



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD DURANGO**

DETECCIÓN DE ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-MEZQUITAL

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTA:

SUSANA GABRIELA SALAZAR ARRIETA

DIRECTORES:

**DR. ARMANDO CORTÉS ORTÍZ
M. EN C. LIZETH RUACHO GONZÁLEZ**

Victoria de Durango, Dgo., Diciembre de 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 05 de noviembre del 2016

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN Durango en su sesión ordinaria No. 10 celebrada el día 18 del mes de noviembre conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

SALAZAR

Apellido paterno

ARRIETA

Apellido materno

SUSANA GABRIELA

Nombre (s)

Con registro:

B	1	4	0	7	5	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:

Dr. Armando Cortés Ortiz y M. en C. Lizeth Ruacho González

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
El CIIDIR-IPN Unidad Durango

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dr. Armando Cortés Ortiz

Aspirante

Ing. Susana Gabriela Salazar Arrieta

M. en C. Lizeth Ruacho González

Presidente del Colegio

Dr. José Antonio Ávila Reyes



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 14:00 horas del día 01 del mes de diciembre del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del: CIIDIR-IPN Unidad Durango para examinar la tesis titulada:

Detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital

Presentada por el alumno:

SALAZAR **ARRIETA** **SUSANA GABRIELA**

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	1	4	0	7	5	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis



Dr. Armando Cortés Ortiz



M. en C. Lizeth Ruacho González



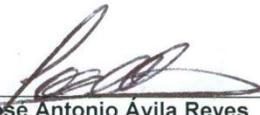
Dra. María Elena Pérez López

Dr. Gustavo Pérez Verdín



M. en C. Irma Lorena López Enríquez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



Dr. José Antonio Ávila Reyes



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Durango, Dgo., el día **01** del mes de **diciembre** del año **2016**, la que suscribe **Susana Gabriela Salazar Arrieta** alumna del Programa de **Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental**, con número de registro **B140753**, adscrita al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN Unidad Durango**, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Armando Cortés Ortiz** y de la **M. en C. Lizeth Ruacho González** y cede los derechos del trabajo titulado **“Detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones gabriela.arrieta@hotmail.com, c_armando25@yahoo.com.mx y liz_3626@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Susana Gabriela Salazar Arrieta', is written over a horizontal line.

SUSANA GABRIELA SALAZAR ARRIETA

El presente trabajo se llevó a cabo en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango del Instituto Politécnico Nacional bajo la dirección del Dr. Armando Cortés Ortiz y la M. en C. Lizeth Ruacho González

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de posgrado con la cual realicé mis estudios de maestría. Gracias CIIDIR Durango del Instituto Politécnico Nacional por el crecimiento personal y profesional que fomentaron en mí, este proyecto no tendría los resultados obtenidos sin el apoyo de las grandes personas que lo conforman.

Gracias a mis directores de tesis el Dr. Armando Cortés Ortíz y la a la M. en C. Lizeth Ruacho González por la paciencia y la dedicación que ponen en compartir su experiencia, han formado en mi una gran admiración hacia ambos. Gracias infinitas a mis asesores por las aportaciones y comentarios que me permitieron mejorar mi trabajo.

Gracias a mi familia por el apoyo moral para seguir adelante, son mi inspiración y mi mayor fuerza, Mami gracias por los tés y los desayunos, después de cada día de trabajo era reconfortante sentir tu cariño. Sería interminable este apartado si agradeciera a cada una de las personas que me motivan a crecer día con día, entre mi Sis, primos, sobrinos y tíos han creado memorias invaluable que me reafirman que la vida es para compartirse con quienes te hacen feliz.

A la personita que esta aventura me regalo y que sin su compañía no sería lo que fue, René gracias por tus platicas, los consejos y las palabras que casualmente siempre eran las que necesitaba escuchar.

Las amistades que aquí se crearon son uno de los tesoros más valiosos que conservo.

