo, sobre un profundo cañón de la Sierra de Teloloapan, en el Medio Balsas y en las proximidades del poblado de Apaxtla Gro., tiene un vaso con una capacidad de 1,860 millones de  $m^3$  de agua, mide 50 km de largo y cuenta con una cortina de 126 m de elevación.

Sus propósitos son de generación de electricidad y el control de avenidas. Su capacidad instalada es de 600 MW. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007)

La cuenca El Caracol se encuentra en ocho estados del país, su área abarca un 35.82% por el estado de Puebla, 28.37% por Guerrero, 15.36% por Oaxaca, 8.66% por Morelos, 5.29% por Tlaxcala, 5.04% por Toluca, 1.12% por Veracruz y 0.33% por la Ciudad de México (Figura 23).

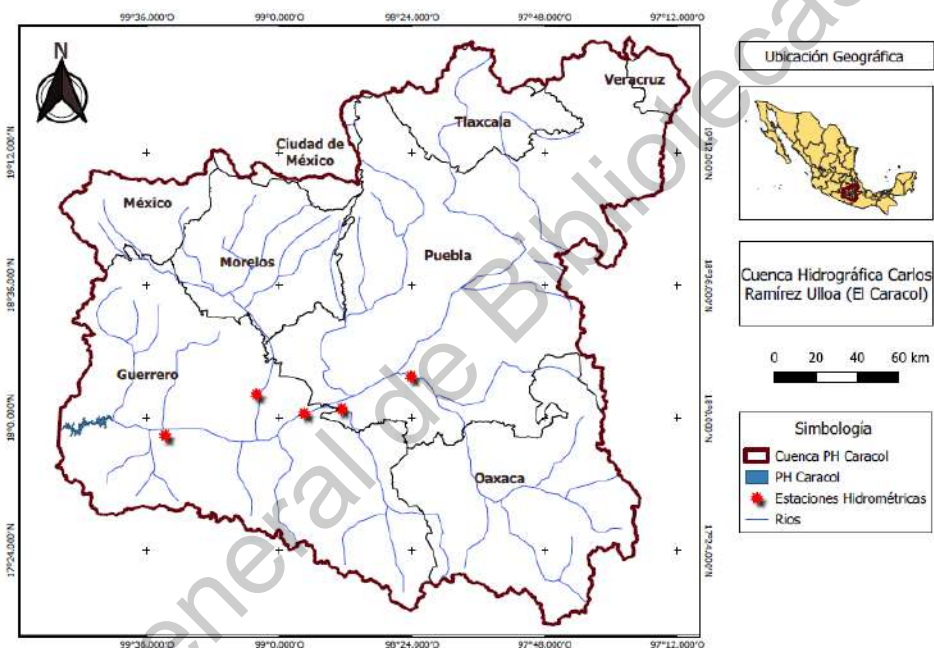


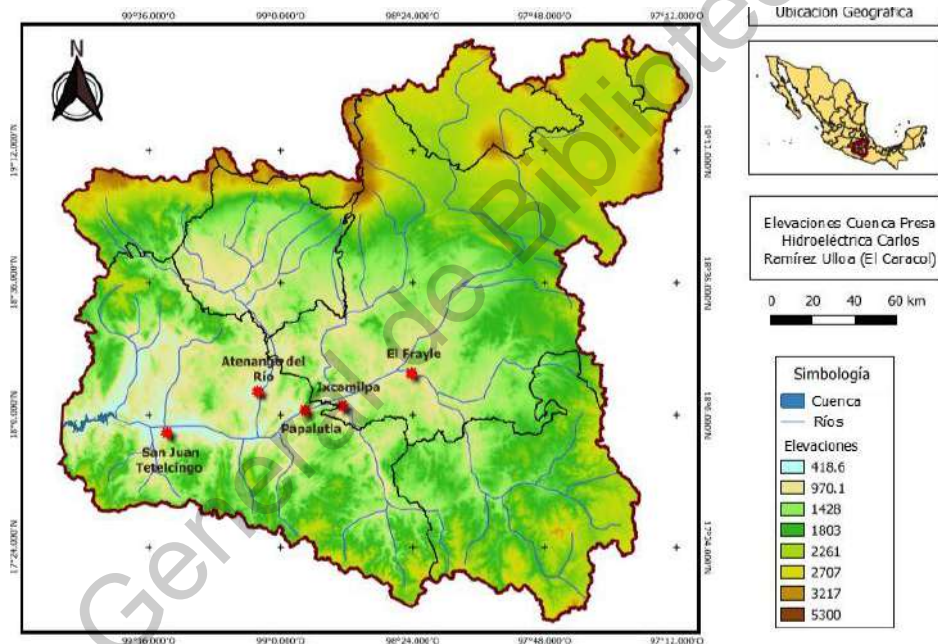
Figura 23. Mapa de ubicación de la cuenca de estudio

El Balsas es un río del centro sur de México entre Guerrero y Michoacán, que forma un amplio caudal llamado el caudal baja del Balsas. Con un escurrimiento superficial de 24.944 hm<sup>3</sup> y con sus 771 kilómetros de longitud, es uno de los ríos más largos de México. Forman parte de la cuenca del río Balsas los estados de Veracruz, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala, Morelos, México, Michoacán, Jalisco y Guerrero. Entre los principales afluentes del Balsas se encuentran los ríos Cutzamala y Placeres del Oro (Guerrero), Mixteco (Puebla y Oaxaca), Calderón

(Estado de México), Amacuzac (Morelos), Tepalcatepec, Cupatitzio, Del Marqués y Purungueo (Michoacán).

El río Balsas es conocido como Atoyac en Puebla y en gran parte de la región norte de Guerrero es conocido como Mezcala. También recibe los deshielos del Volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Xinantécatl.

La cuenca tiene una elevación mínima de 418.6 m.s.n.m en el punto de salida de la cuenca y una elevación máxima de 5,400 m.s.n.m que pertenece a la parte del volcán Popocatepetl (Figura 24).



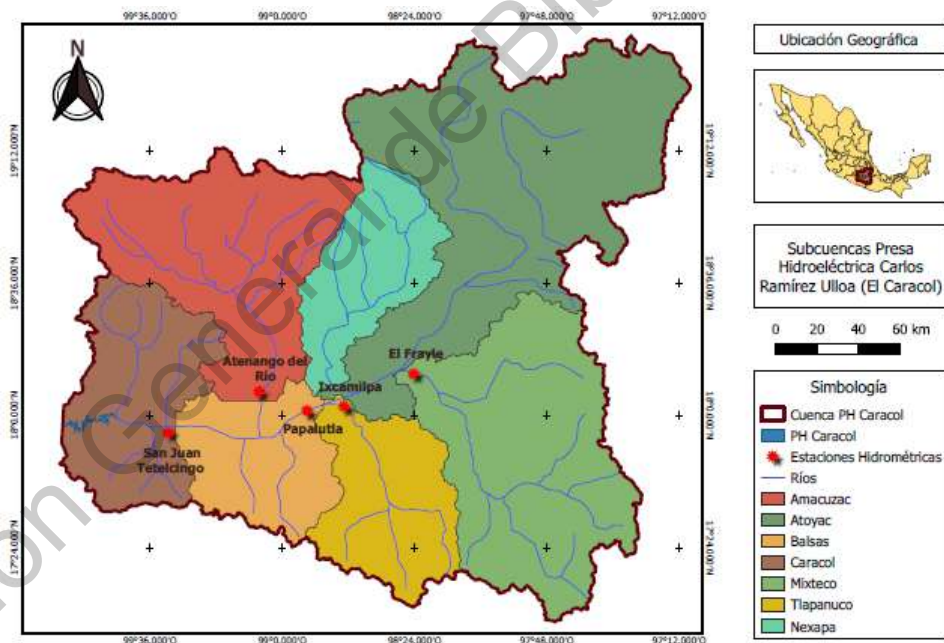
**Figura 24. Elevaciones de la cuenca con su red hidrográfica y estaciones hidrométricas de interés de la CFE**

Aguas arriba del embalse se encuentra la mina "El limón" que desde el 2012 la empresa canadiense Torex Gold Resources puso en operación. Esta mina está generando una grave contaminación por las descargas de desechos químicos que utiliza para la explotación de oro y plata, que se vierten en el Río Balsas y la presa hidroeléctrica "El Caracol".



### 7.3 Base de datos para volúmenes de escurrimiento y sedimentos en la cuenca del río Balsas

Se recopiló información de cinco estaciones hidrométricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) las cuales se analizaron volúmenes de escurrimiento y de sedimentos para el periodo 1984-2006, esto para observar las tendencias de la erosión en la cuenca para antes y después de la construcción del embalse. Por otra parte, la información que se pudo obtener de las estaciones hidrométricas de la CFE, fue a través de la colaboración y apoyo que brindó personal técnico que labora en las Divisiones Hidrométricas con que cuenta el país. La ubicación de las estaciones hidrométricas que influyen en las subcuencas se muestra en la Figura 25.



**Figura 25. Ubicación de estaciones hidrométricas que se encuentran en las subcuencas**

Las estaciones hidrométricas de donde se obtuvo información se encuentran en la región hidrológica no. 18 Balsas.

A continuación, se presenta el análisis y síntesis de la información de sedimentos por estación hidrométrica (Tabla 8).

- Estación hidrométrica No. 7. Atenango del Río.

Esta estación cuenta con un periodo de información entre los años de 1984 a 2006, y presenta un promedio de sedimentos entre estos años de  $0.237 \text{ kg/m}^3$ , el año que hay una mayor cantidad de sedimentos es en el año 1998 con  $0.386 \text{ kg/m}^3$ , y el año en que hay una menor cantidad es el año 2000 con  $0.180 \text{ kg/m}^3$ .

- Estación hidrométrica No. 48. Papalutla.

Esta estación cuenta con un periodo de información entre los años de 1984 a 2006, y presenta un promedio de sedimentos entre estos años de  $2.360 \text{ kg/m}^3$ , el año que hay una mayor cantidad de sedimentos es en el año 1989 con  $4.009 \text{ kg/m}^3$ , y el año en que hay una menor cantidad es el año 2000 con  $1.114 \text{ kg/m}^3$ .

- Estación hidrométrica No. 68. San Juan Tetelcingo.

Esta estación cuenta con un periodo de información entre los años de 1987 a 2004, y presenta un promedio de sedimentos entre estos años de  $1.662 \text{ kg/m}^3$ , el año que hay una mayor cantidad de sedimentos es en el año 1989 con  $2.447 \text{ kg/m}^3$ , y el año en que hay una menor cantidad es el año 1987 con  $0.262 \text{ kg/m}^3$ .

- Estación hidrométrica No. 26. El Frayle.

Esta estación cuenta con un periodo de información entre los años de 1984 a 2006, y presenta un promedio de sedimentos entre estos años de  $2.361 \text{ kg/m}^3$ , el año que hay una mayor cantidad de sedimentos es en el año 2001 con  $4.578 \text{ kg/m}^3$ , y el año en que hay una menor cantidad es el año 1987 con  $0.266 \text{ kg/m}^3$ .

- Estación hidrométrica No. 30. Ixcamilpa.

Esta estación cuenta con un periodo de información entre los años de 1986 a 2006, y presenta un promedio de sedimentos entre estos años de  $2.416 \text{ kg/m}^3$ , el año que hay una mayor cantidad de sedimentos es en el año 1990 con  $3.844 \text{ kg/m}^3$ , y el año en que hay una menor cantidad es el año 2000 con  $1.690 \text{ kg/m}^3$ .

**Tabla 8. Información de las estaciones hidrométricas de la CFE**

No.	Estación	Cuenca	Río	División Hidrométrica	Estado
26	El Frayle	Balsas	Mixteco	Pacífico Sur	Puebla
30	Ixcamilpa	Balsas	Tlapanuco	Pacífico Sur	Puebla
7	Atenango del río	Balsas	Amacuzac	Pacífico Sur	Guerrero
48	Papalutla	Balsas	Balsas	Pacífico Sur	Guerrero
68	San Juan Tetelcingo	Balsas	Balsas	Pacífico Sur	Guerrero

#### 7.4 Estimación de la erosión laminar de la cuenca

Para la evaluación de los procesos de erosión hídrica se requiere el empleo de varios tipos de datos como: los climáticos, hidrológicos, topográficos, vegetación, tipo de suelo y prácticas de conservación. Mediante el procesamiento de estos datos se obtienen los parámetros de la USLE y se calcula la pérdida anual de suelo producida por la erosión hídrica sin estimar el transporte de sedimentos en los cauces. (Montes-León, Uribe-Alcántara, & García-Celis , 2011)

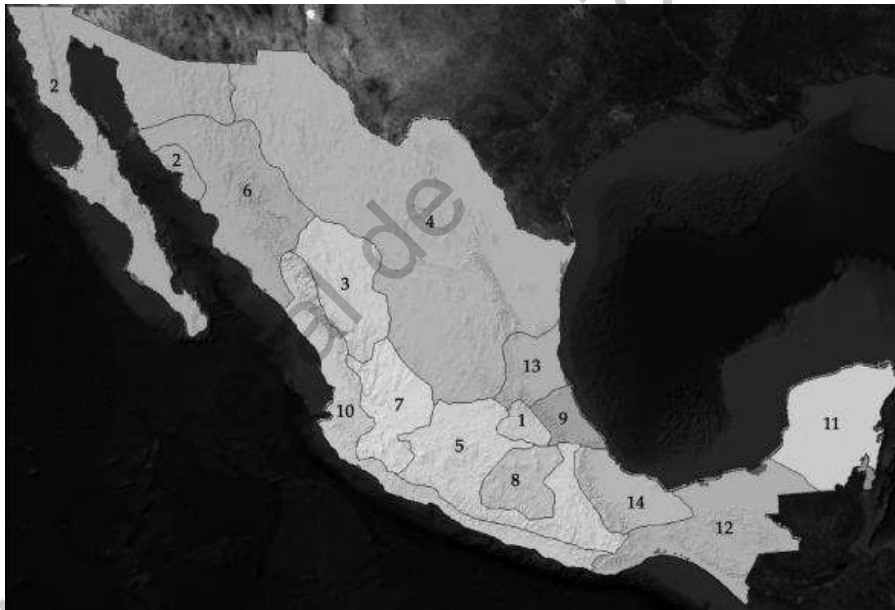
La ecuación que describe el proceso de erosión es:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad \text{Ec. 9}$$

donde: A es el promedio anual de pérdida de suelos (t/ha.año), R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año), K es el factor de erosionalidad del suelo (t.ha.h/MJ.mm.ha), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor de grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo de cultivos (adimensional) y P es el factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional).

#### 7.4.1 Factor R

El factor R es de tipo climático e indica el potencial erosivo de las precipitaciones. Para obtener este factor primero se bajaron los datos de las estaciones climatológicas de CONAGUA y CFE que se encuentran en la zona de estudio, posteriormente con polígonos de Thiessen se hizo una ponderación para ver el efecto de cada estación y su zona de influencia dentro de la cuenca. A partir de los datos de Precipitación Media Anual (PMA) de las estaciones climatológicas se aplicaron las ecuaciones de erosividad (Figura 26 y Tabla 9) asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana determinadas por Cortés Becerra (1997).



**Figura 26. Mapa de regionalización nacional de factor R (Montes-León, 2011)**

**Tabla 9. Ecuaciones regionalizadas para la república (Becerra, 1997).**

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
5	$3.4880 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$-0.0334 * P + 0.0061 * P^2$	0.98
8	$1.9967 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
9	$7.0458 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
10	$6.8938 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
11	$3.7745 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
12	$2.4619 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
13	$10.7427 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
14	$1.5005 * P + 0.002640 * P^2$	0.95

Según la regionalización nacional del Factor R la cuenca cae dentro de dos regiones diferentes, por esta razón para el cálculo del factor R se utilizó la ecuación correspondiente a las zonas 5 y 8 de la tabla anterior.

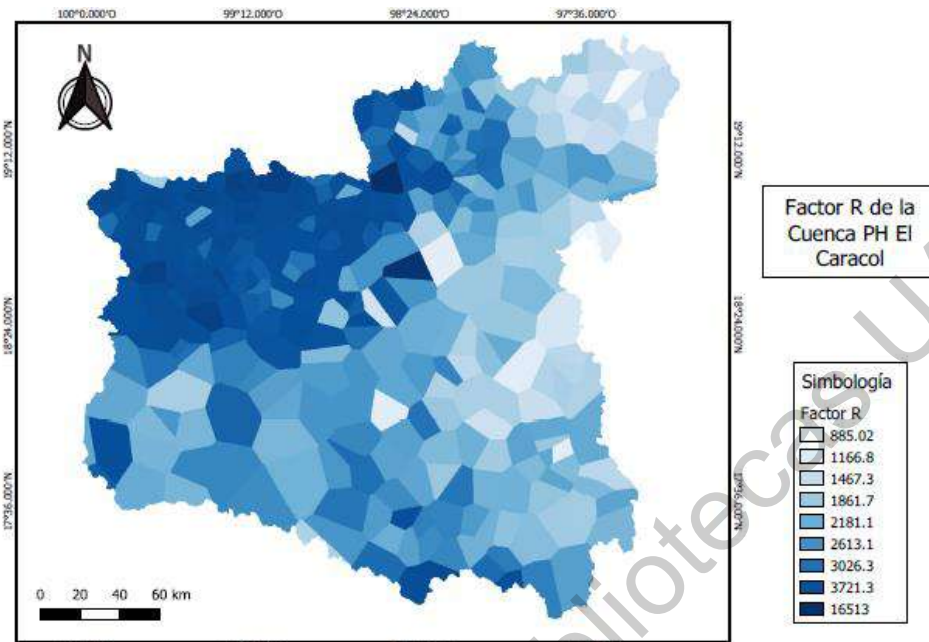


Figura 27. Mapa espacial del factor R de erosividad de la lluvia en la cuenca

#### 7.4.2 Factor K

La erodabilidad del suelo es una compleja propiedad que se entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicado, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración.

Para obtener este factor se utilizó la información edafológica más reciente del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI): Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000, Edición 2013.

De acuerdo con la clasificación de suelos del WRB (World Reference Base for Soil Resources) del tipo de suelo y de su textura (gruesa, media o fina), se le asigna un factor K a cada tipo de suelo de la cuenca (Tabla 10).

**Tabla 10. Factor K para los tipos de suelo dentro de la cuenca.**

Suelo	Área (%)	Textura	Factor K
Acrisol	0.1	Media	0.04
Andosol	6.5	Media	0.04
Cambisol	7.7	Media	0.04
Castaozem	0.4	Media	0.04
Chernozem	0.1	Media	0.02
Feozem	6.0	Media	0.02
Fluvisol	1.0	Gruesa	0.026
Gleysol	0.0	Media	0.04
Litosol	18.8	Media	0.02
Luvisol	2.5	Media	0.04
Regosol	46.3	Media	0.04
Rendzina	5.2	Media	0.02
Solonchak	0.2	Fina	0.013
Vertisol	3.9	Fina	0.026
Xerosol	0.3	Media	0.079
Poblado	0.1	-	-
Cuerpo de agua	0.8	-	-

Cabe mencionar que en los cuerpos de agua se considera un valor igual a 1.0.

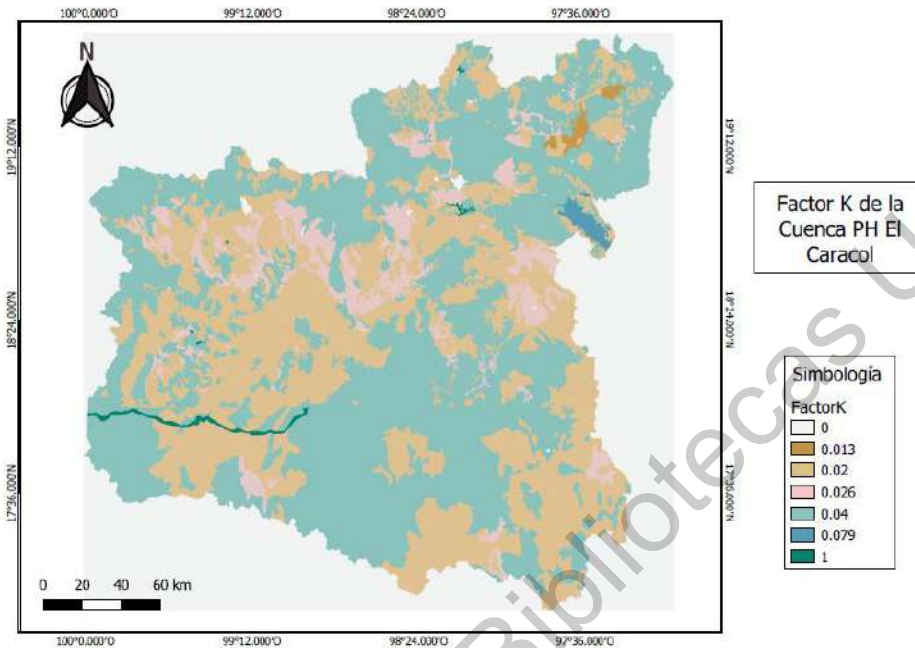


Figura 28. Mapa del factor K de susceptibilidad del suelo a la erosión en la cuenca

#### 7.4.3 Factor LS

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores: longitud (L) y grado de pendiente (S).

Para poder obtener este factor se comienza con rellenar el Modelo Digital de Elevaciones en el programa de QGIS en la pestaña de análisis de ráster se utiliza la herramienta de “rellenar sin datos”. Posteriormente en SAGA con la herramienta de “slope” se hace un ráster de la pendiente.

Para poder obtener el factor L se comienza por analizar el factor F en la calculadora ráster con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{\sin\beta / 0.0896}{3(\sin\beta)^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ec. 10}$$



donde  $\beta$  es el ángulo de la pendiente, en este caso sería el ráster de “slope” convertido a radianes. Posteriormente en la calculadora ráster se obtiene  $m$ , que es el exponente de la longitud de la pendiente con la siguiente ecuación:

$$m = \frac{F}{(1 + F)} \quad \text{Ec. 11}$$

Para obtener el factor  $L$  con el área de drenaje aportadora se calcula el ráster en SAGA con la herramienta Análisis de terreno → Hidrología → Acumulación del flujo.

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - X^m \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m}{(22.13)^m} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

$A_{i,j}$  = el ráster de la acumulación del flujo

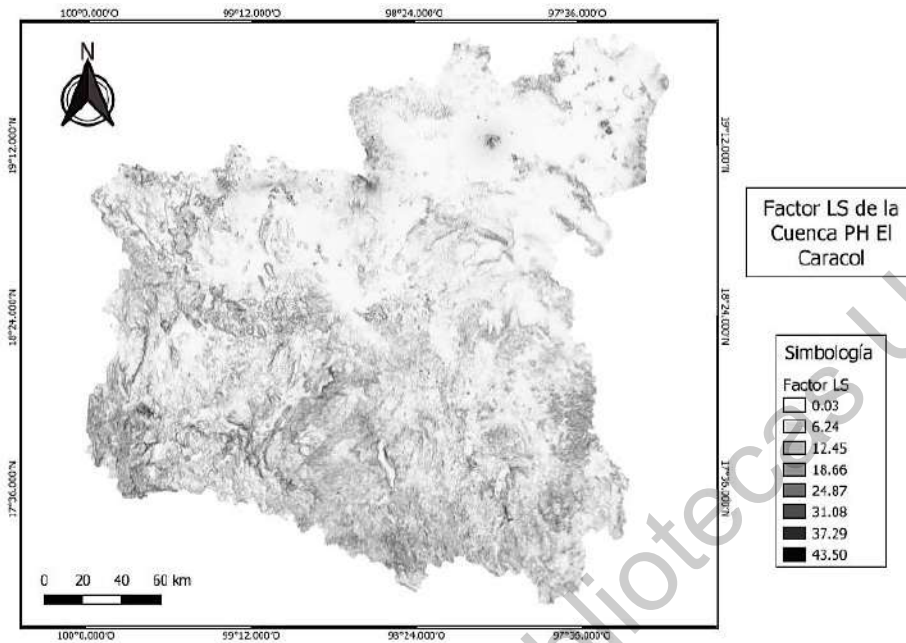
$D$  = el tamaño del pixel

$X$  = es el factor de corrección de forma

Para el factor  $S$  se utiliza la ecuación:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad \text{Ec. 13}$$

Cuando se aplica esta fórmula en la calculadora ráster se debe tomar en cuenta que el ángulo deberá ser convertido a radianes para que pueda ser multiplicado por los demás componentes de las ecuaciones.



**Figura 29. Factor topográfico LS que involucra el efecto de longitud y grado de pendiente, para la cuenca.**

#### 7.4.4 Factor C

El valor de C vale 1 cuando el suelo es totalmente desprotegido y disminuirá a medida que haya una mejor cobertura vegetal sobre el terreno, para un suelo totalmente protegido se tendrá un valor muy cercano a cero.

Para generar el mapa del factor C, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI y se utilizó la tabla de factores para vegetación y/o uso de suelo de acuerdo con Montes-León et al. (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial. En la Tabla 11 se presenta el valor C para cada tipo de vegetación y/o uso de suelo dentro de la cuenca.

**Tabla 11. Valores de C según el Uso de Suelo y Vegetación para la cuenca**

<b>Uso de Suelo y Vegetación</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Factor C</b>
Agricultura	39.2	0.75
Agua	0.2	1.00
Bosque	11.8	0.01
Chaparral	0.5	0.65
Matorral crasicaule	2.5	0.65
Palmar inducido	0.9	0.75
Pastizal cultivado	7.6	0.02
Pradera	0.2	0.05
Área sin vegetación	0.2	1.00
Selva baja caducifolia	2.3	0.50
Zona urbana	2.0	0.01
Vegetación secundaria	32.6	0.35

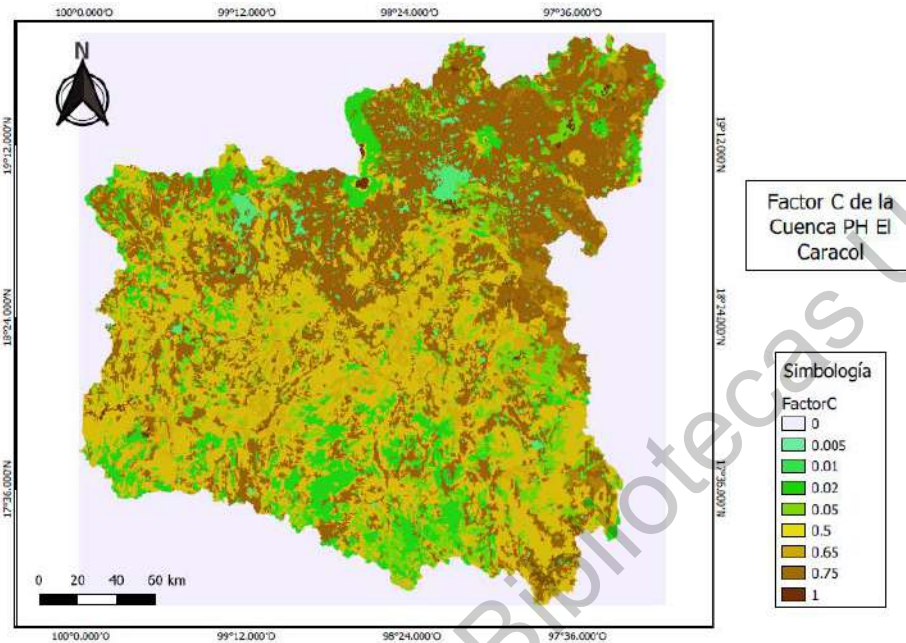


Figura 30. Mapa del factor C que involucra el tipo de cobertura en la cuenca.

#### 7.4.5 Factor P

Este factor indica el efecto de las prácticas de conservación contra la erosión como pueden ser terrazas y cultivo en contorno, entre otras. Los valores del factor P son adimensionales (0 - 1). El factor P se considera igual a la unidad interpretándose que no se llevan a cabo prácticas de conservación.

#### 7.4.6 Erosión

Una vez que se obtuvieron cada uno de los factores que conforman la USLE, se realizó el producto, como lo establece la ecuación USLE para obtener la erosión hídrica. Para estimar la erosión se realizó la multiplicación de los mapas en QGIS de los factores R, K, LS y C (Figura 31).

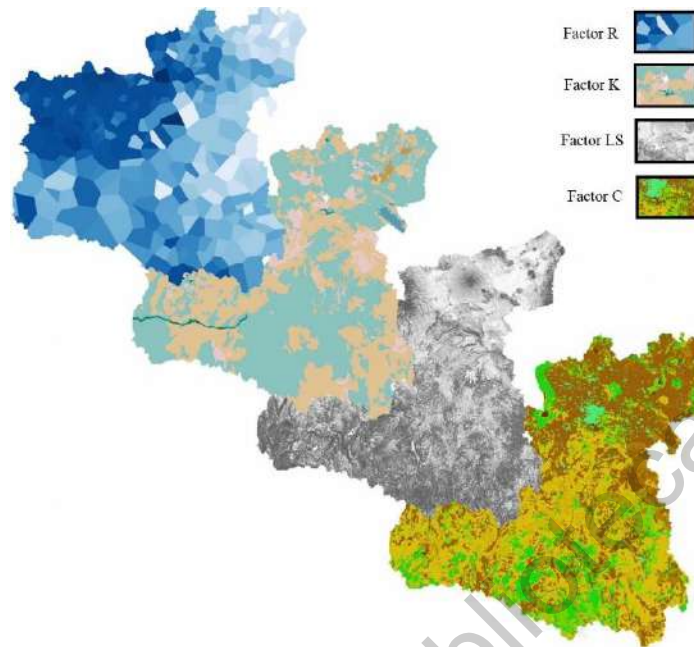


Figura 31. Multiplicación de los factores para el cálculo de la erosión.

### 7.5 Determinación de los diámetros característicos de los sedimentos del río Balsas

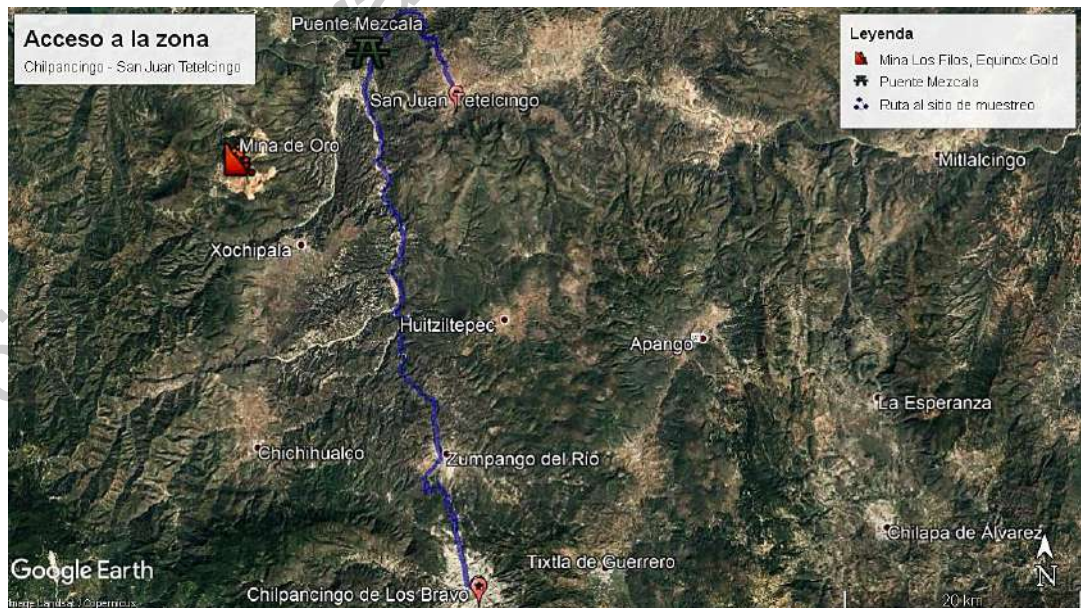


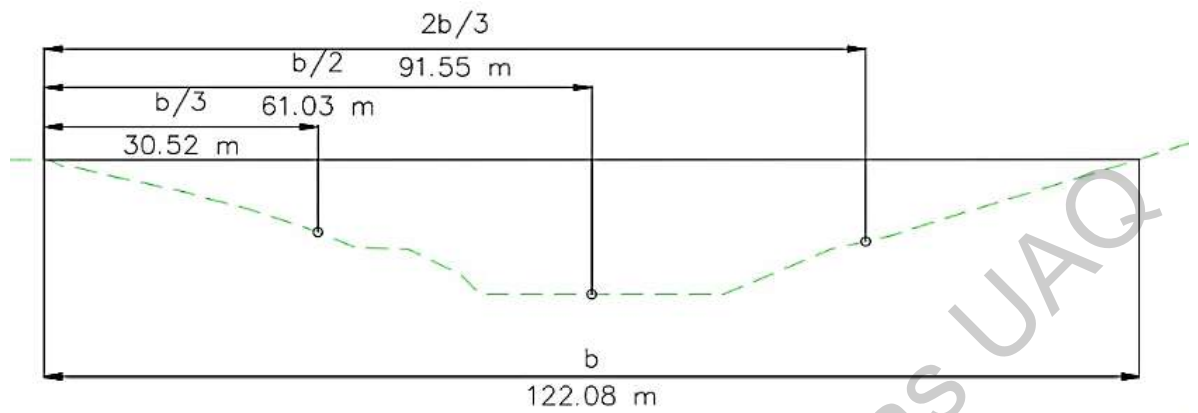
Figura 32. Acceso a la zona del sitio de muestreo

Para acceder a las zonas de muestreo saliendo de la capital del estado de Guerrero, Chilpancingo de los Bravo. Posteriormente se toma la salida México 95 hacia Iguala, se cruza el puente Mezcala para después continuar por la carretera Mezcala- San Agustín Oapan hasta llegar a San Juan Tetelcingo donde se encuentra la estación hidrométrica de la CFE. El trayecto es un total de 74 km aproximadamente, pero por las condiciones de la carretera para llegar se toma un tiempo de 1 hora y 30 minutos aproximadamente (Figuras 32 y 33).



**Figura 33. Sitio de muestreo de sedimento**

Las muestras de sedimento se toman de una sección recta donde se dividirá la base a cada tercio y se tomarán las muestras en cada tercio (Figura 34).



**Figura 34. Sección transversal de muestras de sedimento para granulometría**

Los materiales y equipo necesarios para la recolección de sedimento:

- 2 palas
- Costales con capacidad de 20 kg para transporte
- Mapa o fotografía de la zona de muestreo, con la ubicación tentativa de los puntos de muestreo.
- Instrumento que permita la ubicación de los puntos de muestreo.

Los detalles de procedimiento dependen de factores naturales como el tamaño de corriente, morfología, condiciones de flujo y la distribución del tamaño de partícula del lecho del río.

Para poder tomar las muestras a cada tercio se tuvo que cruzar en una canastilla al otro extremo del río, debido a su ancho. En el Anexo 3 se encuentran imágenes del sitio en las fechas que se realizó el muestreo.

### **7.7 Análisis de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

Se analiza la dinámica de los ecosistemas ribereños en tramos del río aguas arriba y aguas abajo del embalse "El Caracol", utilizando imágenes Landsat TM y

ETM + correspondientes a principios de primavera (marzo-abril) para el período de 1985 -2018 de la subcuenca Caracol que es la que abarca el área del embalse y el río balsas aguas arriba y aguas debajo de este. El análisis se establece mapeando la dinámica del NDVI como un indicador de las áreas afectadas por la migración de la vegetación y la erosión de los márgenes.

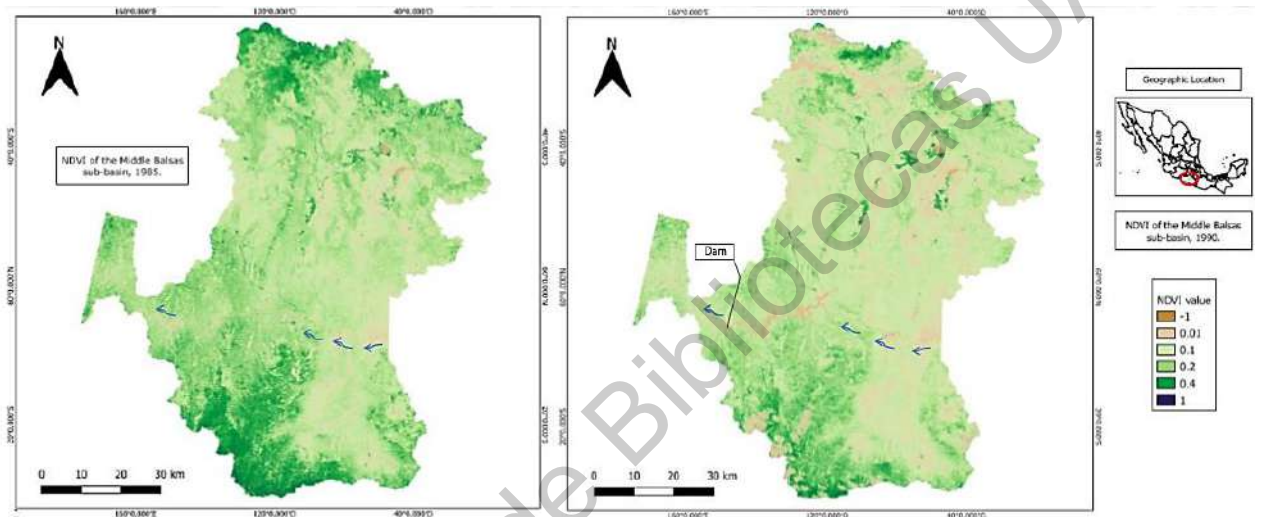


Figura 35. Dinámica de NDVI para antes y después del embalse de la subcuenca Caracol, periodo 1985-1990.

Tabla 12. Porcentaje de superficie de cambio de NDVI, periodo 1985-1990

	NDVI	Porcentaje de superficie de la subcuenca	
		1985	1990
<b>Cuerpo de agua/ sin vegetación</b>	< 0.01	8.10%	2.70%
<b>Vegetación muy baja</b>	0.01 - 0.1	12.40%	33.50%
<b>Vegetación baja</b>	0.1 - 0.2	46.70%	47.90%
<b>Vegetación media</b>	0.2 - 0.4	27.60%	14.50%
<b>Vegetación alta</b>	> 0.4	5.20%	1.50%
	TOTAL	100%	100%



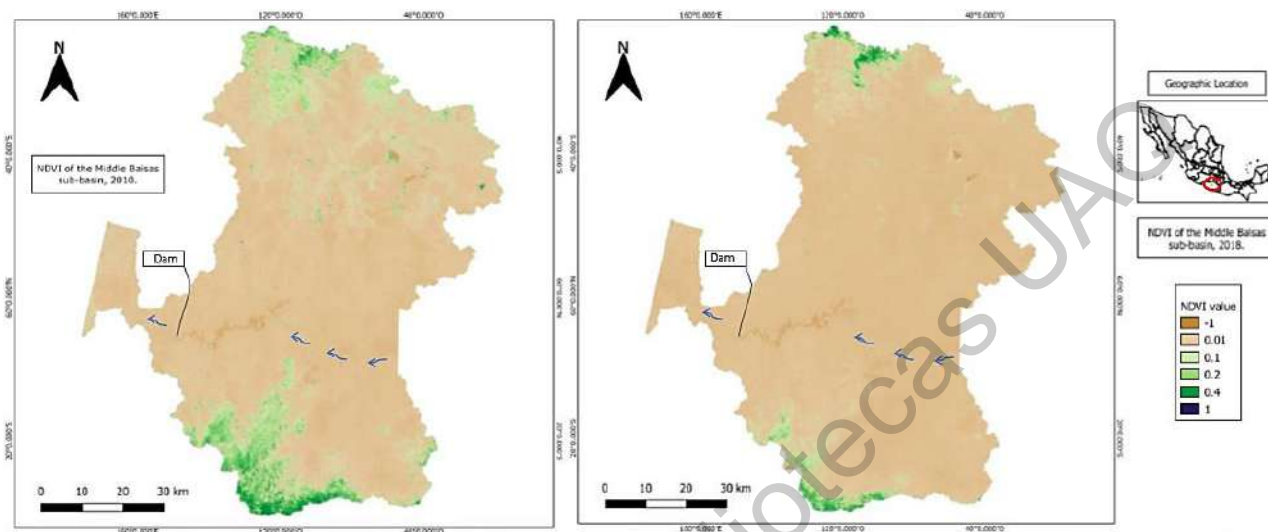


Figura 36. Dinámica de NDVI para después del embalse de la subcuenca Caracol, periodo 2010 - 2018

Tabla 13. Porcentaje de superficie de cambio de NDVI, periodo 2010 -2018

	Porcentaje de superficie de la subcuenca		
	NDVI	2010	2018
<b>Cuerpo de agua/ sin vegetación</b>	< 0.01	81.10%	93.50%
<b>Vegetación muy baja</b>	0.01 - 0.1	8.90%	3.20%
<b>Vegetación baja</b>	0.1 - 0.2	5.40%	1.70%
<b>Vegetación media</b>	0.2 - 0.4	4.10%	1.40%
<b>Vegetación alta</b>	> 0.4	0.50%	0.20%
	TOTAL	100%	100%

## 7.8 Análisis del cambio de la vegetación ribereña aguas arriba del embalse

Para evaluar los cambios en la vegetación ribereña aguas arriba del embalse, se seleccionan 2 tramos de aproximadamente 4 km de longitud y con secciones a cada 200 metros para obtener áreas de vegetación para diferentes años. Las imágenes satelitales se obtienen de la herramienta Google Earth Pro. Se seleccionan las imágenes que tengan mejor visibilidad y sin presencia de nubes. Las secciones y las áreas se obtienen con ayuda de la herramienta Auto-CAD.

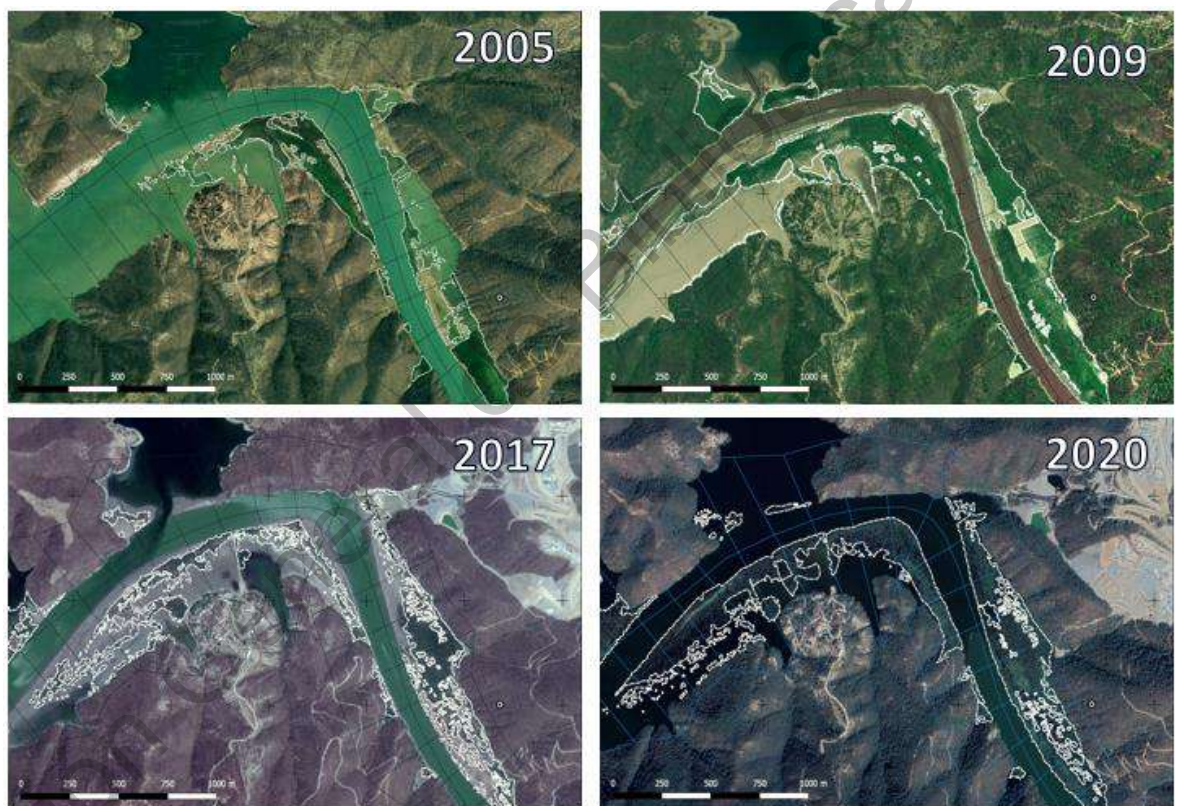


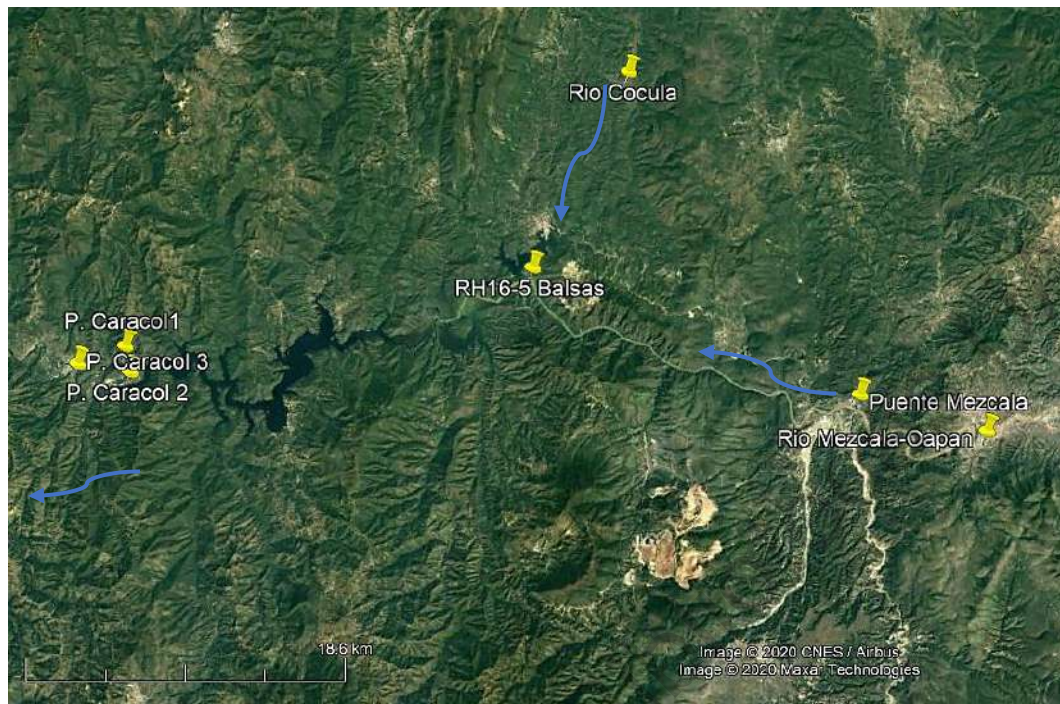
Figura 37. Tramo a la entrada del embalse seccionado a cada 200 metros para evaluar los cambios en la superficie de la vegetación ribereña.



**Figura 38. Tramo aguas arriba del embalse en la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo seccionado a cada 200 metros para evaluar los cambios en la superficie de la vegetación ribereña.**

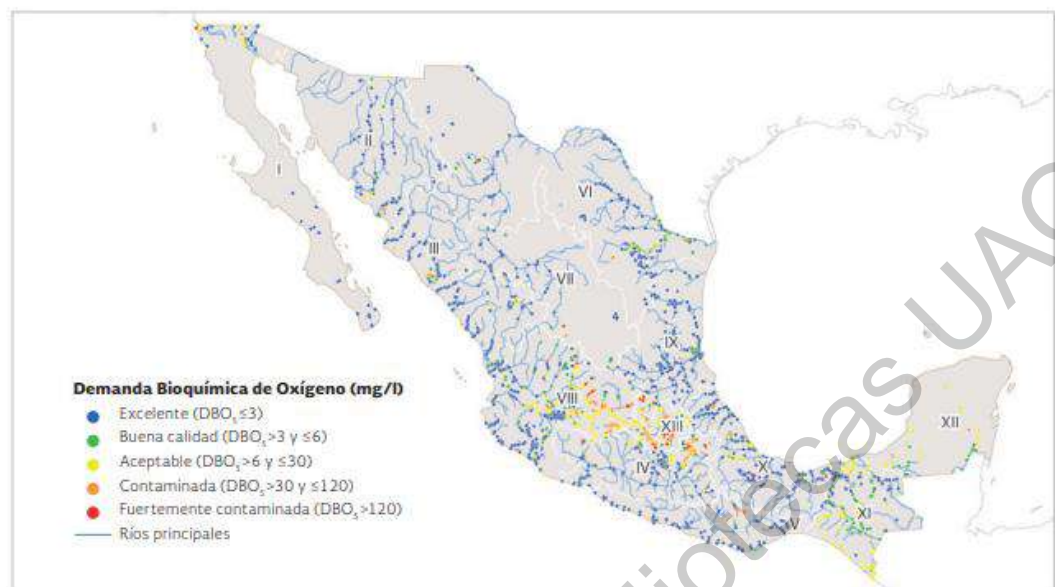
### **7.9 Análisis de nutrientes y materia orgánica aguas arriba y aguas abajo del embalse**

Para poder hacer este análisis se utilizan los sitios de monitoreo para aguas superficiales, 4 sitios arriba del embalse, 2 sitios que se encuentran en el río Balsas, 1 sitios que se encuentran en el río Cocula y otro sitio que se encuentra a la entrada del embalse. Aguas abajo se utilizaron 3 sitios de monitoreo (Figura 39).



**Figura 39. Sitios de monitoreo de interés aguas arriba y aguas abajo del embalse**

En la página de CONAGUA en el Sistema Nacional de Información del Agua se encuentra una Red de Monitoreo de Calidad del Agua para la evaluación de aguas superficiales en diferentes estaciones que se encuentran sobre los ríos más importantes en México, esto para el periodo 2012-2019. Para esta evaluación se utilizan tres indicadores principales. La Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días para medir la materia orgánica biodegradable (Figura 40), la Demanda Química de Oxígeno para medir la materia orgánica ocasionada por descargas de aguas residuales industriales y los Sólidos Suspendidos Totales que tiene su origen en las aguas residuales y erosión del suelo.



**Figura 40. Mapa de la Red Nacional de Monitoreo para aguas superficiales donde se muestran todas las estaciones sobre los ríos principales que miden la Demanda Bioquímica de Oxígeno para el año 2017. (Comisión Nacional del Agua, 2018)**

Además de los datos antes mencionados, también se pudieron descargar en un archivo de Excel algunos parámetros como indicadores de degradación ambiental.

**Tabla 14. Información descargada en archivo Excel de parámetros indicadores de degradación ambiental**

<b>Clave parámetro</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad medida</b>
N_NH3	Nitrógeno Amoniacal	mg/L
N_NO2	Nitrógeno de Nitritos	mg/L
<b>N_NO3</b>	<b>Nitrógeno de Nitratos</b>	<b>mg/L</b>
N_ORG	Nitrógeno Orgánico	mg/L
N_TOT	Nitrógeno Total (Cálculo)	mg/L
N_TOTK	Nitrógeno Kjeldahl	mg/L
P_TOT	Fósforo Total	mg/L
<b>PO4_TOT</b>	<b>Fosfatos Totales (a partir de P total)</b>	<b>mg/L</b>
ORTO_PO4	Fósforo Reactivo total (o-fosfatos)	mg/l

<i>pH_CAMPO</i>	<i>Potencial de Hidrógeno</i>	<i>UpH</i>
<i>OD_%</i>	<i>Oxígeno Disuelto_%</i>	<i>% Saturación</i>
<i>OD_mg/L</i>	<i>Oxígeno Disuelto</i>	<i>mg/L</i>
<i>TEMP_AGUA</i>	<i>Temperatura agua</i>	<i>°C</i>
<i>CAUDAL_M3</i>	<i>Caudal_m<sup>3</sup></i>	<i>m<sup>3</sup>/s</i>

## 7.10 Dinámica del cambio de uso de suelo

Para la clasificación de cobertura y uso de suelo a través de clasificación supervisada debido a la gran superficie que abarca la cuenca de estudio, se trabajó con 4 imágenes pertenecientes al sensor TM del satélite Landsat 5 para el año 1990 y 4 imágenes del sensor ETM del satélite Landsat 7 para el año 2010. Las imágenes se obtuvieron del servidor de USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Este sensor tiene 7 bandas multiespectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo, con una resolución de 30 metros y solo con 120 metros la banda del infrarrojo térmico. Además de una resolución temporal de 16 días. Las imágenes seleccionadas para la serie temporal se encuentran en la proyección UTM (Universal Transversal Mercator) zona 14 N, las cuales corresponden a principios de primavera (marzo-abril).

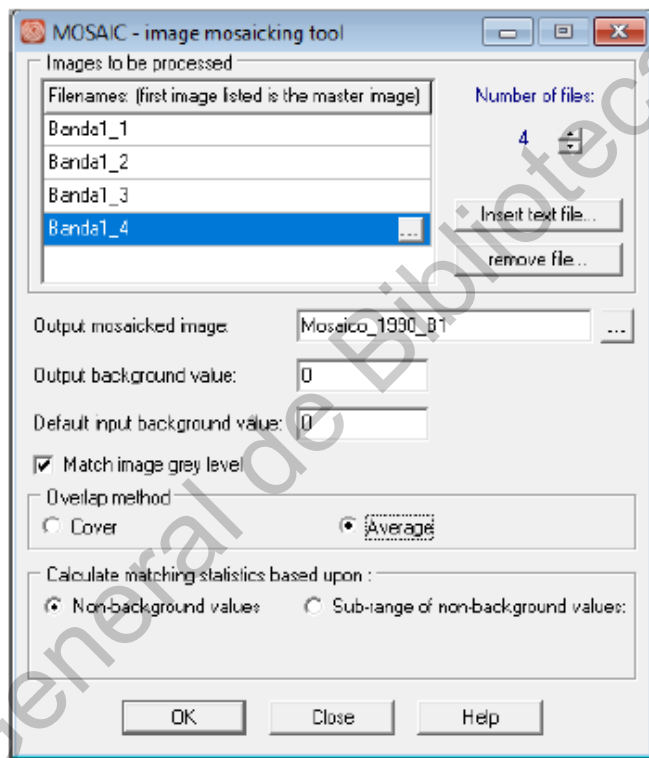
Cada imagen se corrigió por distorsión geométrica y la radiancia para la interferencia atmosférica. Estas correcciones mejoraron la capacidad de comparación entre imágenes tomadas de diferentes fechas de adquisición.

**Tabla 15. Características de las imágenes satelitales utilizadas**

Path	Row	Fechas
26	48	11/03/1990 - 18/04/2010
26	47	18/03/1990- 01/03/2010
25	48	11/03/1990- 27/04/2010
25	47	11/03/1990- 10/03/2010

El primer paso consiste en importar las imágenes Landsat al programa TerrSet con ayuda del módulo GEOTIFF/TIFF (conversión GeoTIFF a Idrisi).

Esto se hace para cada una de las 8 imágenes en total. Posteriormente para poder hacer la clasificación de la cuenca se debe hacer un mosaico para cada banda de las 4 imágenes descargadas por año. Esto se hace con ayuda del módulo MOSAIC.



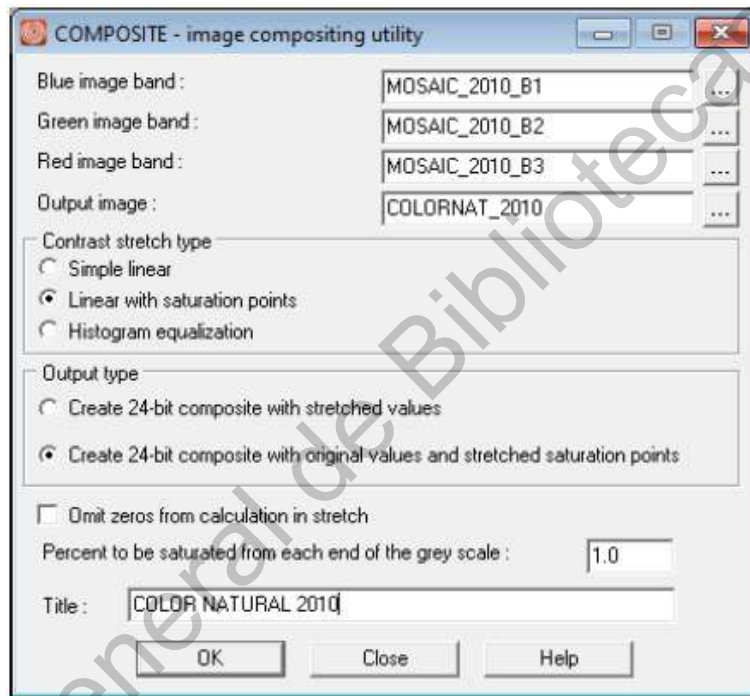
**Figura 41. Cuadro de módulo MOSAIC**

Para importar un archivo tipo shape del polígono que delimita la cuenca y posteriormente realizar el recorte al mosaico, utilizamos el módulo SHAPEIDR (conversión Shapefile/Idrisi), e indicamos el sistema de referencia UTM, bajo la cual se encuentra nuestra cuenca.

Para crear la composición de color natural, utilizando el módulo COMPOSITE, permite crear una imagen compuesta de tres bandas dependiendo del tipo de satélite. En este caso se utilizaron las siguientes:

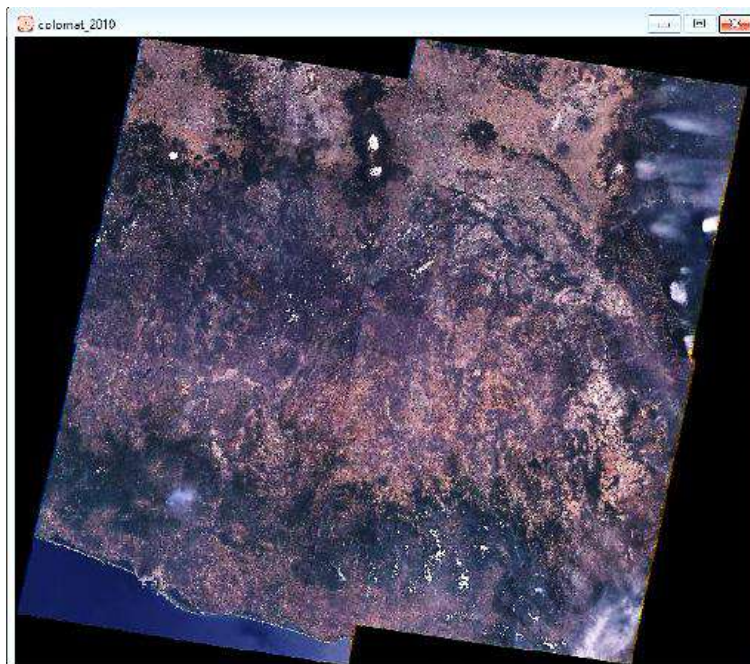
**Tabla 16. Bandas para composición de color natural**

	<i>Landsat 7</i>	<i>Landsat 5</i>
<i>Banda azul</i>	<i>Banda 2</i>	<i>Banda 1</i>
<i>Banda verde</i>	<i>Banda 3</i>	<i>Banda 2</i>
<i>Banda roja</i>	<i>Banda 4</i>	<i>Banda 3</i>



**Figura 42. Cuadro de módulo COMPOSITE**





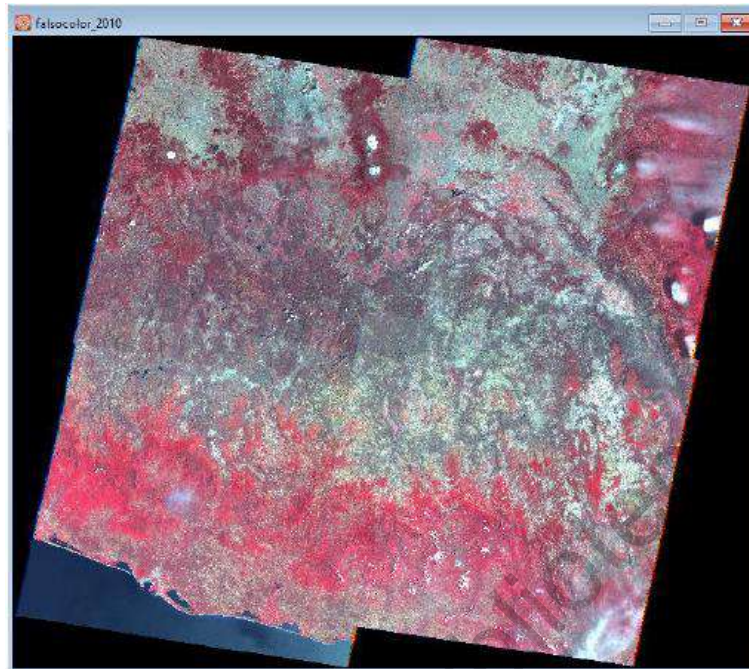
**Figura 43. Composición de color natural para el mosaico**

Se puede observar que la vegetación aparece en diversos tonos de verde, los suelos en colores marrones y el suelo más erosionado en un tono marrón más claro. Esta combinación permite observar detalles en agua poco profundas (turbidez, corrientes, batimetría, plumas de sedimentos, etc.).

Para crear una composición falso color, siguiendo el procedimiento anterior, pero con las siguientes bandas:

**Tabla 17. Bandas para composición de falso color**

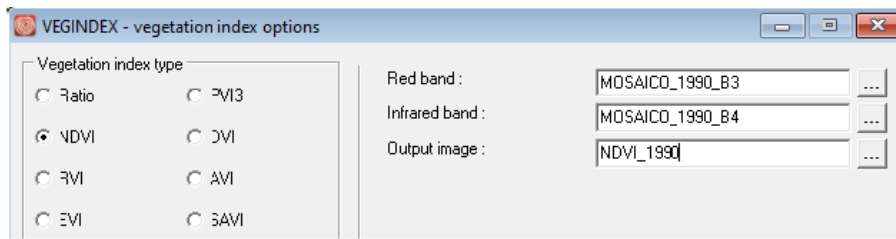
	<b>Landsat 5</b>	<b>Landsat 8</b>
Banda azul	Banda 2	Banda 4
Banda verde	Banda 3	Banda 6
Banda roja	Banda 4	Banda 7



**Figura 44. Composición de falso color para el mosaico**

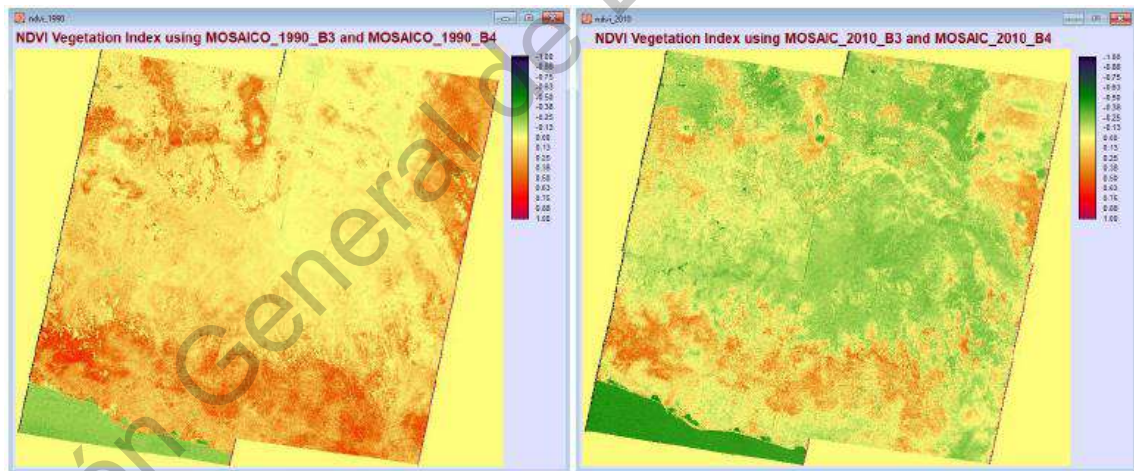
Se puede observar que todos los tonos de rojo, desde el rojo muy oscuro hasta el rosado corresponden a vegetación: los tonos más oscuros se relacionan con la presencia de vegetación densa y los rojos claros corresponden a vegetación poco densa. El celeste corresponde a suelo desnudo, seco o áreas rocosas. El azul-celeste indica zonas urbanas. El azul oscuro a negro se relaciona con cuerpos de agua.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Este índice se crea mediante el módulo VEGINDEX (opciones de índices de vegetación).



**Figura 45. Cuadro del módulo VEGINDEX para el NDVI**

Valores de NDVI menores a 0 indican cuerpos de agua, nubes o suelo sin vegetación. Entre menor más pequeño sea el valor de NDVI indica que la vegetación es muy ligera, en cambio, si el valor de NDVI es mayor a 0.5 hasta 1, nos está indicando una vegetación más densa. En este caso las imágenes de 1990 a 2010 está indicando una pérdida de vegetación densa con un aumento de zonas vegetación perturbada y suelo desnudo.



**Figura 46. Mosaicos de NDVI para los años 1990 y 2010**

El siguiente paso fue utilizar la herramienta SEGMENTATION, la cual agrupa píxeles con rangos similares de valor y les asigna polígonos correspondientes, de acuerdo a la tolerancia asignada será la cantidad de polígonos, la precisión y el tiempo de procesamiento requerido.

Primero hay que crear un ráster group, con las bandas recortadas y el NDVI para cada año en estudio. El resultado nos da una segmentación en ráster y en vector para el mosaico relacionado con la cuenca.

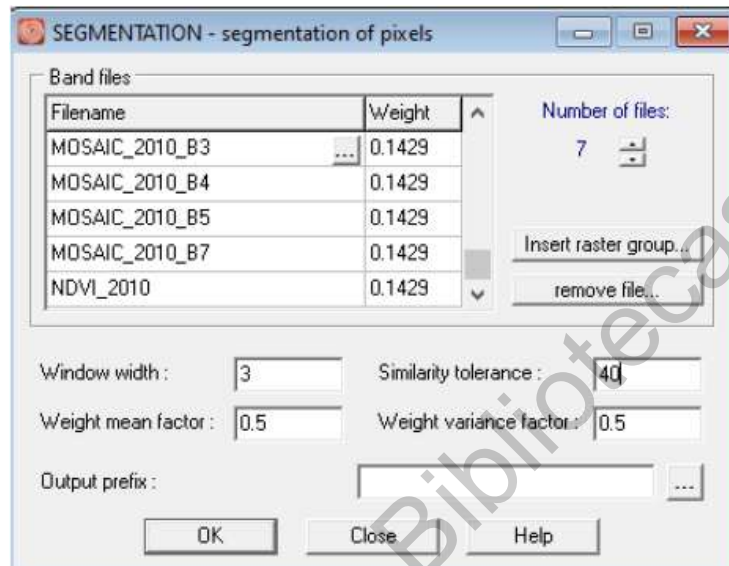


Figura 47. Cuadro del módulo de SEGMENTATION

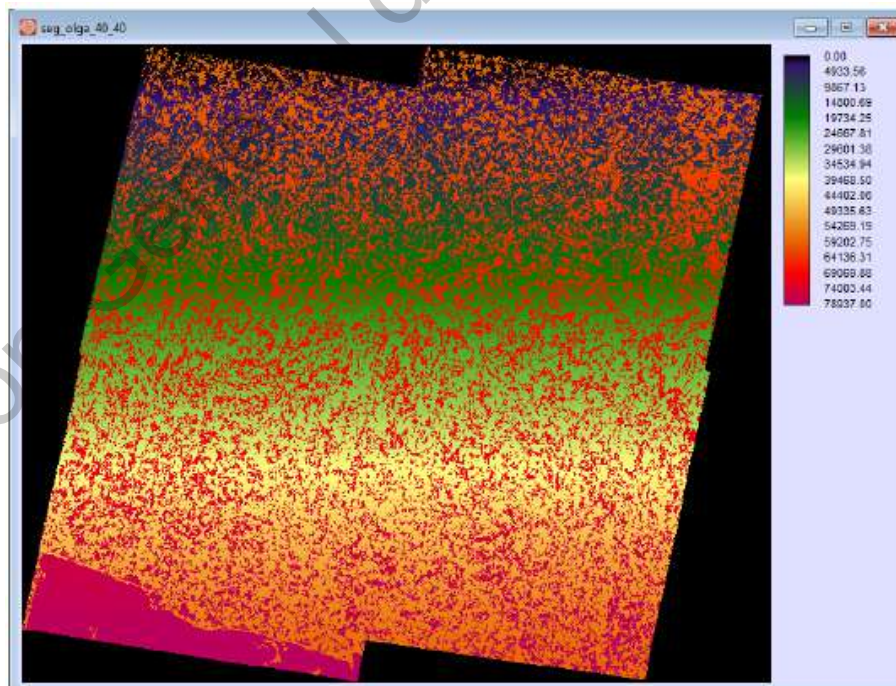


Figura 48. Ráster generado para la segmentación del mosaico

Cuando se han generado las segmentaciones para cada año, procedemos SEGTRAIN (generar archivo de entrenamiento del segmento). Con ayuda de la composición de *color natural* o *falso color* para el fondo, se puede hacer mejor la clasificación escogiendo en este caso los usos de suelo más importantes de la cuenca debido a su tamaño: cuerpos de agua, zona urbana, suelo desnudo, vegetación conservada, vegetación perturbada y algunas nubes que se encuentren para evitar la confusión con suelo desnudo o zona urbana. A cada uno se le asigna un color diferente para identificarlo.

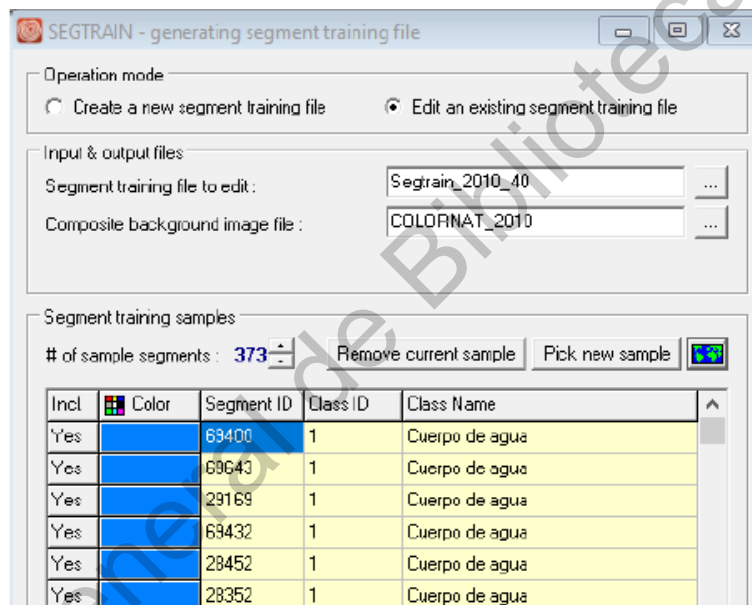





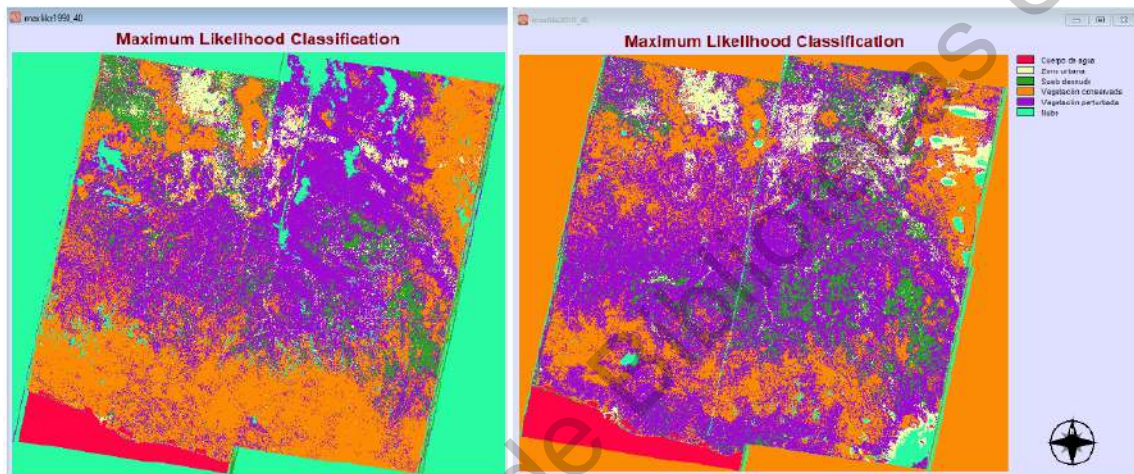


Figura 49. Cuadro del módulo SEGTRAIN

Tabla 18. Colores asignados para identificar cada uso de suelo en SEGTRAIN

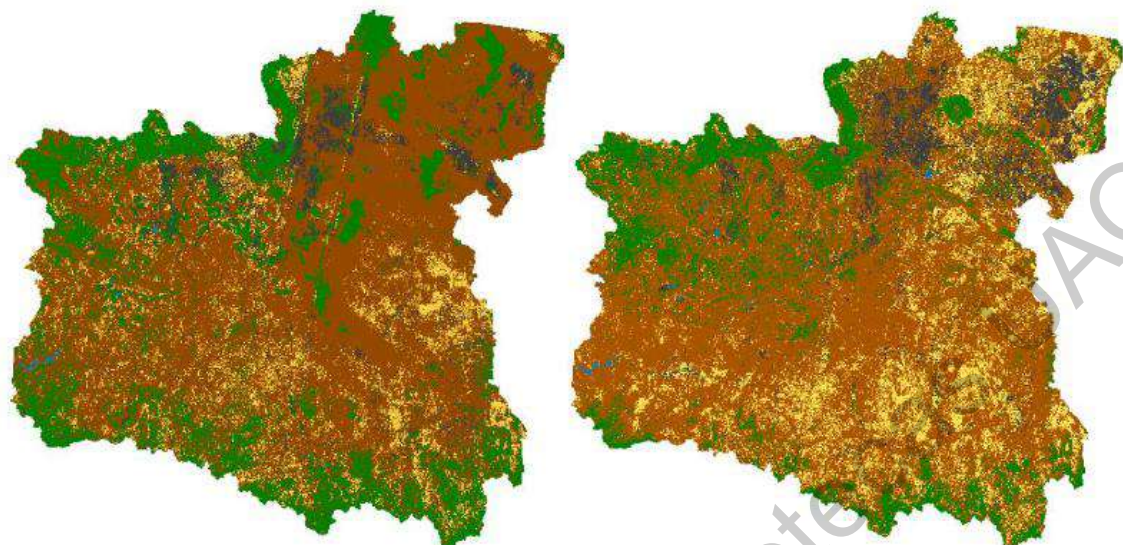
Color	ID	Nombre de la clase
	1	Cuerpo de agua
	2	Zona urbana
	3	Suelo desnudo
	4	Vegetación conservada
	5	Vegetación perturbada
	6	Nubes

El siguiente paso fue realizar la clasificación con el comando MAXLIKE el cual utiliza una función de densidad de probabilidad asociada a un sitio particular de muestreo. Este tipo de clasificador también se conoce como clasificador Bayesiano el cual incorpora el Teorema Bayesiano utilizando prioridades de probabilidad a cada clase existente. Una vez clasificados los mosaicos se procede a cortar el mosaico con la máscara de la cuenca.



**Figura 50. Clasificación de los mosaicos de 1990 y 2010.**

Una vez clasificados los mosaicos se procede a cortar el mosaico con la máscara de la cuenca y crear una nueva paleta de colores para identificar cada uso de suelo en el mapa final (Figura 51).



**Figura 51. Cambio de uso de suelo para 1990 y 2010.**

Se calcula el área para cada uso de suelo (en este caso en km<sup>2</sup>), dando clic derecho sobre la imagen ya clasificada y después dar clic en calcular áreas (Tablas 19 y 20).

**Tabla 19. Superficie de la cuenca para el año 1990**

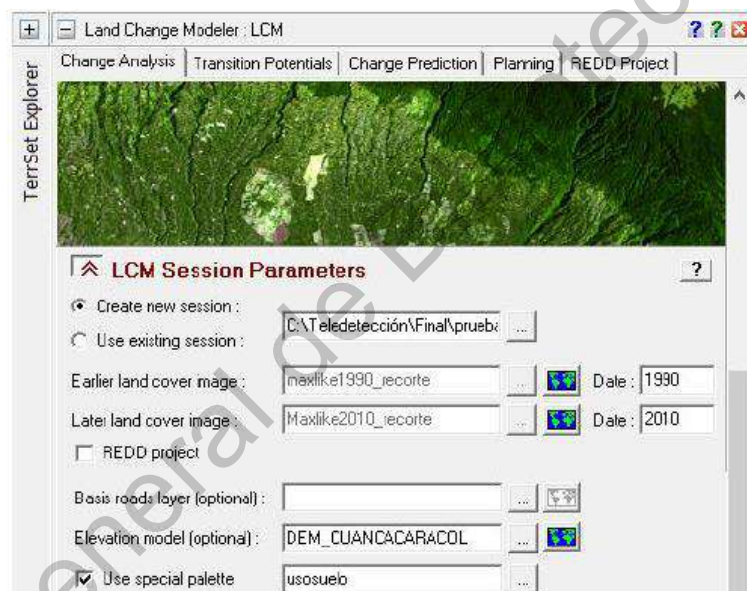
Uso de suelo	km <sup>2</sup>	%
Cuerpo de agua	115.9	0.21
Zona urbana	3562.91	6.34
Suelo desnudo	5385.2	9.59
Vegetación conservada	11695.09	20.82
Vegetación perturbada	35401.36	63.04
Total	56160.46	100

**Tabla 20. Superficie de la cuenca para el año 2010**

Uso de suelo	km <sup>2</sup>	%
Cuerpo de agua	129.49	0.23
Zona urbana	4672.83	8.32
Suelo desnudo	8319.18	14.81
Vegetación conservada	8100.19	14.42

Vegetación perturbada	34938.76	62.21
Total	56160.46	100

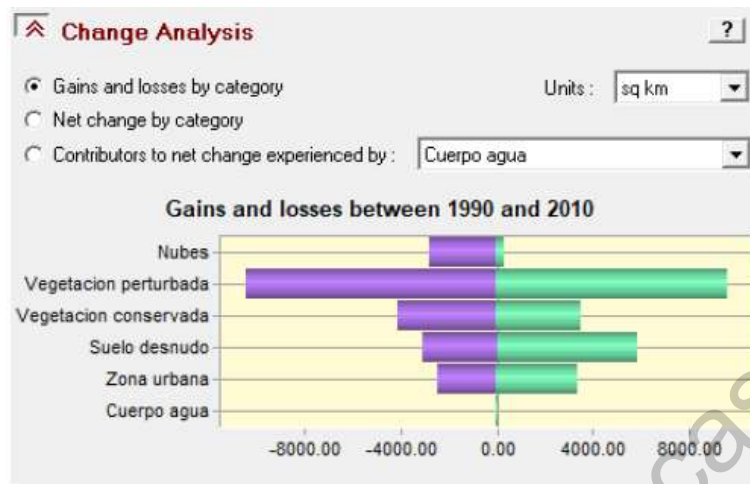
Una vez obtenidos los dos usos de suelos para los años 1990 y 2010 se procede a utilizar el módulo Land Change Modeler (Figura 52) que modela el potencial de cambio entre dos escenarios, pidiendo como información de entrada la asignación de suelo previamente obtenida. De manera opcional se puede utilizar información de vialidades existentes y el modelo digital de elevaciones.



**Figura 52. Cuadro del módulo Land Change Modeler**

Se puede obtener la ganancia y pérdida de área entre los dos escenarios, mostrada en la siguiente grafica para tener una mayor comprensión.





**Figura 53. Pérdidas y ganancias de uso de suelo entre 1990 y 2010**

Para la obtención de una predicción del crecimiento urbano para el año 2025 se utiliza la herramienta Transition Potentials que agrupa las transiciones entre dos mapas de cobertura del suelo en un conjunto de submodelos donde cada submodelo se identifica con un conjunto de variables que pueden explicar el crecimiento de la zona urbana.

Las variables utilizadas en el modelo son variables cuantitativas y fueron las siguientes:

- DEM: El modelo digital de elevaciones se descargó del portal de INEGI, con un tamaño del píxel de 30\*30. Este archivo se descarga en formato Ráster y se recorta al tamaño de la cuenca.
- Distancia a carreteras: Para esta variable, se descargó del portal de INEGI el archivo vectorial de carreteras para toda la república mexicana, posteriormente se seleccionaron las carreteras más importantes, se recortó para el área de la cuenca y se hizo la conversión de vectorial a ráster, todo esto con ayuda de QGIS. Posteriormente en Terrset se convierte este ráster a booleano con ayuda de Image calculator insertando la imagen ráster y haciendo la expresión  $> 0$ . Por último, se utiliza el módulo DISTANCE que

calcula una distancia Euclideana verdadera de cada píxel hasta el grupo de celdas objetivos más cercano.

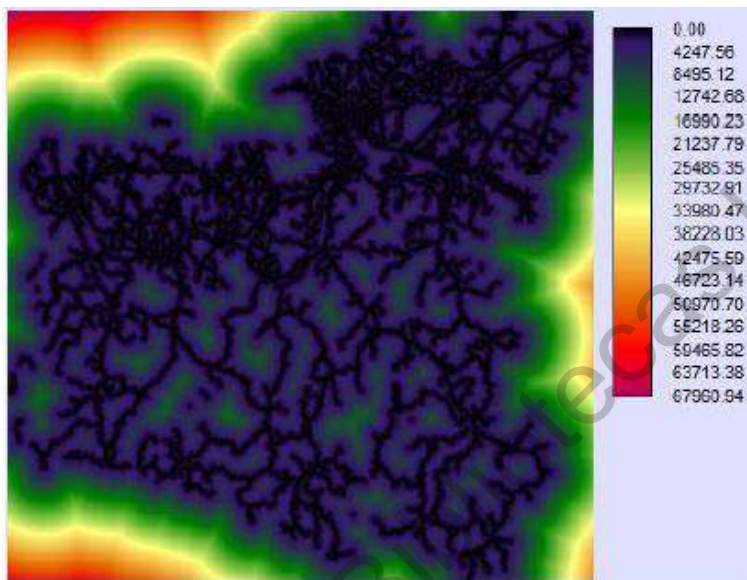


Figura 54. Mapa de distancia a carreteras en Terrset

- Distancia a Ríos: Para la obtención de esta variable se siguieron los mismos pasos utilizados para la variable de carreteras.

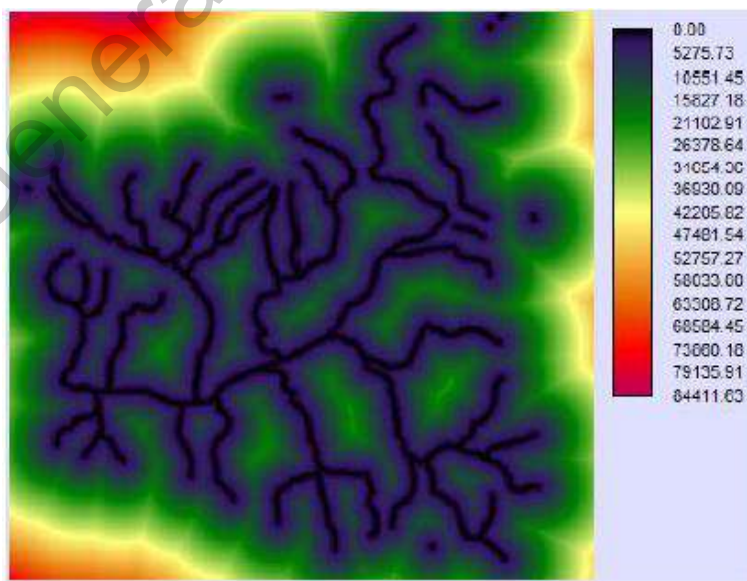
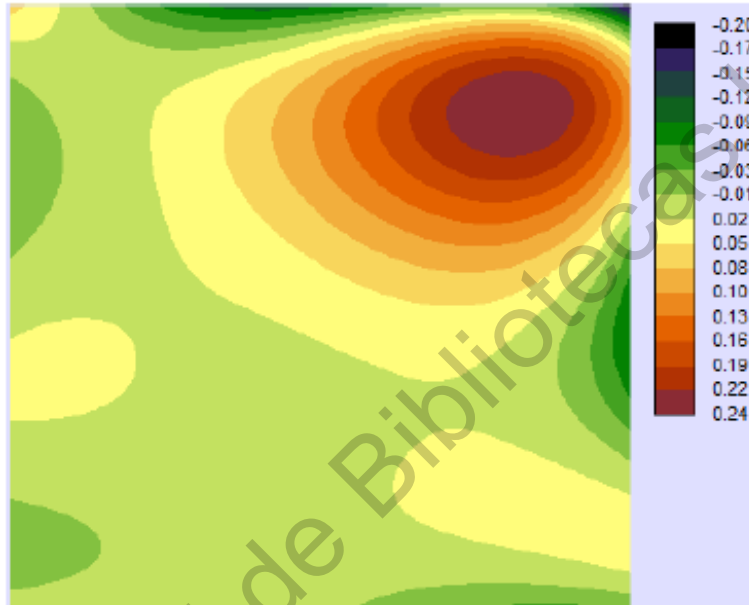


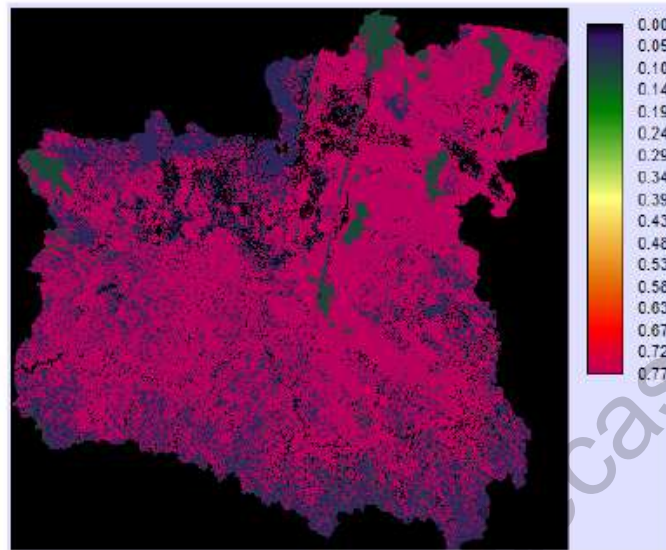
Figura 55. Mapa de distancia a ríos en Terrset

- 5th Spatial Trend: Para esta variable se utilizó la herramienta Spatial Trend of Change del software TerrSet, esta es una herramienta de tendencia polinómica que se ajusta mejor al patrón de cambio. Se utilizó el 5th orden por ser el que mejor resultados presenta.



**Figura 56. Mapa 5TH Spatial tren**

- Evidence Likelihood: Esta variable se obtuvo con ayuda de la herramienta Variable Transformation Utility para esta herramienta se requieren de dos mapas, un mapa booleano de áreas que han pasado por la transición que se obtiene del Change Maps y el mapa de uso de suelo del año 1990.



**Figura 57. Mapa Evidence likelihood en Terrset**

Con ayuda del Test and Selection of Site and Driver Variables, se hace una prueba rápida del poder explicativo potencial de una variable. Una V de Cramer alta indica que el valor explicativo potencial de la variable es bueno. Si el valor de V de Cramer para cada variable es menor de 0.15, la variable se descarta, de lo contrario, si es mayor a 0.15 la variable se utiliza para la predicción, en este caso la variable a descartar fue la de cuerpos de agua.

Ya analizadas las variables se procede a utilizar la herramienta Run Transition Sub-Model en la cual se implementa el modelado real de los submodelos de transición, se debe correr el modelo en varias ocasiones hasta obtener una tasa de precisión de preferencia al 80%, para así crear los mapas de potencial de transición.

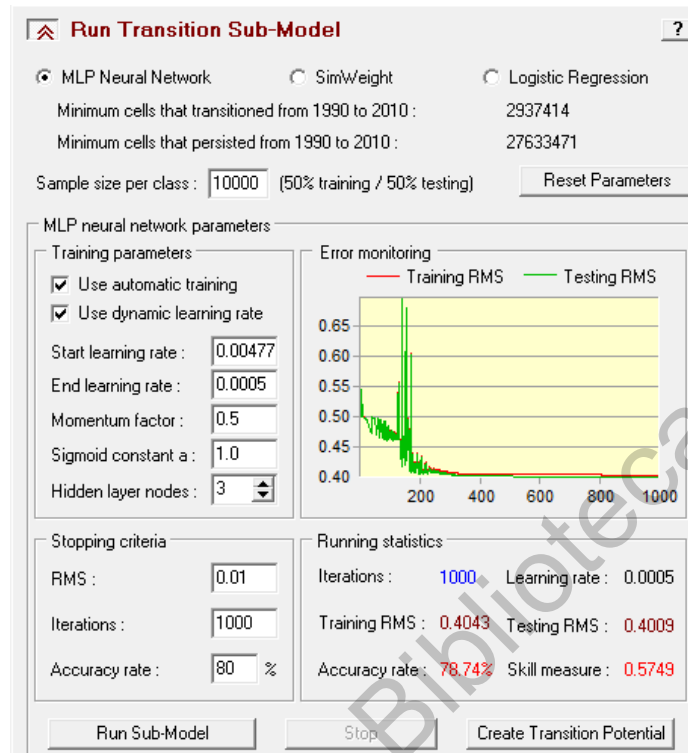


Figura 58. Cuadro del módulo Run Transition Sub- Model en Terrset

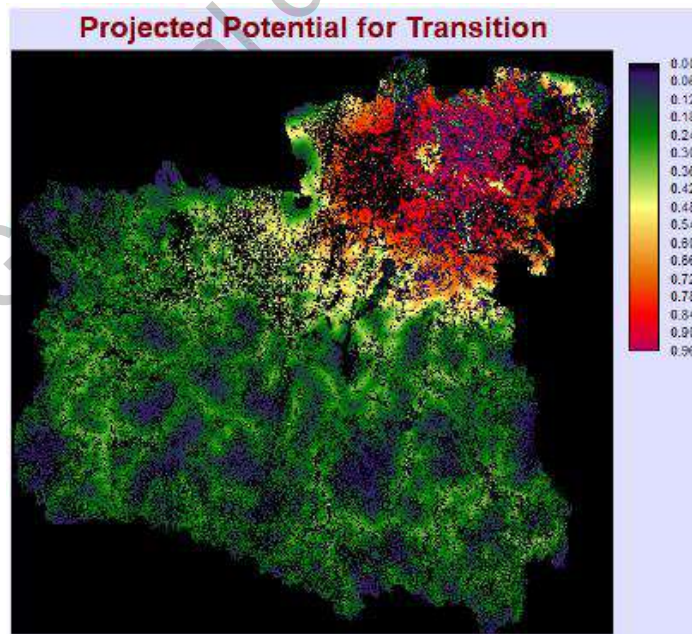


Figura 59. Mapa de potencial de transición en Terrset

Enseguida se utiliza la herramienta Change Demand Modeling la cual calcula exactamente la cantidad de cambios que se espera que pase de la fecha posterior a la fecha de predicción en función de una proyección de los potenciales de transición hacia el futuro, en este caso se pretende obtener una predicción para el año 2025. Por último, se utiliza la herramienta Change Allocation, esta herramienta parametriza e inicia el proceso de predicción real.

### **7.11 Gestión sustentable de la sedimentación**

Es necesario obtener la información relevante que se requiere para tomar decisiones que permitan manejar los sedimentos de manera sustentable.

Algunos requisitos clave en el proceso de toma de decisiones para el manejo de sedimentos a escala de cuenca incluye (Owens P. N., 2008):

1. Identificar los impulsores de la gestión de sedimentos, en otras palabras ¿por qué es necesario gestionar los sedimentos?
2. Contar con información ambiental espacial adecuada sobre las características de la cuenca. Esta información puede incluir datos sobre características geográficas físicas (por ejemplo, delimitación de la cuenca, elevación, geología, tipo de suelo, cobertura y uso de suelo e hidrología), emisiones de contaminantes difusas y de fuentes puntuales y datos de seguimiento (por ejemplo, calidad del agua).
3. Usar herramientas apropiadas para reunir la información y los datos relevantes necesarios para toma de decisiones. Las herramientas de apoyo ayudan a quienes toman las decisiones a identificar problemas relevantes y tomar las acciones apropiadas. Las herramientas de SIG para recopilar información sobre la dinámica de los sedimentos y contaminantes han sido de gran importancia en esta parte.
4. Para poder seleccionar las herramientas adecuadas y obtener información necesaria depende de las preguntas de gestión que se hagan: ¿Cuáles son

las principales fuentes de sedimentos y contaminantes? ¿Dónde están ubicados en la cuenca? ¿Cómo afectará una opción de gestión en particular (como el dragado) los flujos de sedimentos futuros en la cuenca?

5. Las técnicas de monitoreo de agua sedimentos, análisis de imágenes satelitales, así como mapas de erosión hídrica, proporcionan gran parte de la información básica que requieren muchos de los otros aspectos del proceso de toma de decisiones.
6. Identificar las fuentes, vías y procesos de transporte de sedimentos y contaminantes dentro de la cuenca de interés. Esta es una necesidad primordial para la gestión de sedimentos sustentable y eficaz, al proporcionar una comprensión de cómo se está comportando el sistema de sedimentos y contaminantes, y es un requisito central para el control de fuentes como una opción de gestión
7. El análisis de costo-beneficio social son herramientas específicas que se pueden utilizar para evaluar diversas opciones de gestión disponibles.
8. La participación de las partes interesadas, como parte del proceso de gestión de sedimentos para toma de decisiones. Esto se reconoce ahora como una parte importante de la gestión ambiental cuando hay varias partes interesadas, a menudo con intereses y objetivos en conflicto, y cuando hay varias opciones de gestión disponibles. La gestión futura de los sedimentos, ya sea en sitios específicos o en la escala de la cuenca del río, tendrá que incorporar los puntos de vista, los intereses y las perspectivas de los diversos interesados.
9. Una vez que se ha tomado una decisión sobre qué acción de gestión tomar debe implementarse un marco de tiempo que sea apropiado para esa acción. En el caso de una acción en un sitio específico, como el dragado de un embalse, podría hacerse con una rapidez razonable y a una velocidad determinada por la deposición de sedimentos, y la acción requeriría días o meses. En el caso de la decisión de controlar la erosión generalizada del

suelo, esta opción es solo el comienzo de un proceso largo y complejo que puede requerir años para su implementación. También está la opción de no realizar ninguna acción, porque puede que no exista la comprensión necesaria del sistema o que ninguna sea la adecuada debido a esta falta de comprensión. Aunque también puede ser que no se requiera ninguna acción porque el sistema podría corregirse naturalmente.

10. Aprender de las experiencias de otros debería representar una etapa importante en el proceso general de toma de decisiones. Una de las mejores formas de evaluar el éxito probable de un enfoque o acción de gestión en particular es observar los casos en los que se ha utilizado este, o algo similar, y aprender de su éxito o fracaso.

La gestión de sedimentos se trata de equilibrar los riesgos y los objetivos, se debe recordar que las decisiones se basarán en los datos disponibles y que el manejo de sedimentos es solo una parte de una estrategia general de manejo de cuencas.

## **8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **8.1 Parámetros asociados a la cuenca**

Los resultados obtenidos en el análisis morfométrico se dividieron en cuatro conjuntos de parámetros: 1) Parámetros morfométricos generales, 2) Parámetros asociados a la forma de la cuenca, 3) Parámetros asociados a la forma del relieve y 4) Parámetros asociados a la red de drenaje.

En los parámetros morfológicos generales se obtuvo el área, perímetro, longitud y ancho de la cuenca, los cuales se muestran en la tabla 1. Según Campos (2002), de acuerdo con el área se considera una cuenca muy grande ( $> 5000 \text{ km}^2$ ) y los valores de longitud y ancho sugieren una gran capacidad de coleccionar agua.



**Tabla 21. Parámetros morfométricos generales**

Parámetro	Símbolo	Expresión	Valor
Perímetro (Km)	P		1720.25
Área (Km <sup>2</sup> )	A		56500.98
Longitud de la cuenca (Km)	LC		348.70
Ancho de la cuenca (Km)	AC	$AC = \frac{A}{LC}$	162.03

Los parámetros asociados a la forma de la cuenca se muestran en la Tabla 20, donde el factor de forma describe una forma ligeramente ensanchada (Horton, 1945), el coeficiente de compacidad describe que es una cuenca de forma oval – oblonga rectangular y el coeficiente de circularidad describe que la cuenca se denota de forma alargada. Estos parámetros demuestran una tendencia alargada de la cuenca lo cual implica una baja susceptibilidad a las avenidas. El parámetro de relación de elongación obtenido está asociado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno, esto significa que se pueden generar pérdidas de suelo en las partes altas de la cuenca de manera que provoquen cambios en la morfología del terreno aguas abajo (Campos, 1992).

**Tabla 22. Parámetros asociados a la forma de la cuenca**

Parámetro	Símbolo	Expresión	Valor
Factor de forma (Horton)	Kf	$Kf = \frac{A}{LC^2}$	0.46
Coeficiente de compacidad (Gravelius)	Kc	$Kc = \frac{0.282 * P}{\sqrt{A}}$	2.04
Relación de Elongación	Re	$Re = \frac{1.1284 * \sqrt{A}}{LC}$	0.77
Coeficiente de circularidad	Cc	$Cc = 4\pi \frac{A}{P^2}$	0.24

Los parámetros asociados al relieve (Tabla 23), indican la cota máxima y mínima, con respecto al nivel del mar, y el desnivel de la cuenca y del cauce principal. El desnivel de la cuenca se puede interpretar como un indicador del relieve, el cual corresponde a un relieve muy fuerte, que está compuesto por montañas. El desnivel del cauce principal con relación con su longitud, se obtiene la pendiente media, para este caso se tiene una pendiente baja lo que genera una concentración mayor de agua.

**Tabla 23. Parámetros asociados a la forma del relieve**

Parámetro	Valor
Longitud del cauce principal (Km)	452.32
Cota Máxima (Cauce principal) (m.s.n.m.)	2140.17
Cota Mínima (Cauce principal) (m.s.n.m.)	396.46
Cota Máxima (Cuenca) (m.s.n.m.)	5047
Cota Mínima (Cuenca) (m.s.n.m.)	397.04
Desnivel altitudinal (Cauce principal) (m)	1743.71
Desnivel altitudinal (Cuenca) (m)	4649.96
Altitud media (Cuenca) (m.s.n.m.)	1770.594
Pendiente media del cauce principal	0.01028024

Los resultados de los parámetros (Tabla 24), presentan valores bajos en densidad de drenaje, frecuencia de drenajes y coeficiente de torrencialidad, esto aunado a los valores de la pendiente media del cauce principal y el tiempo de concentración, supone que se presentan bajas velocidades de desplazamiento del agua, lo que podría generar un aumento en moderado en las corrientes.

**Tabla 24. Parámetros asociados a la red de drenaje**

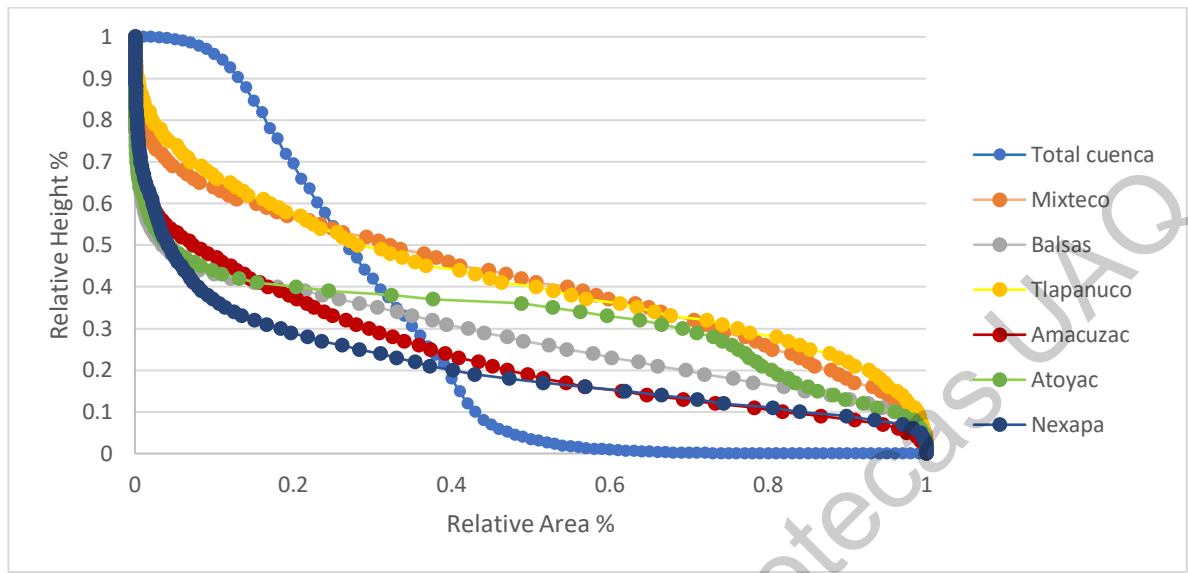
Parámetro	Símbolo	Expresión	Valor
Orden de la cuenca	Oc		6

Longitud del cauce principal (Km)	LCP		452.32
Longitud total drenajes (Km)	Ltd		6170.03
Densidad de drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	Dd	$Dd = \frac{Ltd}{A}$	0.11
Frecuencia de drenajes	F	$F = \frac{\sum Nu}{A}$	0.01
Coefficiente de torrencialidad	Ct	$Ct = \frac{\#corrientes\ orden\ 1}{A}$	0.01
Pendiente media del cauce principal (m/m)	Sc	$Sc = \frac{Desnivel\ cauce}{LCP * 1000}$	0.00385504
Tiempo de concentración (Horas)	Tc	$Tc = 0.066 \left( \frac{LCP}{\sqrt{Sc}} \right)^{0.77}$	62.18

La determinación de los parámetros de forma, relieve y red de drenaje fue de gran importancia para interpretar el comportamiento hidrológico y comprender su incidencia ante la presencia de externalidades, como pueden ser las precipitaciones y avenidas extremas (Cruz Romero, Gaspari, Rodríguez Vagaría, Carrillo González, & Téllez López, 2015)

## 8.2 Curva hipsométrica

Con los parámetros asociados al relieve se determinó la curva hipsométrica, la cual relaciona la altitud con el área que cambia a través del tiempo en la medida que la cuenca sufre los efectos de la erosión. Para este caso, se muestra que la cuenca se encuentra en un estado sedimentaria o en una fase de vejez, lo que significa que es una cuenca erosionada.



**Figura 60. Curvas hipsométricas para la cuenca y para las subcuencas**

De acuerdo con las curvas hipsométricas de las subcuencas, se puede observar que dinamismo debido a su gran extensión territorial, ya que abarca subcuencas de montaña donde se presenta mayor dinamismo en la erosión y para las subcuencas de planicie donde ocurre mayor deposición de sedimentos.

### 8.3 Análisis de la sedimentación con datos batimétricos

De acuerdo con los datos obtenidos de batimetrías realizadas por la CFE de la presa Carlos Ramírez Ulloa se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 25. Erosión específica de acuerdo con los datos batimétricos**

Erosión específica Ton/km <sup>2</sup>	
1986-1992	86.94
1986-2011	63.58
1986-2018	55.98

## P.H. El caracol

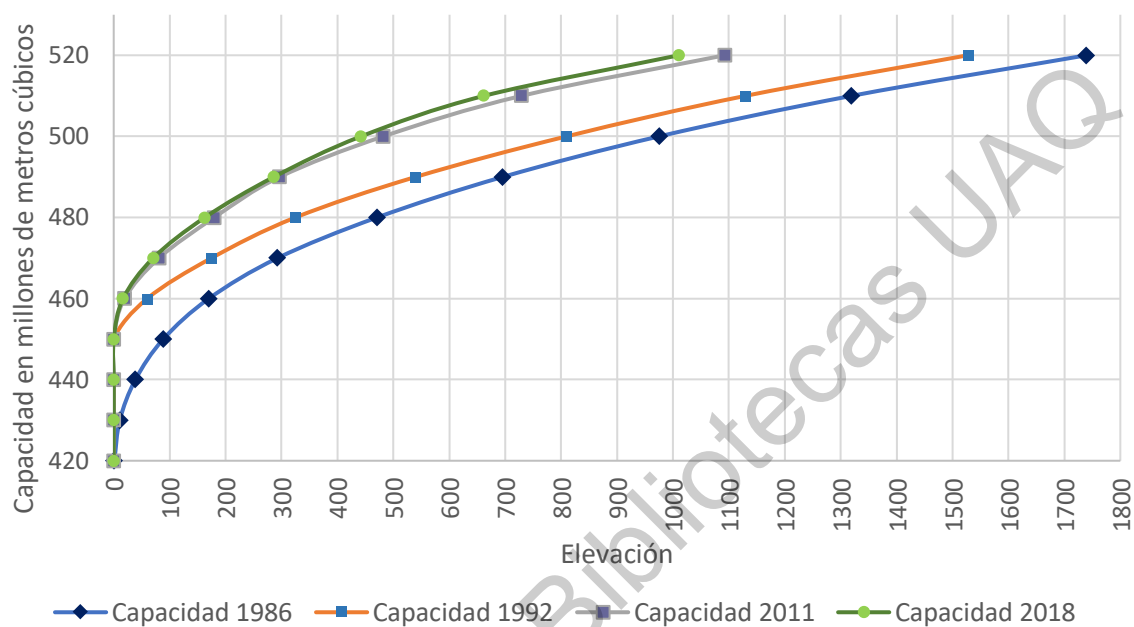


Figura 61. Capacidad de almacenamiento de la presa para los años 1986, 1992, 2011 y 2018.

Tabla 26. Pérdida de capacidad de almacenamiento de la presa en porcentaje, 1986-2018.

	1986-1992	1992-2011	1986-2011	1986-2018
	<b>Pérdida de capacidad de almacenamiento</b>			
420	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
430	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
440	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
450	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%
460	64.8%	32.3%	88.6%	90.12%
470	40.3%	46.3%	72.3%	75.88%
480	31.0%	55.3%	61.8%	65.39%
490	22.4%	55.0%	57.3%	58.82%
500	17.0%	59.5%	50.6%	54.65%

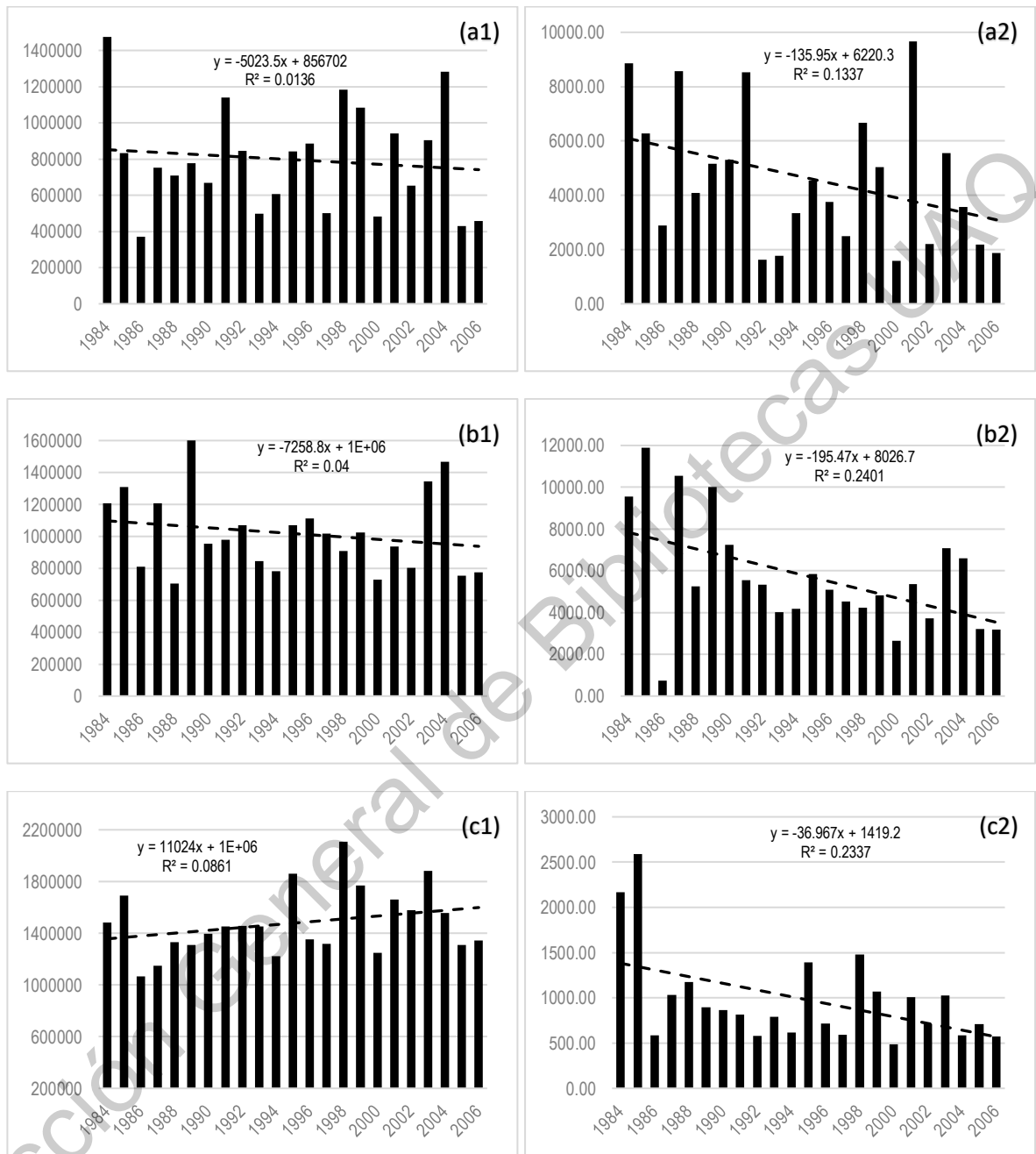
510	14.4%	64.6%	44.7%	49.81%
520	12.2%	71.5%	37.2%	41.91%
<b>Total</b>	<b>54.7%</b>	<b>71.3%</b>	<b>73.9%</b>	<b>76.1%</b>

En la tabla se observa una disminución de almacenamiento del vaso desde la fecha en que fue puesta en operación la presa hasta la batimetría actual, esto probablemente debido a la erosión de los materiales y por ser de las primeras en un sistema de presas sobre el cauce del río Balsas. Otros factores podrían haber sido los fenómenos climatológicos del año 2013.

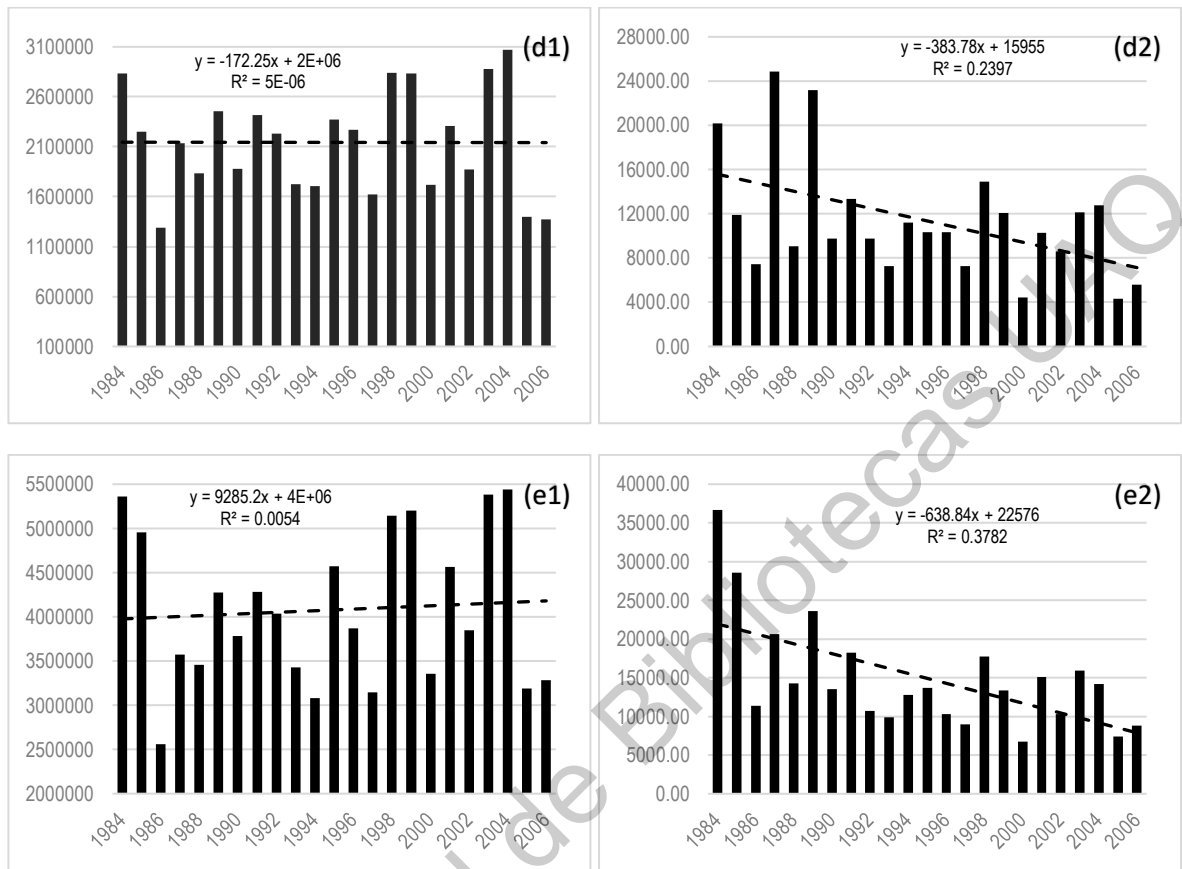
La tasa de erosión específica en 30 años fue de 56 ton / km<sup>2</sup>. Estos procesos contribuyen a la disminución de la capacidad de almacenamiento debido a la deposición de sedimentos, reducen la generación de energía y el control de inundaciones, además de alteraciones en el entorno aguas abajo y aguas arriba, principalmente en el embalse. Se dio una pérdida de capacidad de almacenamiento de más del 70% en 30 años, justo antes de alcanzar la vida útil.

#### **8.4 Análisis de volúmenes de escurrimiento y sedimentos**

De acuerdo con los datos de las estaciones hidrométricas de la CFE, se observa que las pendientes de cambio son insignificantes en los escurrimientos y que tienen el mismo comportamiento la pendiente en todas las estaciones, por tanto, podemos considerar que no hay cambios en los patrones de lluvia. Por el contrario, las pendientes de cambio de los volúmenes de sedimentos en todas las estaciones tienen el mismo comportamiento decrecientes, indicador de que hay una disminución en la tasa de erosión (Figuras 62 y 63).



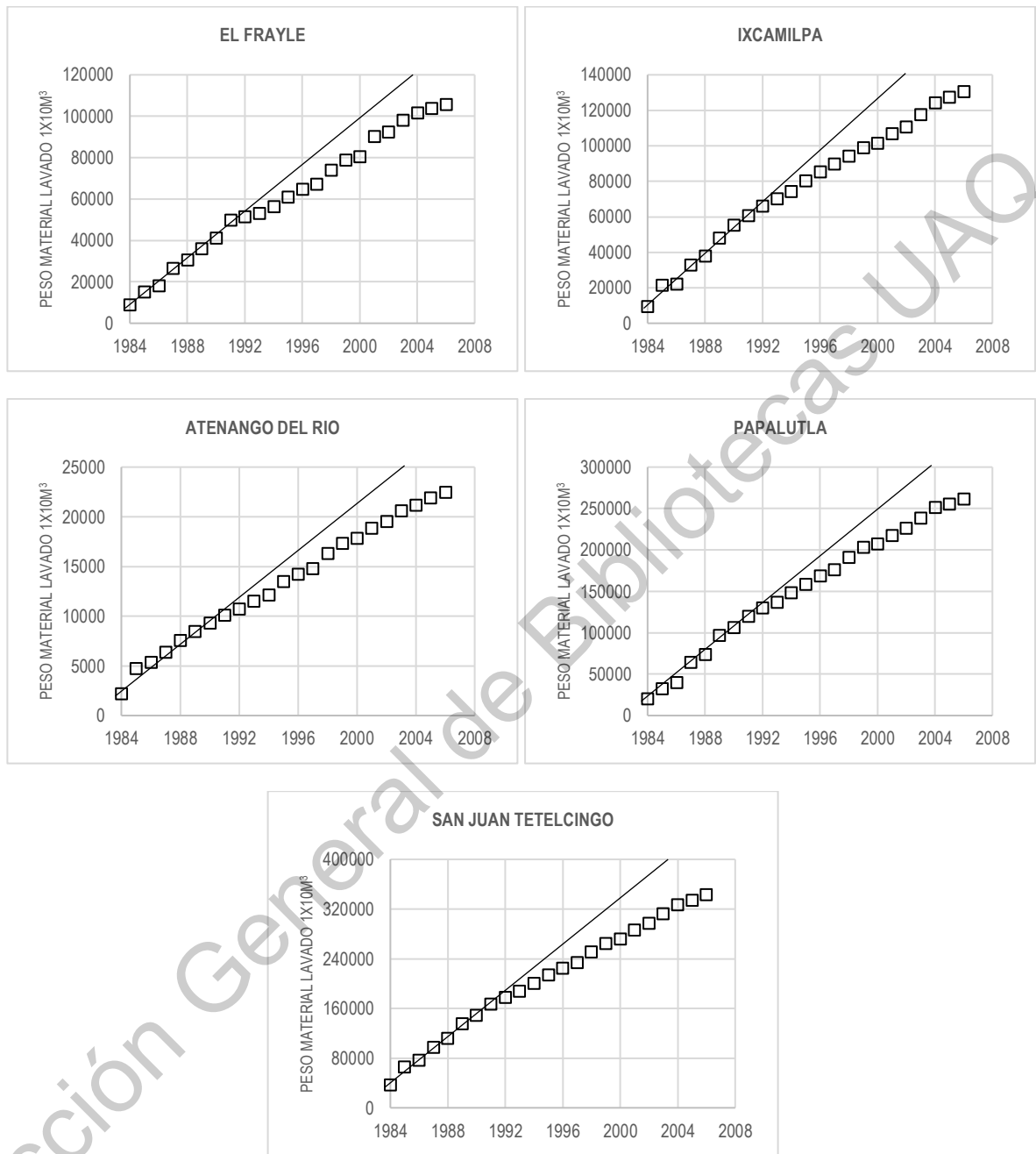
**Figura 62. Volúmenes en miles de m<sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: a1. Esgurrimiento El Frayle; a2. Sedimentos El Frayle; b1. Esgurrimiento Ixcamilpa; b2. Sedimentos Ixcamilpa; c1. Esgurrimiento Atenango del río; c2. Sedimentos Atenango del río.**



**Figura 63. Volúmenes en miles de m<sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: d1. Esgurrimiento Papalutla; d2. Sedimentos Papalutla; e1. Esgurrimiento San Juan Tetelcingo; e2. Sedimentos San Juan Tetelcingo**

Otra forma de verificar la tendencia de la erosión a la disminución es de acuerdo con la doble curva masa de las cinco estaciones hidrométricas. Para todas las estaciones se observa que a partir del año 1992 el peso de material de lavado tiende a disminuir con el paso de los años (Figura 64).





**Figura 64. Doble curva masa de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006**

Una intensa precipitación después del año de 1992 pudo haber ocasionado abundantes escurrimientos que siguieron los cauces naturales, buscando el agua su camino hasta desembocar al mar. Esto ocasiona que se arrastre todo tipo de material del suelo (arcilla, arena, rocas).

## 8.5 Erosión laminar de la cuenca

A continuación, se muestran los mapas de Erosión Hídrica para las subcuencas donde se obtuvo el menor y mayor rangos de erosión respectivamente.

La subcuenca Atoyac en donde, de acuerdo con los resultados de la metodología descrita se obtuvo que para el 62.1% del área se encuentra con baja erosión, 14.4 % con erosión media, 7.2 % con erosión considerable, 4.5% con erosión alta, 3.0% con erosión muy alta y un 8.8% expuesto a erosión severa (Figura 65).

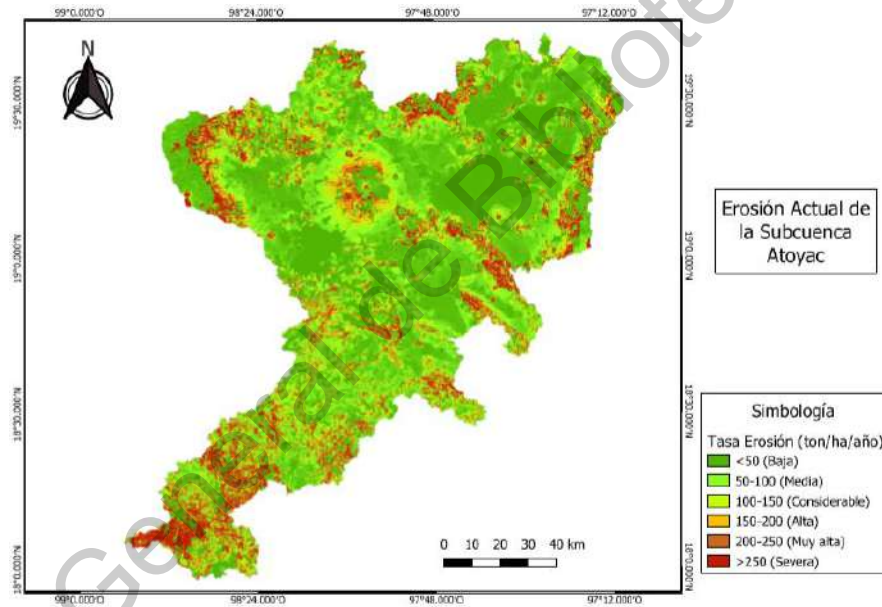
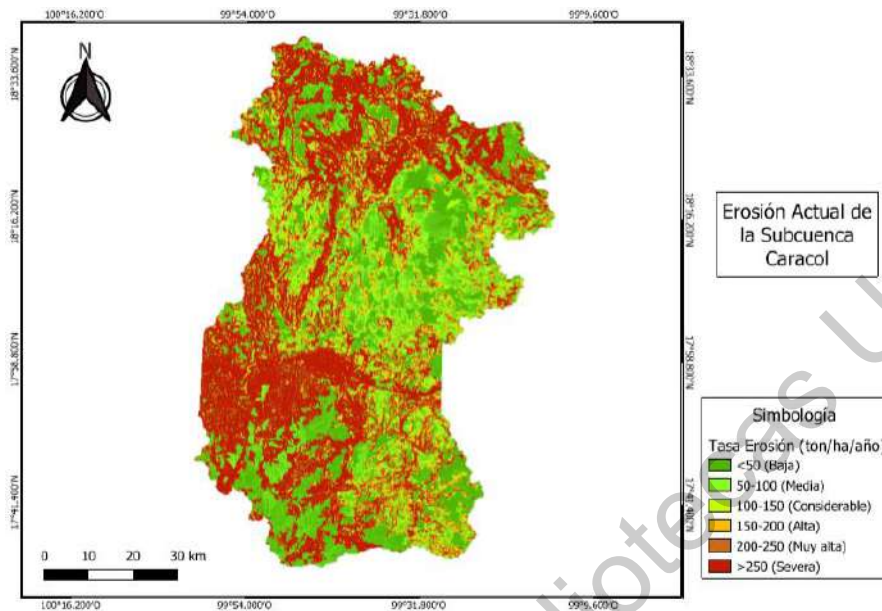


Figura 65. Mapa de erosión de la subcuenca Atoyac

Para la subcuenca Caracol se obtuvo que para el 34.7% del área se encuentra con baja erosión, 10.6 % con erosión media, 7.6 % con erosión considerable, 5.9% con erosión alta, 5.1% con erosión muy alta y un 36.0% expuesto a erosión severa (Figura 66).



**Figura 66. Mapa de erosión de la subcuenca Caracol**

Se puede observar que las zonas en color rojo que indican que hay una erosión severa, es donde se encuentra el embalse de la Presa Hidroeléctrica “El Caracol”. También se observa depósito de material en las barrancas del polígono que ocupa la mina “Media Luna”, las cuales desembocan en el embalse.

En el Anexo 1 se muestran los mapas de erosión de las subcuencas restantes, así como su clasificación del rango de erosión.

Los valores de la erosión obtenidos se dividieron de acuerdo con los Rangos de clasificación de la Erosión Hídrica propuestos por Montes-León et al. (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial (Tabla 27),

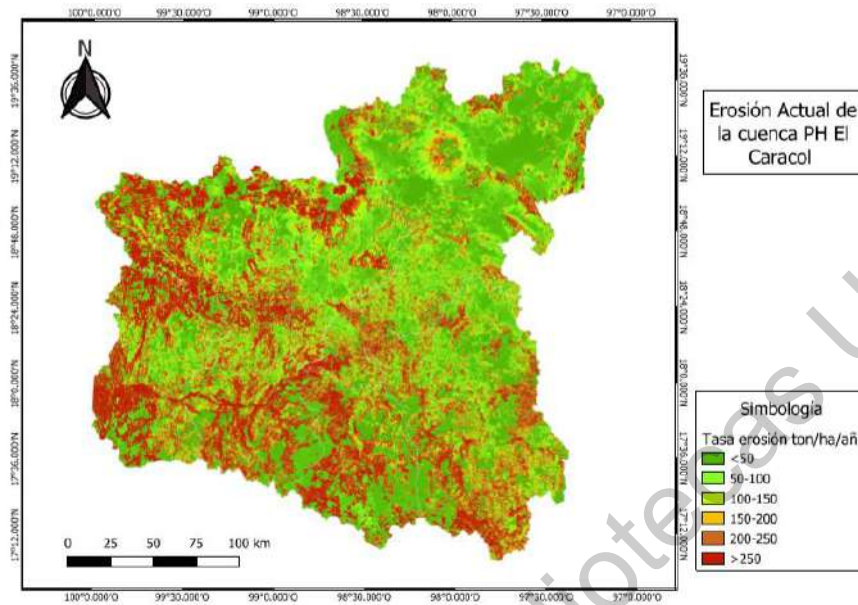


Figura 67. Mapa de erosión para condiciones actuales en la cuenca

Tabla 27. Rangos de clasificación de la erosión hídrica de toda la cuenca

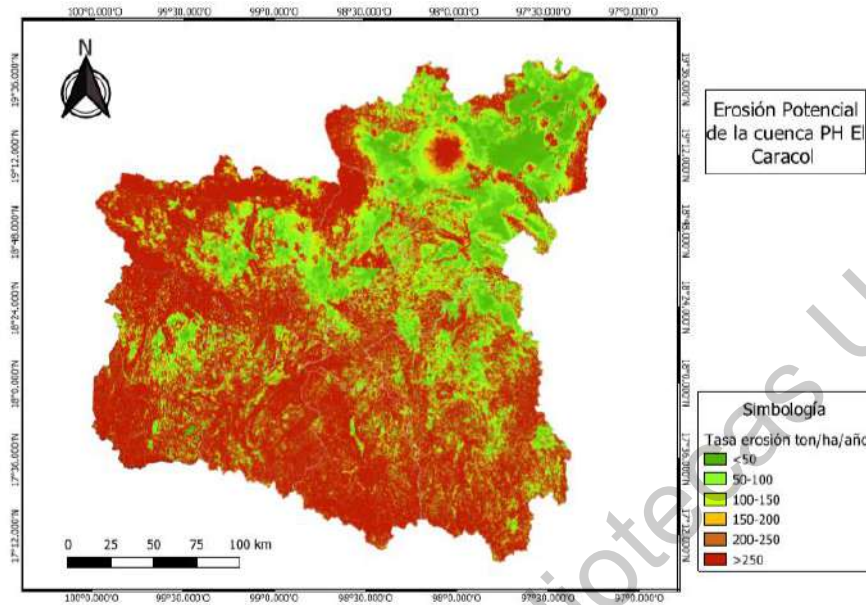
Clasificación	Rango (ton/ha/año)	Área (%)
Baja	< 50	46.4
Medía	50-100	12.9
Considerable	100-150	8.0
Alta	150-200	5.9
Muy Alta	200-250	4.6
Severa	> 250	22.2

Se dice entonces que la mayor parte de la superficie de la cuenca se encuentra expuesta a una baja erosión. Las Subcuencas que presentan mayor erosión son el Balsas, Caracol y Amacuzac con más del 30% de la superficie expuesta a erosión

severa, mientras que la subcuenca Atoyac es la menos erosionada con un 62% de su superficie expuesta a erosión baja.

Al observar los mapas de todos los factores que intervienen para la erosión actual tanto de la subcuenca más erosionada (Caracol) como de la menos erosionada (Atoyac), se pudo observar que el Factor LS fue el factor determinante, ya que en las dos subcuencas no hay demasiada variación de valores para los demás factores. En cambio, en el factor topográfico para la subcuenca menos erosionada (Atoyac) se mostraron valores para la mayoría de la superficie de  $LS < 20$  y para la subcuenca más erosionada (Caracol) se mostraron valores para la mayoría de la superficie de  $10 < LS < 43$ .

La cubierta vegetal constituye el factor potencial más sensible, convirtiéndose en el elemento que más peso aporta en el total. Para el Mapa de erosión potencial se realizó la multiplicación de los factores de precipitación (R), topográficos (LS) y del suelo (K) sin tomar en cuenta el de la vegetación. Este mapa dará pie a identificar las zonas que serían más susceptibles de sufrir el problema de la erosión y donde pueden implementarse planes de conservación para mitigar este efecto.



**Figura 68. Mapa de erosión potencial en la cuenca**

Para el periodo de análisis de los escurrimientos no se observó algún aumento o disminución significativo, por otro lado, la erosión medida por las estaciones si se observó una disminución significativa en cada una de ellas. Comparando lo medido en las estaciones con el mapa obtenido de erosión, se puede inferir que la mayoría de la superficie de Subcuenca donde se encuentra el embalse presenta una erosión severa por lo que con el transcurso de los años ya no ha quedado suelo disponible para ser erosionado. En este caso lo que podría quedar son los fragmentos de roca que juegan un papel importante en la erosión del suelo. La cubierta de roca reduce la energía de flujo disponibles para la erosión debido a la energía que se pierde por la rugosidad.

## 8.6 Dinámica del NDVI

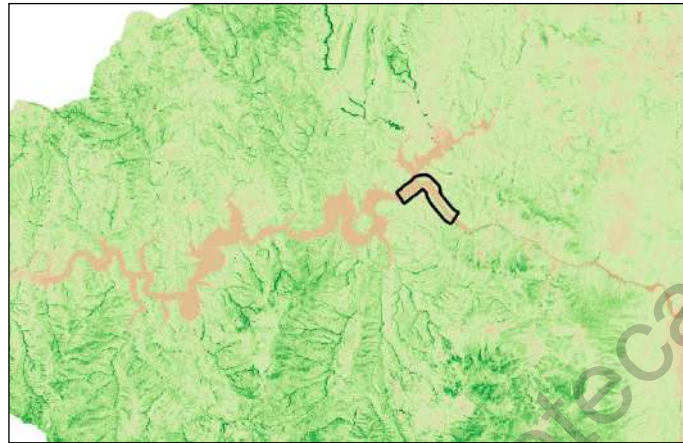


Figura 69. Ubicación tramo #1 aguas arriba del embalse.

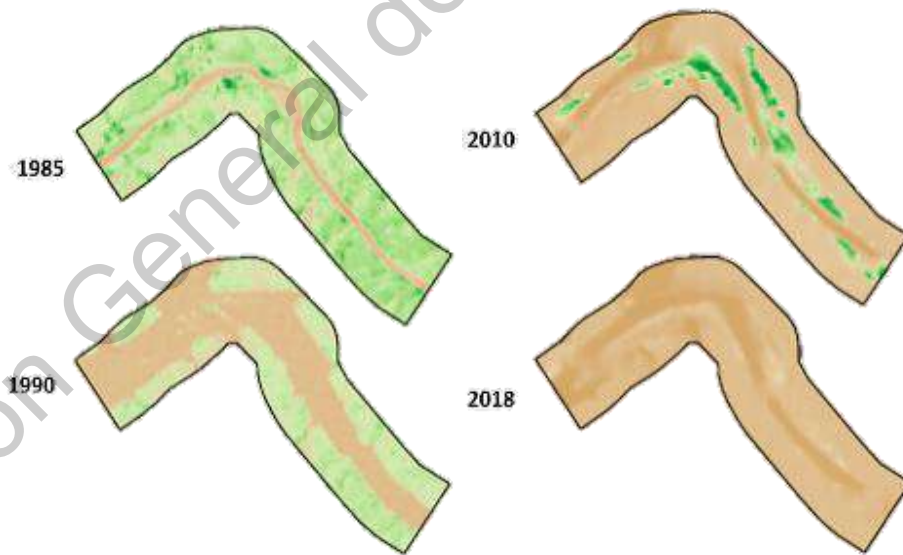


Figura 70. Dinámica NDVI tramo #1 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018

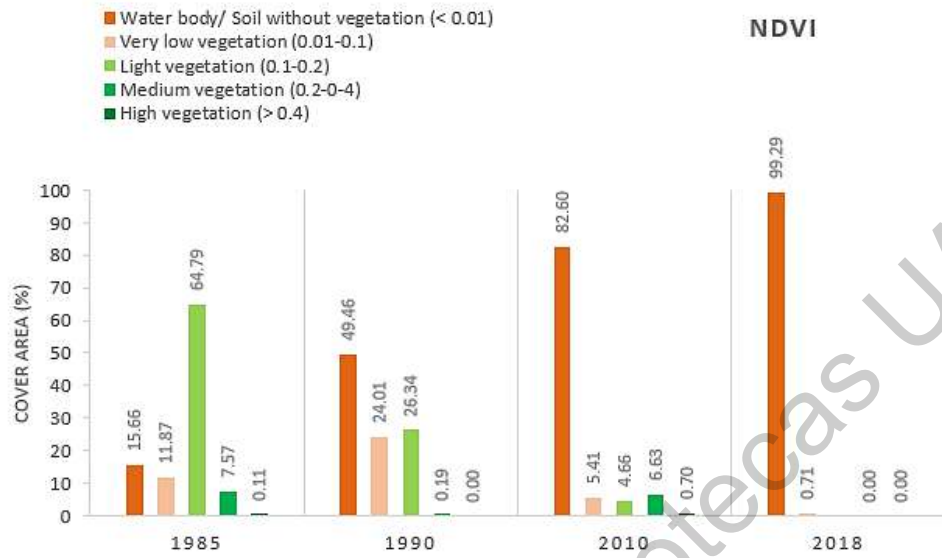


Figura 71. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #1 aguas arriba del embalse



Figura 72. Ubicación tramo #2 aguas arriba del embalse.



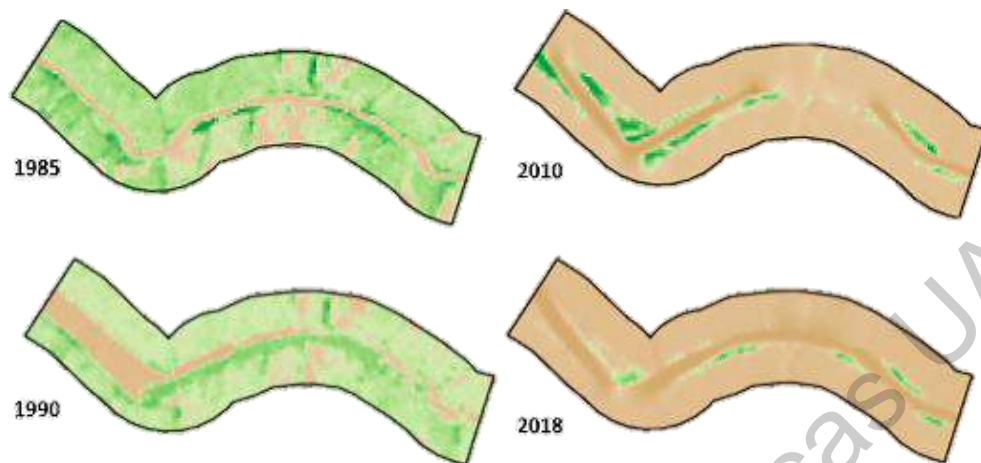


Figura 73. Dinámica NDVI tramo #2 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018

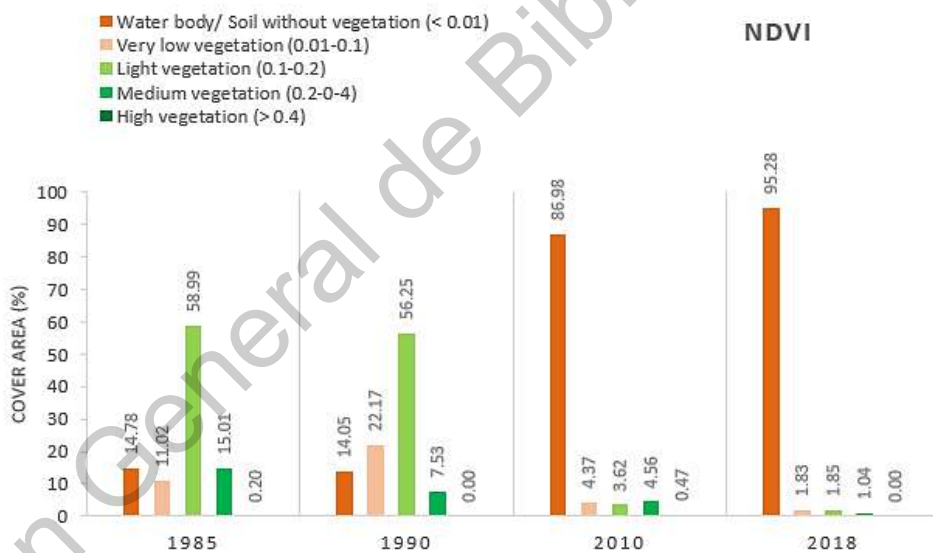


Figura 74. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #2 aguas arriba del embalse

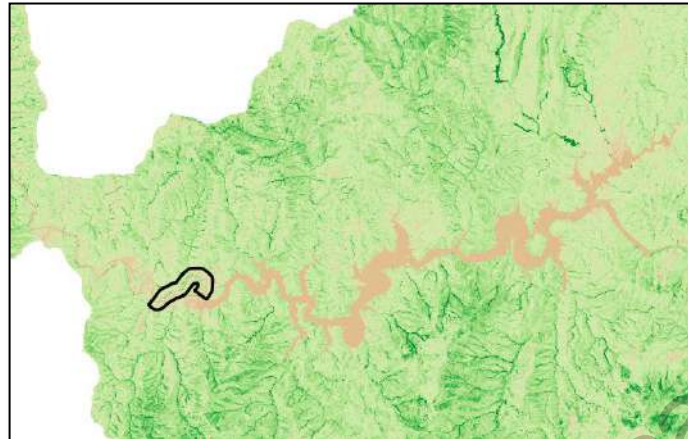


Figura 75. Ubicación tramo #1 aguas abajo del embalse.

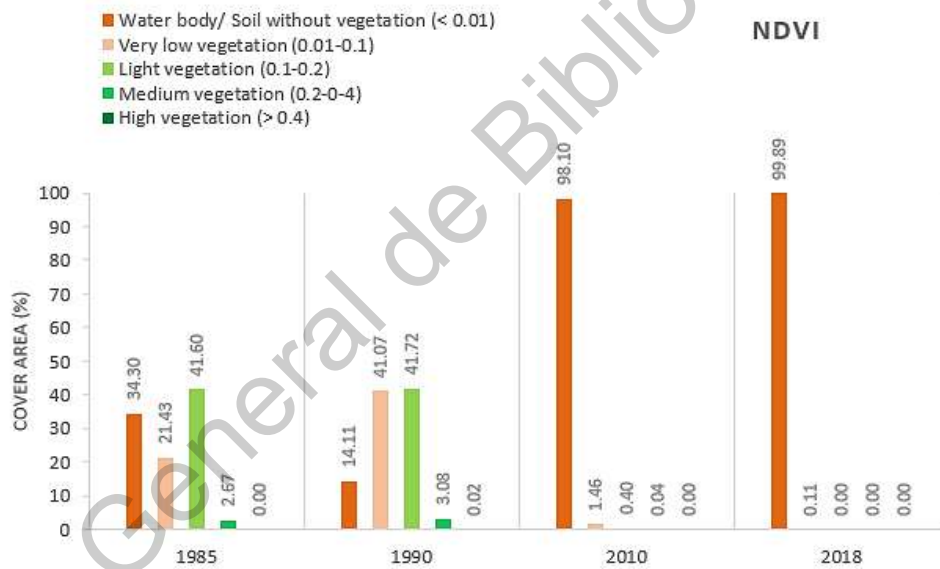


Figura 76 Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #1 aguas abajo del embalse

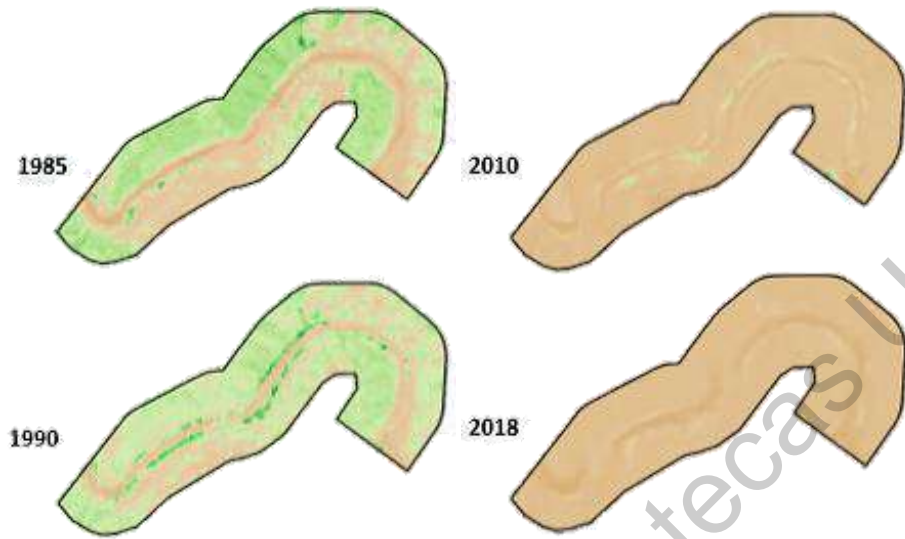


Figura 77. Dinámica NDVI tramo #1 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018

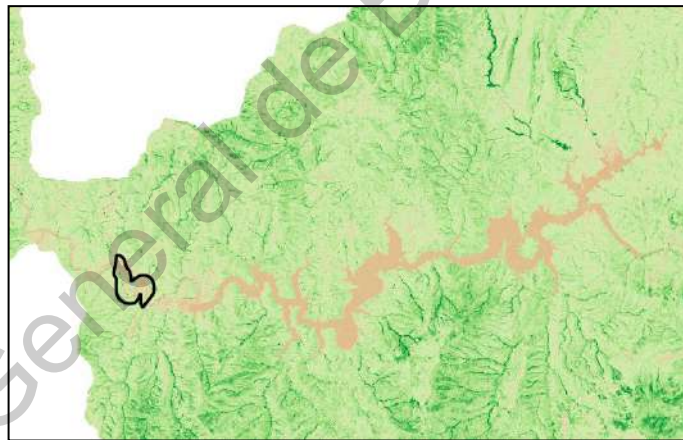


Figura 78. Ubicación tramo #2 aguas abajo del embalse.

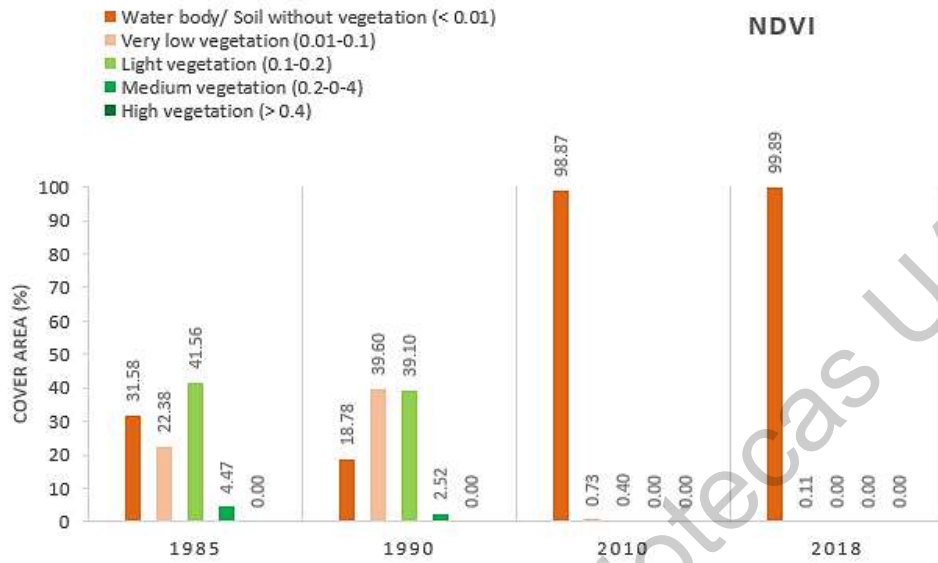


Figura 79. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #2 aguas abajo del embalse

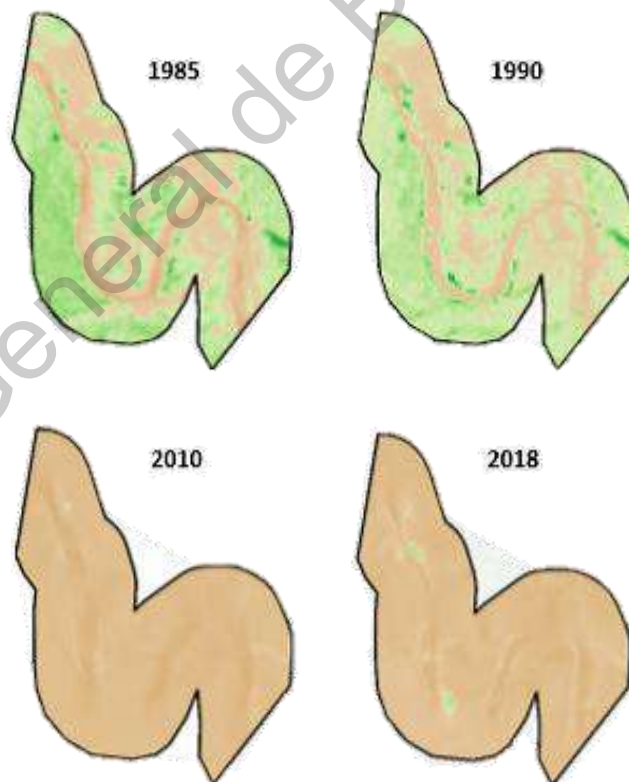


Figura 80. Dinámica NDVI tramo #2 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018

Los resultados muestran una disminución en NDVI en el período de estudio. Si bien las áreas degradadas tienen una tendencia negativa al NDVI, hay áreas dentro del mismo embalse, donde el índice aumenta, lo que indica que un aumento en la deposición de sedimentos es un factor importante para explicar la migración de la vegetación.

La reducción en la capacidad de movilización del sedimento por el flujo puede intensificar el establecimiento de vegetación ribereña ayudando a estabilizar los márgenes, lo que significa que el canal se está estrechando.

A medida que el ancho del río disminuye debido a la deposición de sedimentos, se puede observar que la vegetación ribereña aumenta en estas secciones.

Para los tramos aguas abajo, muestran el mismo comportamiento de pérdida de vegetación ribereña al paso de los años, mientras que aguas arriba del embalse hay áreas donde la vegetación ribereña crece en las riberas de los ríos de 1990 a 2010, pero en imágenes recientes se observa que debido a la actividad minera aguas arriba, su contaminación podría haber generado una pérdida en la vegetación.

En el Anexo 2 se encuentran más tramos con análisis de NDVI aguas arriba y aguas abajo del embalse donde se pueden observar los mismos comportamientos anteriormente mencionados.

### 8.7 Cambio de la vegetación ribereña aguas arriba del embalse

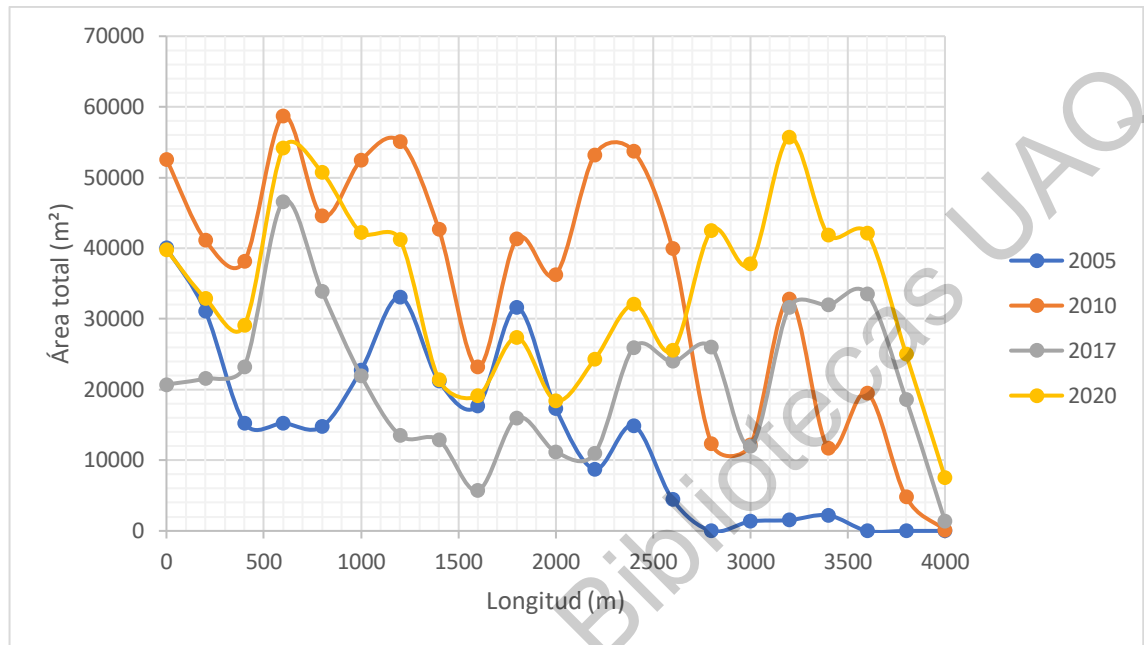


Figura 81. Resumen de las áreas de la vegetación ribereña a la entrada del embalse para diferentes años

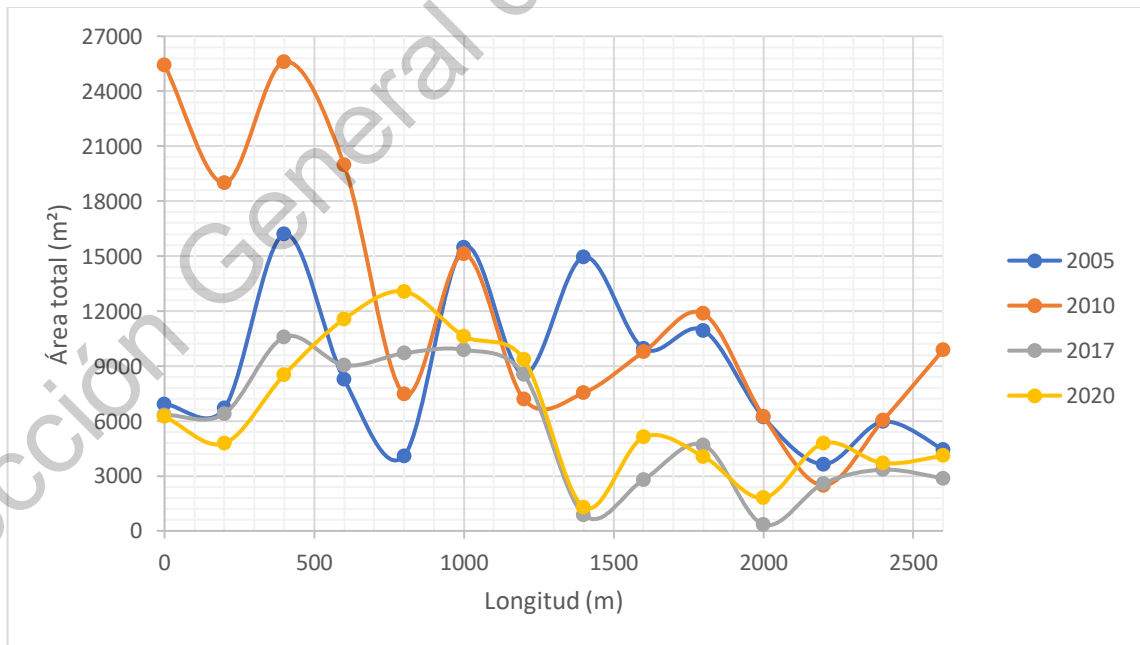


Figura 82. Resumen de las áreas de la vegetación ribereña en el tramo de San Juan Tetelcingo para diferentes años

Al igual que en el análisis del NDVI se observa que hay una disminución al paso de los años en la vegetación ribereña. Se observan áreas donde la vegetación ribereña crece en las riberas de los ríos del 2005 al 2010, pero para el 2017 y 2020 se observa una disminución posiblemente a la actividad minera aguas arriba, su contaminación podría haber generado una pérdida en la vegetación.

### 8.8 Cambio de uso de suelo

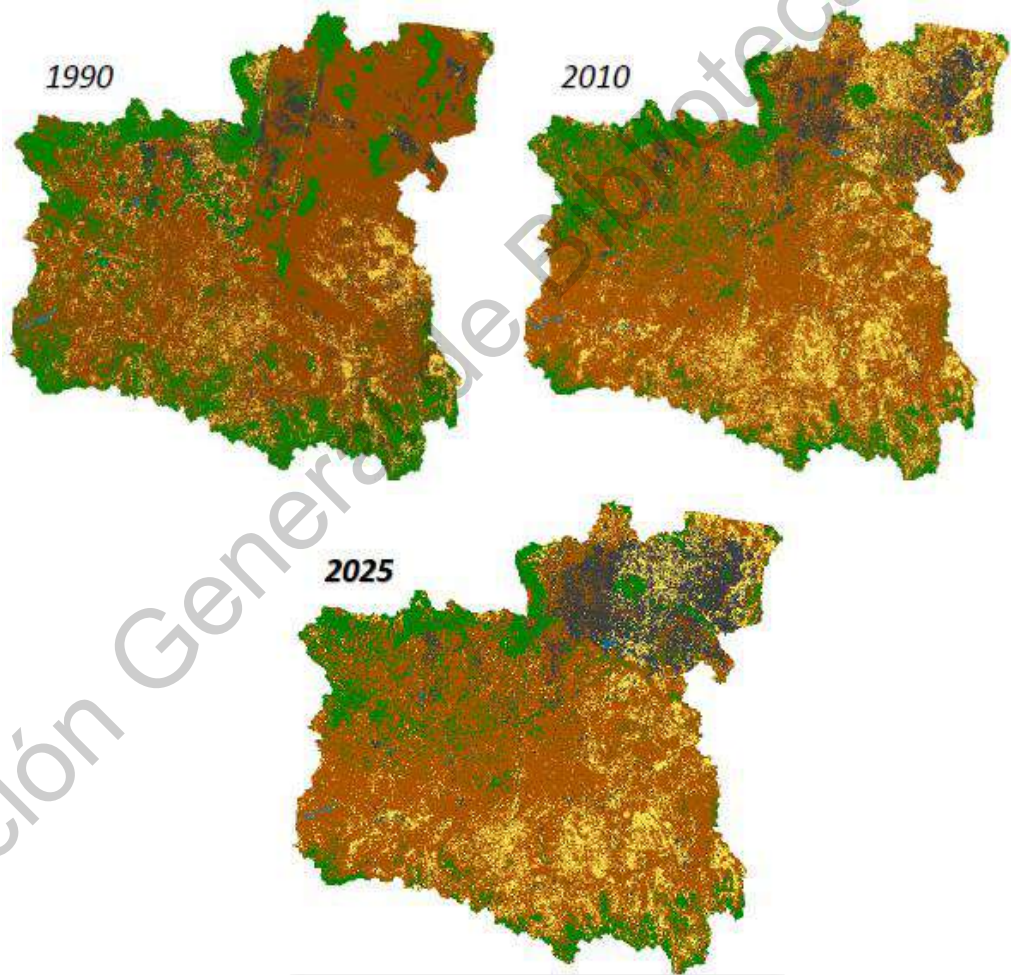







Figura 83. Probable crecimiento de la zona urbana en la cuenca para el año 2025

Una vez hecha la predicción se obtuvo el mapa del probable cambio de uso de suelo para el año 2025 y se puede observar un aumento significativo del área urbana.

**Tabla 28. Simbología por colores de los usos de suelo en la cuenca**

Color	Uso de suelo
	Cuerpo de agua
	Zona urbana
	Suelo desnudo
	Vegetación conservada
	Vegetación perturbada

**Tabla 29. Superficie de uso de suelo para los años 1990, 2010 y 2025**

	1990		2010		2025	
	Superficie de la cuenca		Superficie de la cuenca		Superficie de la cuenca	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
<b>Cuerpo de agua</b>	115.90	0.21	129.49	0.23	129.49	0.23
<b>Zona urbana</b>	3562.91	6.34	4672.83	8.32	7419.20	13.21
<b>Suelo desnudo</b>	5385.20	9.59	8319.18	14.81	8144.07	14.50
<b>Vegetación conservada</b>	11695.09	20.82	8100.19	14.42	8046.51	14.33
<b>Vegetación perturbada</b>	35401.36	63.04	34938.76	62.21	32421.20	57.73

Con base en la tendencia pasada (de 1990 a 2010) de los cambios en el uso del suelo, se ha generado el mapa de predicción del uso futuro del suelo de la cuenca para el año 2025. El resultado muestra que la vegetación perturbada tiene mayor potencial de cambio a zona urbana, mientras que los cuerpos de agua no tienden a cambiar. La expansión de la mancha urbana se da hacia lugares donde el suelo no tiene un uso, principalmente hacia las zonas con poca vegetación que se encuentran alrededor de área urbana construida. Los datos históricos fueron un factor importante para establecer las áreas de expansión. Probablemente los cambios de uso de suelo de vegetación conservada a perturbada y después a zona



urbana se deba a la deforestación. La deforestación elimina la cubierta forestal aumentando otros procesos de producción de sedimentos.

### 8.9 Nutrientes y materia orgánica

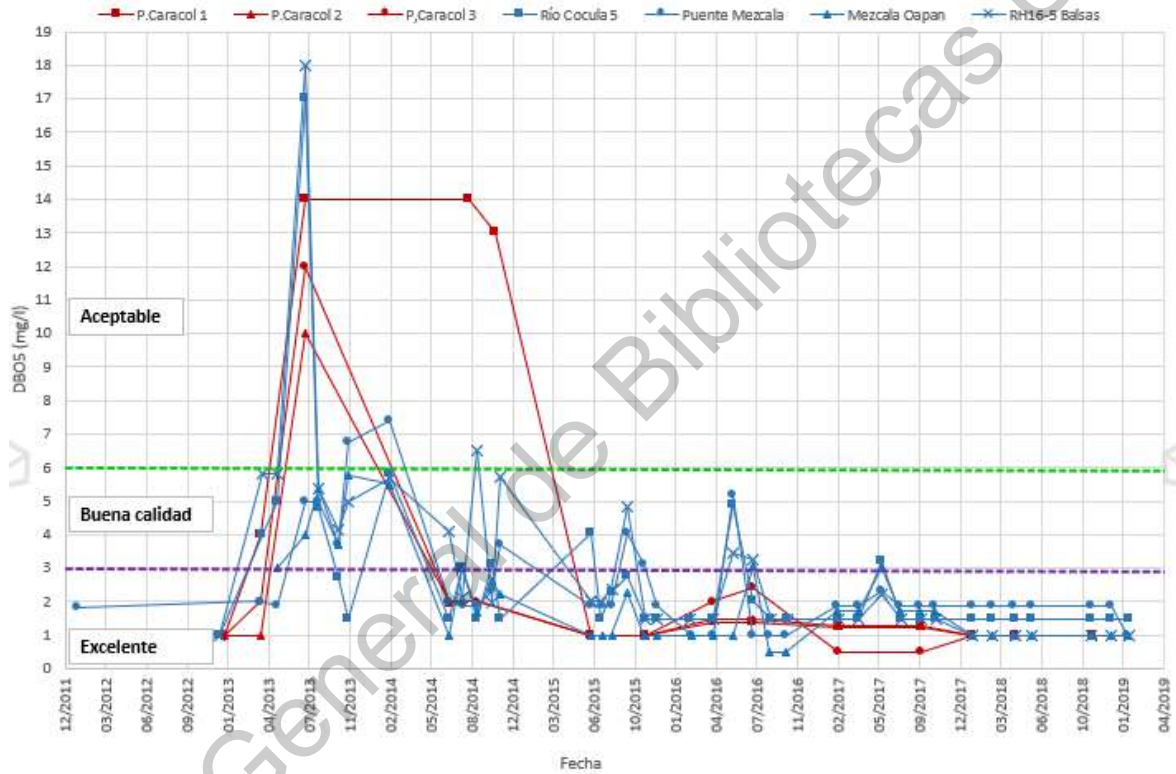


Figura 84. Demanda Bioquímica de Oxígeno aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019

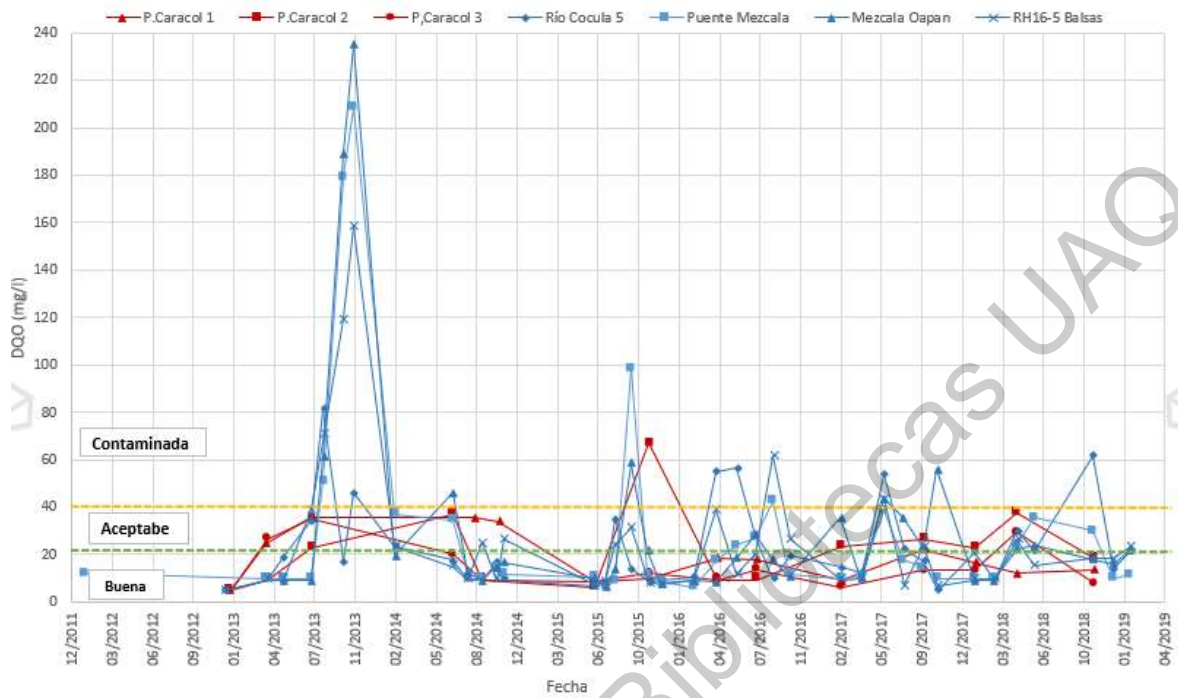


Figura 85. Demanda Química de Oxígeno aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019

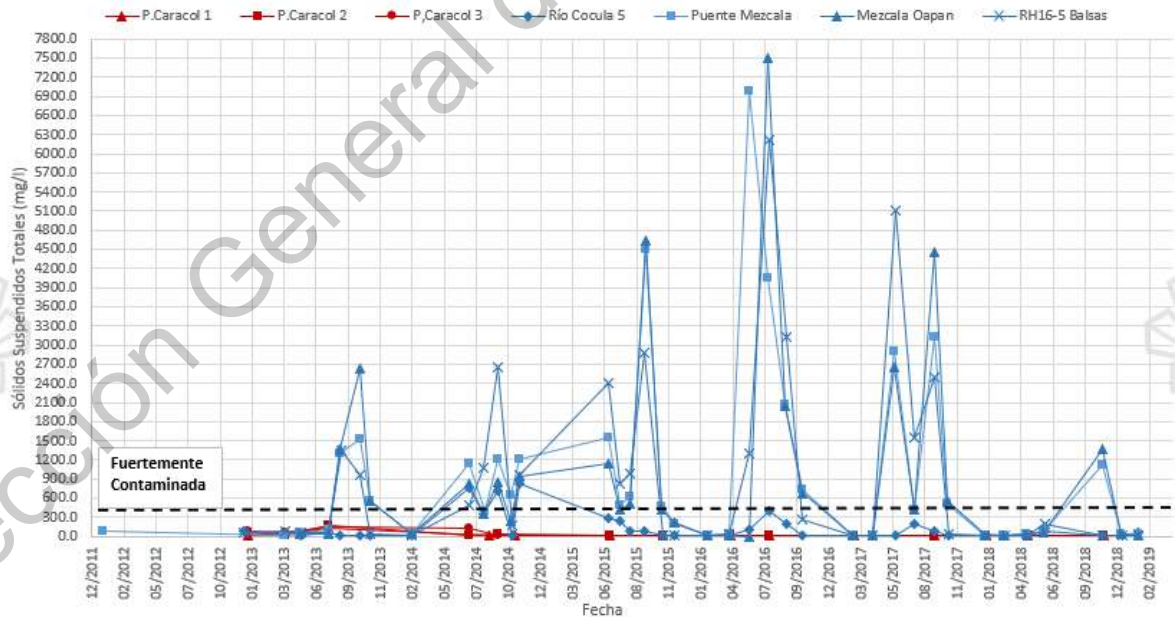


Figura 86. Sólidos Suspensidos Totales aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019

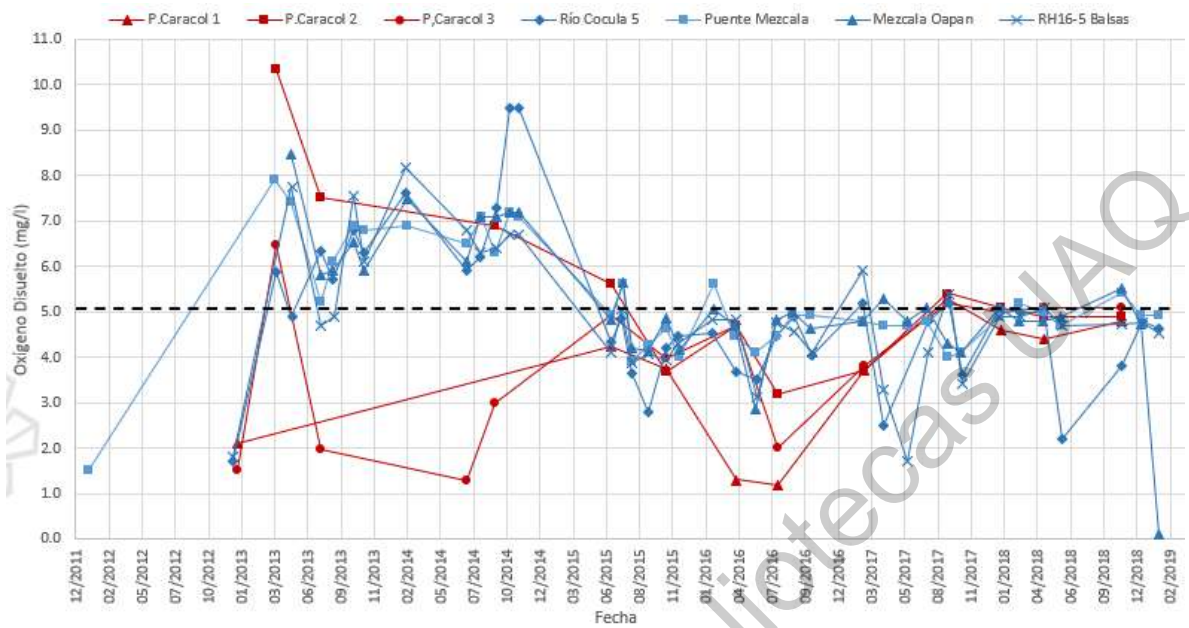


Figura 87. Oxígeno disuelto aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019

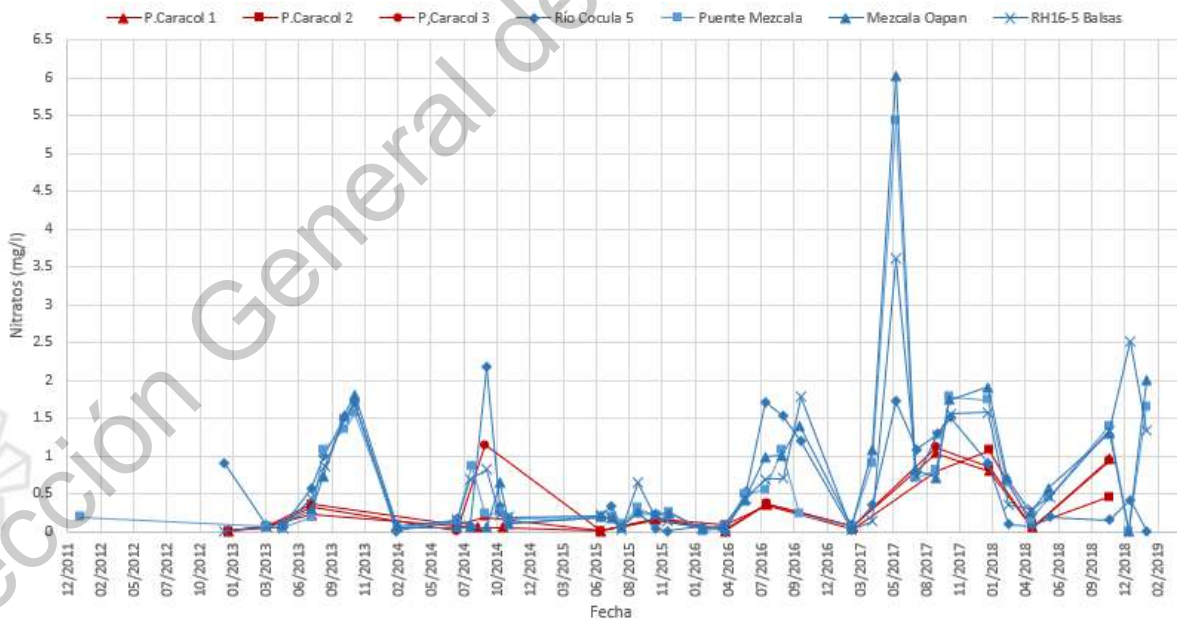
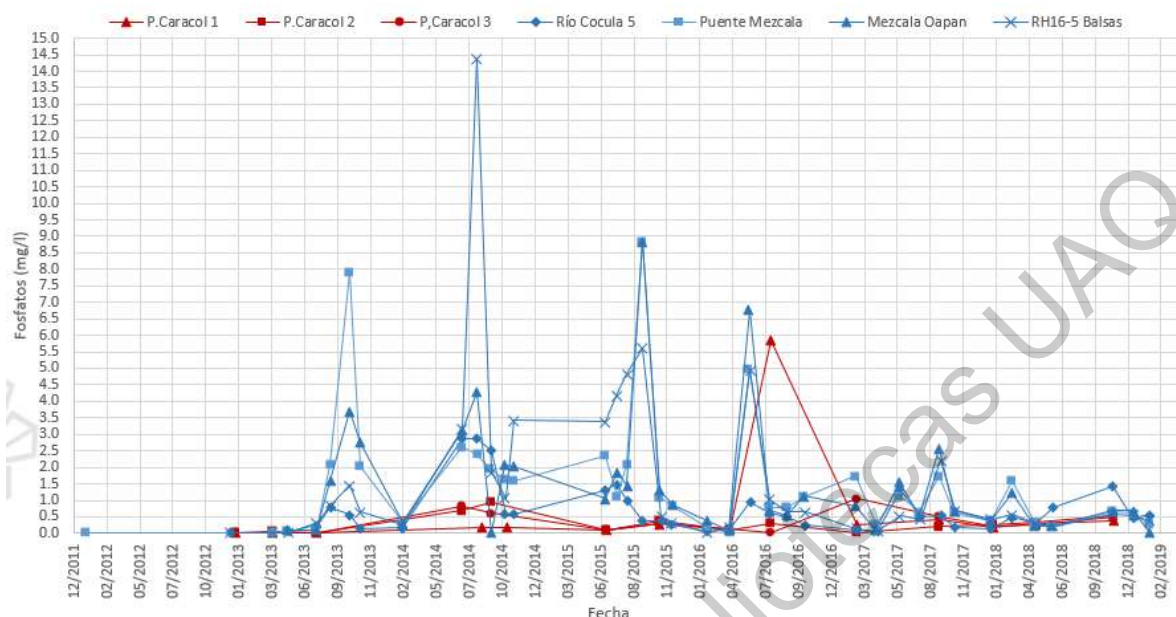


Figura 88. Niveles de nitratos aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019



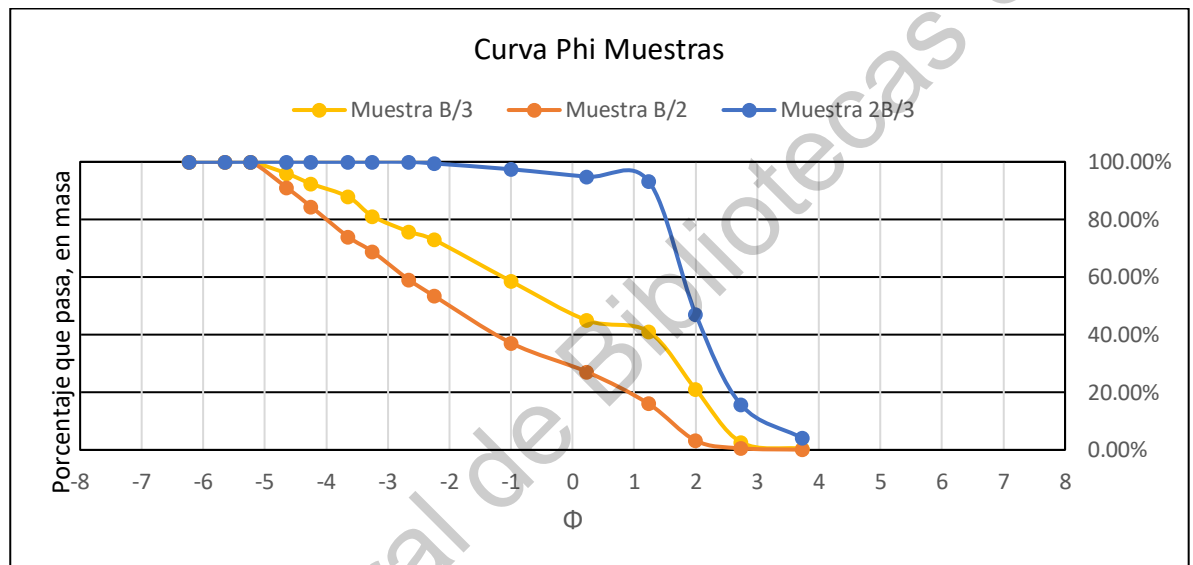
**Figura 89. Niveles de fosfatos aguas arriba y aguas abajo del embalse, periodo 2012-2019**

Los entornos urbanos son importantes fuentes de contaminantes antropogénicos. La urbanización da lugar a fuentes de contaminantes únicas y específicas, muchas de las cuales no se encuentran en cuencas fluviales más naturales. Los contaminantes en entornos urbanizados se derivan de una mezcla compleja de fuentes puntuales como residuos mineros y sólidos de obras de tratamiento de aguas residuales y fuentes que son más difusas como las redes de carreteras, incluyendo la combustión de combustible de vehículos, desgaste de llantas, fragmentos de plantas vegetativas, fragmentos metálicos, restos de concreto, cemento y otros materiales de construcción. Además, los sedimentos de las cuencas fluviales urbanas reciben aportes de fuentes puntuales de materia orgánica y nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) de los sólidos residuales, y también reciben especies contaminantes de metales y orgánicos mejoradas de los procesos industriales urbanos.

La actividad minería cerca del embalse representa también una importante fuente de contaminación antropogénica, sobre todo cerca de la entrada al embalse en la

estación RH16-5 Balsas. Estos contaminantes se limitan principalmente a metales y contaminantes inorgánicos.

### 8.10 Muestreo de sedimentos



**Figura 90. Curvas Granulométricas escala Phi para las 3 muestras de sedimentos tomadas en la sección aguas arriba del embalse**

Se hicieron tres muestreos de sedimentos en la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo. En el primer muestreo obtenido en el margen derecho de la sección, los sedimentos en este punto muestran un contenido de gravas del 41.45%, siendo el 27.09% de grava media y 14.3% de grava fina. Del mismo modo, muestra un contenido de arenas del 58.11%, de los cuales el 13.58% es de arena muy gruesa, 3.92% de arena gruesa, 20.04% de arena media, 18.34% de arena fina, 2.22% de arena muy fina y 0.44% de limos y arcillas.

Los sedimentos del segundo muestreo, que se realizó en el centro de la sección, muestran un contenido de 62.88% de gravas, siendo el 46.57% de grava media y el 16.31% de grava fina. Del mismo modo, muestra un contenido de arenas del 37.12%, de los cuales el 10.07% es de arena muy gruesa, 11.03% de arena gruesa,

12.79% de arena media, 2.68% de arena fina, 0.48% de arena muy fina y 0.08% de limos y arcillas.

Para el tercer muestreo, realizado en el margen izquierdo de la sección, los sedimentos muestran un contenido de gravas de tan sólo 2.57%, siendo el 0.57% de grava media y 2.00% de grava fina. Del mismo modo, muestra un contenido de arenas del 97.43%, de los cuales el 2.57% es de arena muy gruesa, 1.57% de arena gruesa, 46.16% de arena media, 31.44% de arena fina, 11.64% de arena muy fina y 4.04% de limos y arcillas.

En los sedimentos analizados de la sección, se denota una gran presencia de arenas, las cuales varían el contenido de acuerdo al punto de muestreo, es decir, sobre el margen derecho se encuentran casi en la misma cantidad, superando por poco el contenido de arenas, sobre el centro de la sección se presenta una mayoría de gravas de entre 2 y 25 mm de diámetro y sobre el margen izquierdo, prácticamente se presentan sólo arenas.

Esto puede suponerse que sobre los márgenes se presente una capacidad de transporte de sedimentos alta y en el centro de la sección una capacidad baja, donde se presentan las partículas más grandes, debido a que se requeriría mayor velocidad del cauce para transportar las partículas.

En el Anexo 4 se encuentran imágenes del sedimento después de las pruebas granulométricas.

## 9. CONCLUSIONES

1. Los parámetros asociados a la cuenca sugieren que el comportamiento dinámico de erosión de suelo se vea influenciado principalmente por la morfometría, lo que significa que el relieve topográfico de la cuenca se considera como el factor principal para la producción de sedimentos.
2. La erosión es un proceso selectivo que en principio transporta los sedimentos más finos y dejando el material más grueso que con el tiempo se hace más difícil de transportar, donde a pesar de que las fuerzas de erosión permanezcan o aumenten, la tasa de erosión no aumentará. La resistencia del material de superficie es mayor debido a la granulometría, formando una protección natural para el suelo contra la erosión, no necesariamente se debe a un mejoramiento de la vegetación si no por el suelo fino ya erosionado.
3. El estudio de erosión por subcuencas permitió identificar las zonas más susceptibles a producir sedimentos que se terminan por depositar en el fondo del embalse disminuyendo así su capacidad de almacenamiento. A su vez, se puede identificar las zonas donde sería necesario implementar planes de manejo y conservación de la cuenca.
4. La mina a cielo abierto que se encuentra cerca del embalse extrae el oro por lixiviación con cianuro, lo que implican la eliminación de la vegetación en el área de las operaciones mineras, además, los residuos sólidos finos provenientes del área de explotación dan lugar a una elevación de la capa de sedimentos en el río de la zona.
5. Los registros de monitoreo de agua y sedimentos fueron especialmente útiles para detectar tendencias en la cantidad y calidad de los sedimentos. La información ambiental obtenida del mapeo y monitoreo son de las herramientas de mayor utilidad para analizar y resumir información que se

pueden utilizar para apoyar la toma de decisiones y evaluar los efectos de las decisiones de manejo y control de sedimentos.

6. La implementación de una estrategia de gestión para controlar realmente la movilización y el transporte de sedimentos y contaminantes una vez que se ha identificado la fuente puede ser un problema ya que identificar las fuentes puede ser relativamente fácil, pero hacer algo al respecto puede tener varios obstáculos en el camino para adoptar un plan de manejo exitoso. Los sedimentos dragados son un tema de gestión costoso, especialmente el material dragado está contaminado. En esta parte es importante el análisis de costo-beneficio (social) para evaluar los costos de implementar una solución en relación con los beneficios obtenidos o en relación con los costos de lograr los mismos beneficios utilizando una solución diferente.



## 10. REFERENCIAS

- Allredge, B., & Moore, G. (2012). Assessment of riparian vegetation sensitivity to river hydrology. *River Research and Applications*, 230–244.
- Basson, G. (2018). Sediment yield modelling considering future land use change: case study of the Usuthu river catchment in South Africa and Swazilan. *International Commission on Large Dams*.
- Bid, S. (2016). Change Detection of Vegetation Cover by NDVI Technique on Catchment Area of the Panchet Hill Dam, India. *International Journal of Research in Geography (IJRG)*, 2, 11-20.
- Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L., & Gurnell, A. (2013). Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation. *Reviews of Geophysics*.
- Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L., & Gurnell, M. (2013). Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation. *Rev. Geophys*, 379-414.
- Campos, A. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Comisión Federal de Electricidad. (2018). *Estudios topo batimétricos de la P.H. El Caracol (Carlos Ramírez Ulloa), en el estado de Guerrero*.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Monitoreo de Calidad del Agua*.
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Carrillo González, F., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26-34.
- de Alba, F., & Martín Cerón, J. (2019). Los ríos revueltos, radiografía de la contaminación.
- Depeng, Z., Zongxue, X., Wenyi, Y., Shuangyan, J., Peiqing, X., & Dachuan, R. (15 de 02 de 2016). Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of The Total Environment*, 544, 238-250.
- Des E., W. (2012). The role of dams in the global sediment budget. *Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment*.
- Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad. *Gestión y política pública*.
- Ehsani Nima, V. C. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 435-446.

- Engelman, R., & Leroy, P. (1994). *Sustaining Water: Population and the Future of Renewable Water Supplies*. Population Action International, Washington, D.C.
- Espinosa Ayala, J. (2016). Procesos de transporte de sedimentos. *IMTA*.
- Flores Sotomayor, J. (2016). Manejo sustentable de sedimentos en embalses.
- Gao, P., Mu, X.-M., Wang, F., & Li, R. (2011). Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. (S. Grimaldi, Ed.) *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1-10.
- García Flores, M., & Maza Álvarez, J. (1985). Manual de Ingeniería de ríos. En *Transporte de sedimentos*.
- González Correa, D. (noviembre de 2016). Estudio y modelación de los escurrimientos generados por el cambio de uso de suelo en la zona metropolitana de Querétaro.
- González Sosa, E., & Torres Osuna, F. (1994). La sedimentación en el Medio Balsas. *XIII Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Gracia Sánchez, J. (1998). Sedimentación en embalses. En *Manual de ingeniería de ríos*.
- Guarín Corredor, T. C. (2014). Modelación del transporte de sedimentos en ríos. Ejemplos de aplicación por el método de diferencias finitas en excel y matlab.
- Hajigholizadeh, M., Melesse, A. M., & Fuentes, H. R. (14 de 03 de 2018). Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. *Environmental Research and Public Health*, 15, 518.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bull.*, 275-280.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2020). La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/376/diagnostico.html>.
- International Commission on Large Dams. (2009). Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems. *DRAFT ICOLD BULLETIN*.
- Lal, R. (2001). Soil Degradation By Erosion. *Land degradation & development*, 519-539.
- López Pérez, A., Martínez Menes, M. R., & Fernández Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de inter vención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*.
- Maavara, T., Chen, Q., Van Meter, K., Brown, L. E., Zhang, J., Ni, J., & Zarfl, C. (2020). River dam impacts on biogeochemical cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*.

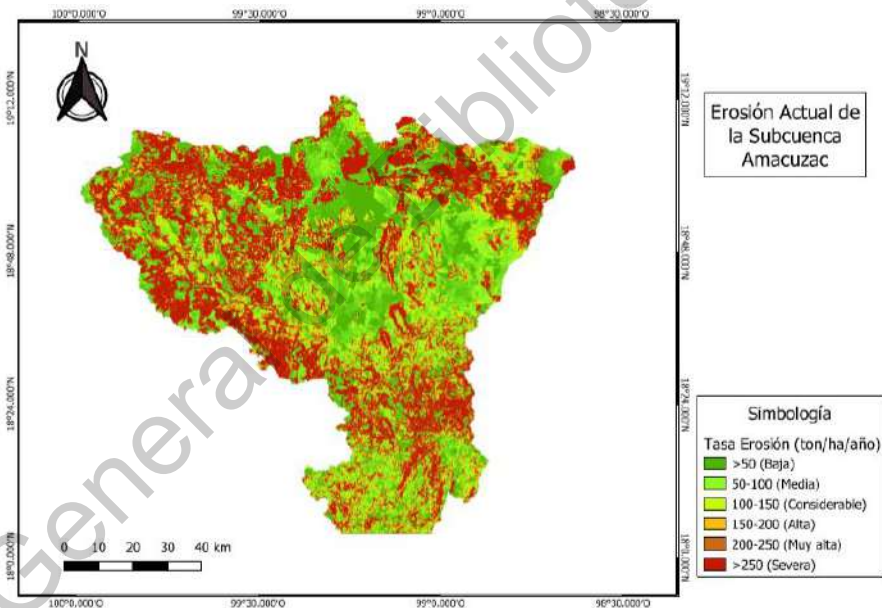
- Meli, P., Ruiz, L., & Carabias, J. (2015). Importancia de los ecosistemas ribereños. *Vegetación riparia* . Natura y Ecosistemas Mexicanos.
- Mendoza Cariño, M., Quevedo Nolasco, A., Bravo Vinaja, Á., Flores Magdaleno, H., De la isla de Bauer, M., Gavi Reyes, F., & Zamora Morales, B. P. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva ley general de aguas de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., . . . Selzer, F. (2011). Mapas difitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen*.
- Merino Ibarra, M., Valdespino, P. M., Monroy Ríos, E., & Ramírez Zierold, J. (2014). Eutrofización. En *Geografía ambiental de Mexico*.
- Mohammad, H., Fuentes, H., & Melesse, A. (2018). Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches Models and Applications.
- Montañez Guillén, J. E. (2017). Estrategias para el manejo de sedimentos en embalses. Universidad de los Andes.
- Montes-León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, II(I), 5-17.
- Ortiz Pérez, M. A., Hernández Santana, J. R., & Figueroa Mah Eng, J. M. (diciembre de 2017). Cambios costeros en el delta del río Balsas, México, entre los años 1943-2009. *Investigaciones Geográficas*.
- Owens, P. N. (2008). *Sustainable Management of Sediment Resources: Sediment Management at the River Basin Scale*. Elsevier.
- Owens, P., Slob, A., Liska, I., & Brils, J. (2008). Towards Sustainable Sediment Management at the River Basin Scale. Elsevier.
- Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., López Reyes, L., Hernández Aldana, F., Castelán Vega, R., & Morán Perales, J. L. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10.
- Rodríguez, A. (2010). *¿Cómo afecta al medio ambiente la existencia de un embalse?* Obtenido de <https://cienciasycosas.com>
- Rojas, P. (2015). Diccionario de Hidrología. *¿Qué es una curva hipsométrica?* Obtenido de <https://ingeciv.com/>
- Salinas Tapia, H. (2015). Unidad de competencia 3: Transporte de sedimentos en cauces. parte 1. UAEM.
- Sánchez Jiménez, J. A. (2007). Creación de una base de datos y medición de sedimentos en los ríos de México.

- Sepúlveda, L. A. (2015). Sedimentación en embalses. Obtenido de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/sedimentacionpresas/sedimentacionpresas.html>
- Taylor, K., Owens, P., Batalla, R., & Garcia, C. (2008). *Sediment and Contaminant Sources and Transfers in River Basins*. Elsevier.
- Tealdi, S., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2010). Modeling the impact of river damming on riparian vegetation. *Journal of Hydrology*, 302-312.
- UNESCO. (2017). *Sediment Problems and Strategies for their Management*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- University of Maryland Center for Environmental Science. (2020). Riparian vegetation conditions .
- Valencia Vargas, J. C. (2015). Desarrollo de la región hidrológica del Balsas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 81-87.
- Vázquez, G., Martínez, M. L., & García Franco, J. G. (2020). La función de la vegetación ribereña y la calidad de los ríos. Instituto de Ecología.

## 11. ANEXOS

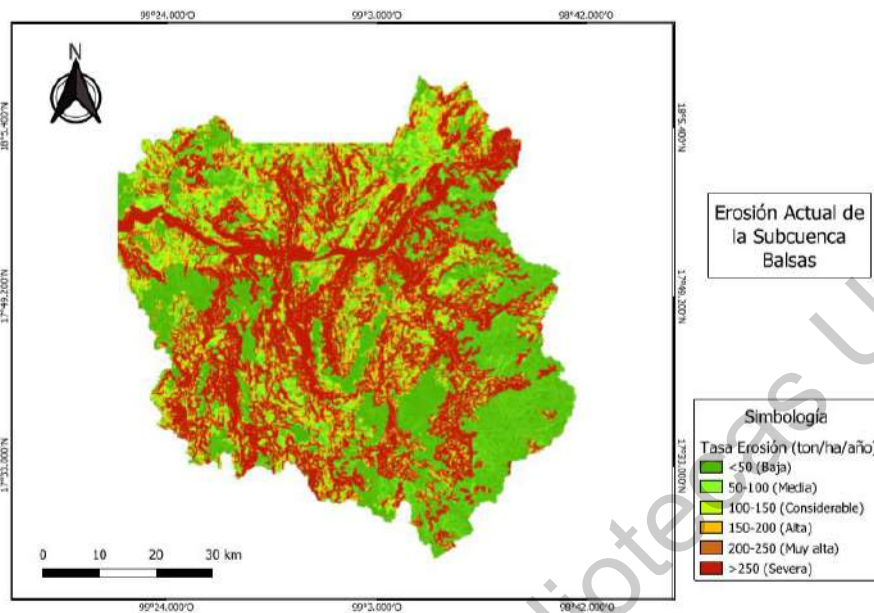
### Anexo 1. Mapas de erosión hídrica para las subcuencas

En la Figura 91 se observa el Mapa de Erosión Hídrica para la subcuenca Amacuzac en donde, de acuerdo con los resultados de la metodología descrita, se obtuvo que para el 34.8% del área de la subcuenca se encuentra con baja erosión, 13.7 % con erosión media, 8.8 % con erosión considerable, 6.4% con erosión alta, 5.2% con erosión muy alta y un 31.1% expuesto a erosión severa.



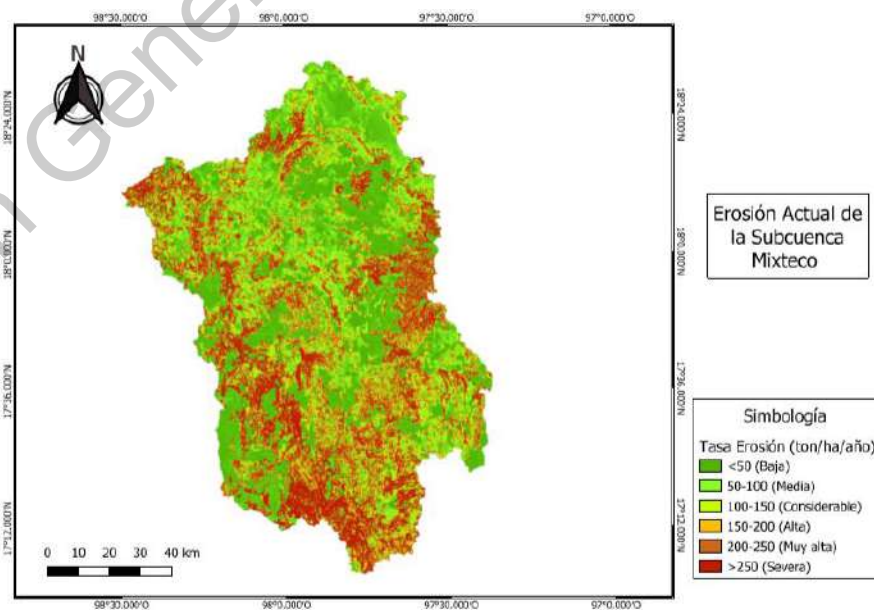
**Figura 91. Mapa de erosión de la subcuenca Amacuzac**

Para la subcuenca Balsas se obtuvo que para el 36.8% del área se encuentra con baja erosión, 9.3 % con erosión media, 7.8 % con erosión considerable, 6.9% con erosión alta, 6.0% con erosión muy alta y un 33.3% expuesto a erosión severa (Figura 92).



**Figura 92. Mapa de erosión de la subcuenca Balsas**

Para la subcuenca Mixteco se obtuvo que para el 44.0% del área se encuentra con baja erosión, 13.4 % con erosión media, 9.7 % con erosión considerable, 7.6% con erosión alta, 5.9% con erosión muy alta y un 19.3% expuesto a erosión severa (Figura 93).



**Figura 93. Mapa de erosión de la subcuenca Mixteco**

Para la subcuenca Nexapa se obtuvo que para el 46.2% del área se encuentra con baja erosión, 17.5% con erosión media, 9.3% con erosión considerable, 6.1% con erosión alta, 4.4% con erosión muy alta y un 16.4% expuesto a erosión severa (Figura 94).

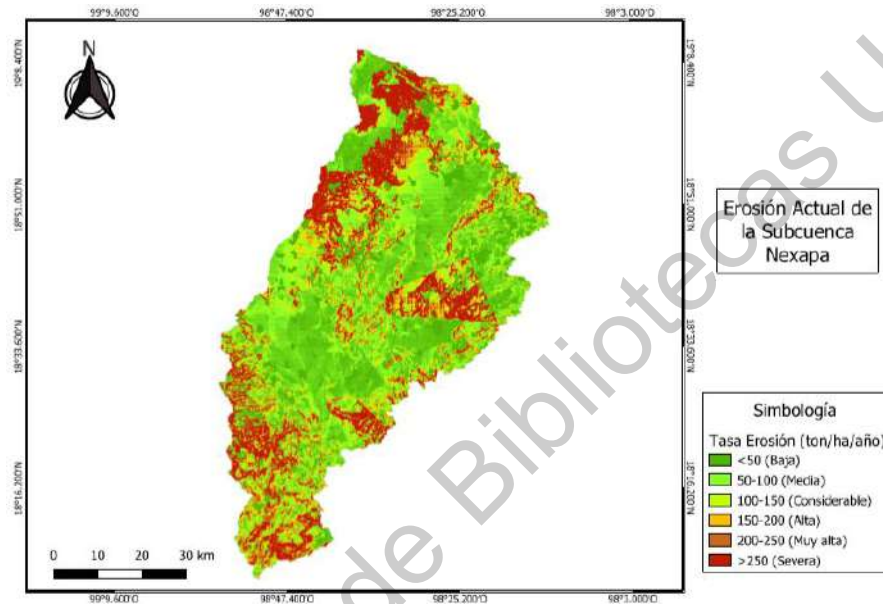
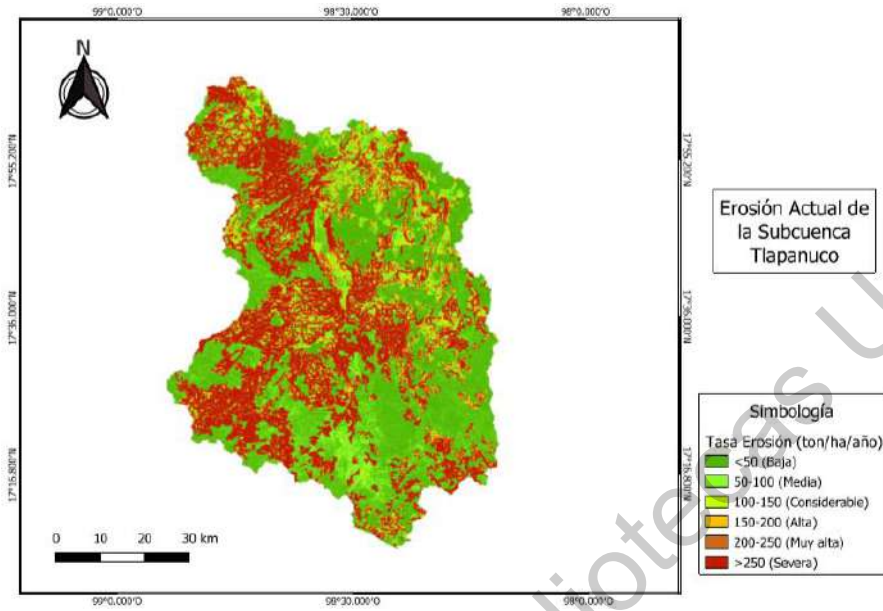


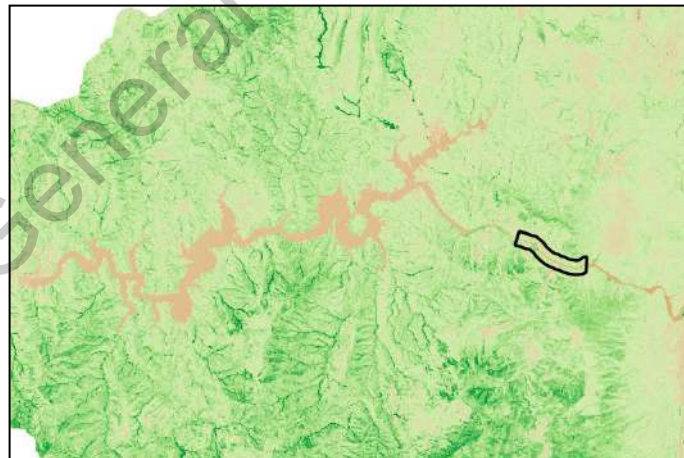
Figura 94. Mapa de erosión de la subcuenca Nexapa

Para la subcuenca Tlapanuco se obtuvo que para el 46.5% del área se encuentra con baja erosión, 6.9% con erosión media, 5.2% con erosión considerable, 4.6% con erosión alta, 4.3% con erosión muy alta y un 32.5% expuesto a erosión severa.



**Figura 95. Mapa de erosión de la subcuenca Tlapanuco**

Anexo 2. Dinámica NDVI aguas arriba y abajo del embalse



**Figura 96. Ubicación tramo #3 aguas arriba del embalse.**



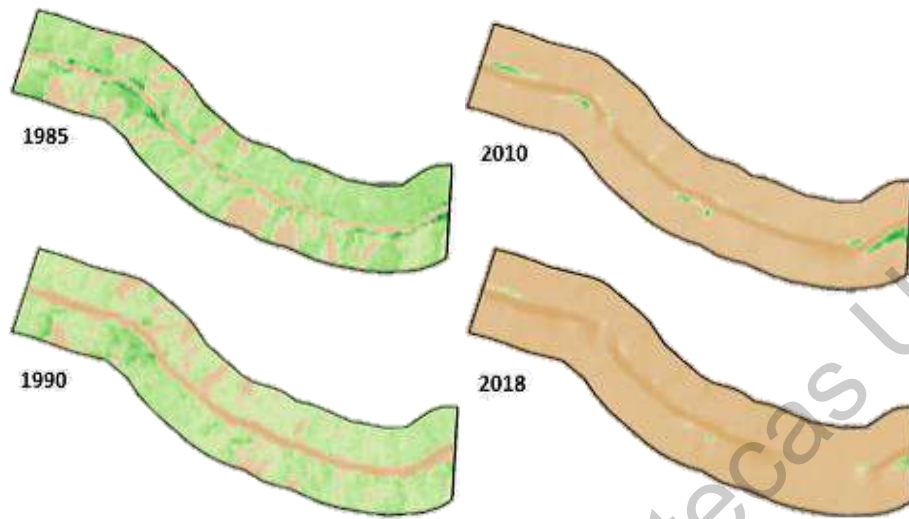


Figura 97. Dinámica NDVI tramo #3 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018

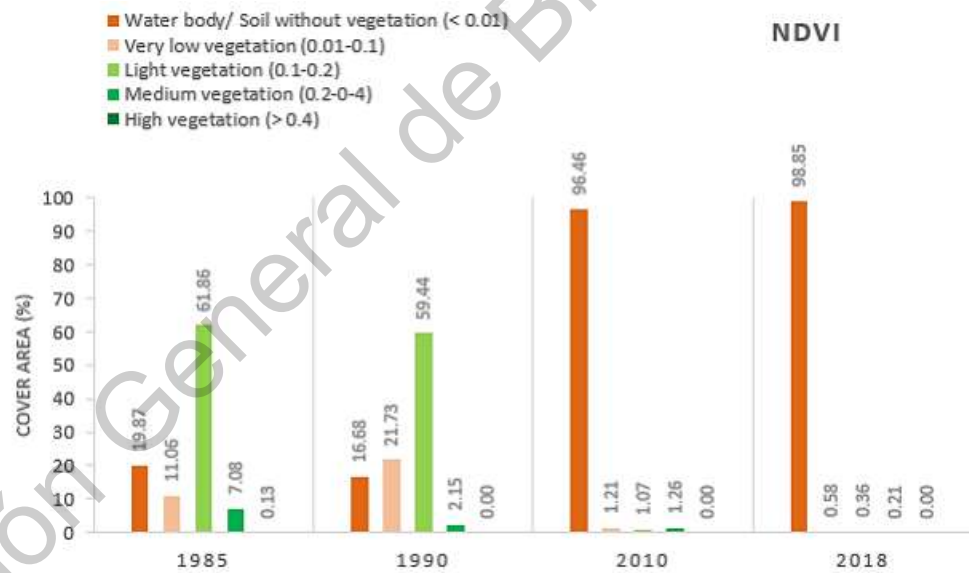


Figura 98. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #3 aguas arriba del embalse

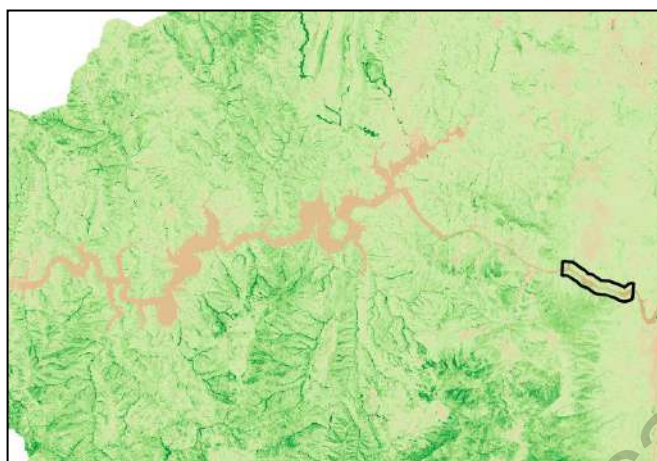


Figura 99. Ubicación tramo #4 aguas arriba del embalse

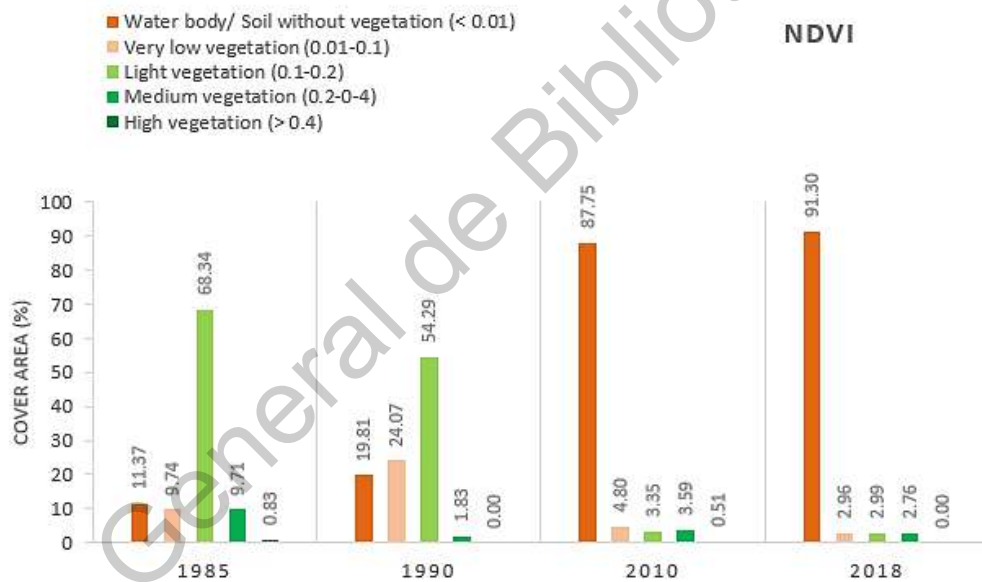


Figura 100. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #4 aguas arriba del embalse



Figura 101. Dinámica NDVI tramo #4 aguas arriba del embalse, periodo 1985-2018

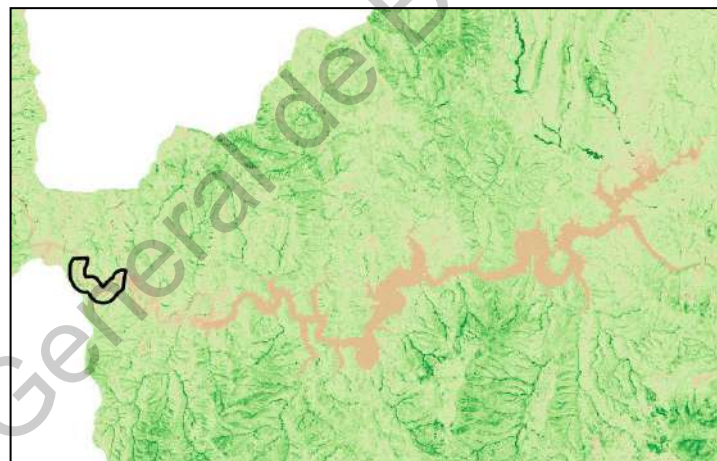


Figura 102. Ubicación tramo #3 aguas abajo del embalse

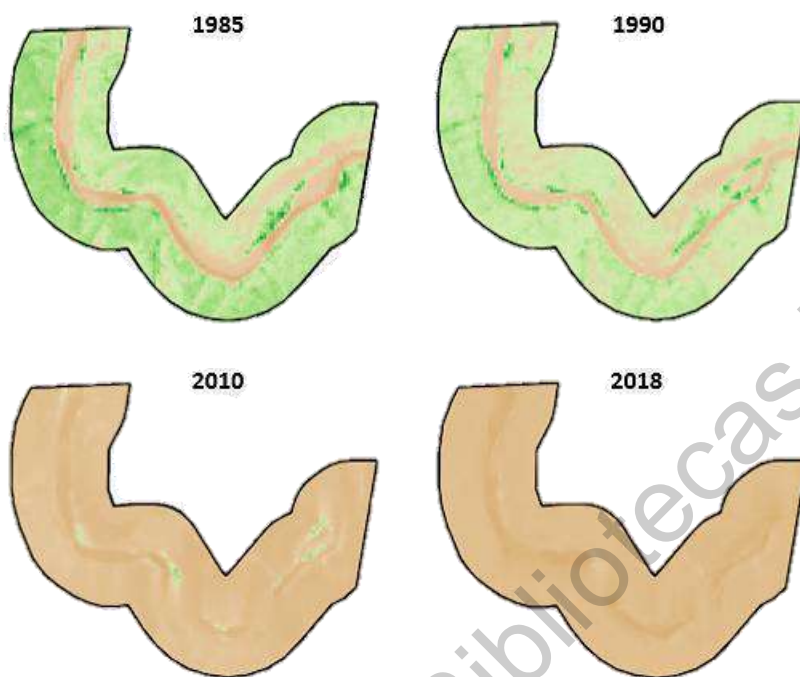


Figura 103. Dinámica NDVI tramo #3 aguas abajo del embalse, periodo 1985-2018

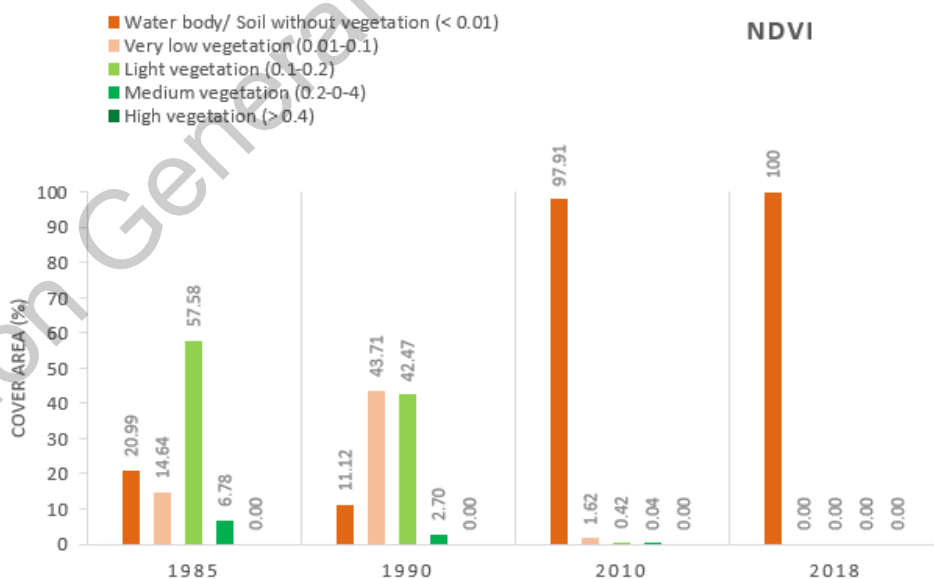


Figura 104. Cambios en porcentaje de área de la vegetación de la sección #3 aguas abajo del embalse

Anexo 3. Imágenes del sitio donde se tomaron las muestras de sedimento cerca de la estación Hidrométrica San Juan Tetelcingo.



Figura 105. Crecimiento de algas resultantes de eutrofización



Figura 106. Orilla del rio Balsas visto desde la canastilla donde se tomó la muestra B/3



**Figura 107. Tramo del río Balsas aguas arriba del embalse donde se tomó la muestra 2B/3**

Anexo 4. Muestras de sedimento



Figura 108. Muestras obtenidas de sedimentos de la sección aguas arriba del embalse

Dirección General de Biotecnología y Biotécas UAQ