ÍNDICE

I.	ANTECEDENTES	9
1.1	Cuenca Hidrológica	9
1.1.1.	Cuenca San Pedro Mezquital	10
1.2	Vulnerabilidad	11
1.3	Cobertura del suelo	11
1.4	Sistemas de Información Geográfica	13
1.4.1	Imágenes de Satélite	13
1.4.2	Pre-procesamiento de imágenes de satélite	14
1.4.3	Índice de vegetación	14
1.4.4	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	15
1.5	Análisis de cambios en cobertura del suelo	15
1.6	Metodologías para el cálculo de Erosión Actual	16
1.7	Evaluación multicriterio	17
II.	JUSTIFICACIÓN	19
III.	OBJETIVOS	20
3.1	Objetivo general	20
3.2	Objetivos específicos	20
IV.	Preguntas de investigación	20
V.	MATERIALES Y METODOS	21
5.1	Descripción del área de estudio	21
5.1.1.	Tipo de Cobertura del Suelo	22
5.1.2.	Tipos de Suelo	25
5.1.2	Áreas Naturales Protegidas	27
5.2	Método para la detección de áreas vulnerables en la cuenca del Río San Pedro Mezquital	28
5.3	Determinación de las áreas desprovistas de vegetación	30
5.4	Metodología para análisis de cambios en cobertura del suelo	32
5.5	Determinación de la Erosión Actual	34
5.5.1	Factor de erosividad de la lluvia R	35
5.5.2	Factor de erodabilidad del suelo K	36
5.5.3	Factor topográfico longitud-pendiente <i>LS</i>	38

5.5.4	Factor de vegetación y cultivo C.....	40
5.5.5	Factor de práctica de soporte P.....	41
5.6	Normalización de criterios.....	42
5.6.1	Funciones de Normalización.....	42
5.7	Determinación de los pesos para cada variable.....	44
5.8	Análisis de sensibilidad.....	45
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
6.1	Áreas desprovistas de vegetación por medio del cálculo de NDVI.....	46
6.2	Análisis de cambios en Cuenca del Río San Pedro-Mezquital.....	47
6.3	Erosión actual del suelo en la cuenca.....	49
6.4	Determinación de pesos para cada criterio.....	50
6.5	Áreas vulnerables cuenca Río San Pedro Mezquital.....	50
6.5.1	Subcuenca Santiaguillo.....	51
6.5.2	Subcuenca Graseros.....	52
6.5.3	Subcuenca Tunal.....	54
6.5.4	Subcuenca Durango.....	54
6.5.5	Subcuenca Santiago.....	55
6.5.6	Subcuenca Poanas.....	57
6.5.7	Subcuenca Súchil.....	57
6.5.8	Subcuenca Saucedá.....	59
6.5.9	Subcuenca Mezquital.....	60
6.5.10	Subcuenca San Pedro.....	61
6.6	Análisis de sensibilidad.....	63
6.7	Visitas de Campo en Subcuenca Santiaguillo.....	66
VII.	Conclusiones.....	68
VIII.	Recomendaciones.....	69
IX.	Bibliografía.....	71
X.	Anexos.....	78

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.-Subcuencas de la Cuenca del Río San Pedro Mezquital	22
Figura 2.-Tipo de cobertura del suelo Cuenca San Pedro Mezquital	23
Figura 3.-Áreas Naturales Protegidas en la cuenca Río San Pedro Mezquital.....	28
Figura 4.- Metodología general	30
Figura 5.-imágenes de satélite realce de vegetación (combinación 6,5,4)	31
Figura 6.-Obtención de NDVI	32
Figura 7.- Metodología de identificación de cambios en cobertura del suelo.....	33
Figura 8.-Cambios en cobertura del suelo cuenca Río San Pedro Mezquital	33
Figura 9.-Ejemplo de cálculo de factores de erosión para subcuenca Santiaguillo	34
Figura 10.-Regionalización nacional de factor R (Cortés, 1991), Fuente (Magaña, 2003).	35
Figura 11.- Metodología para obtener factores L y S	39
Figura 12.-Función Sigmoidea Incremento continuo	43
Figura 13.- Función sigmoidea simétrica.....	43
Figura 14.- Función Linear incremento continuo.....	43
Figura 15.- Comparación pareada Satty en IDRISI	44
Figura 16.- Pesos para cada criterio de vulnerabilidad	45
Figura 17.- Áreas vulnerables en la cuenca Río San Pedro Mezquital	51
Figura 18.-Áreas vulnerables en el área Natural Protegida la Michilía.....	53
Figura 19.-Subcuenca Santiago y área de protección de recursos naturales	56
Figura 20.-influencia de C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit en subcuenca Súchil	58
Figura 21.-Influencia de C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit y la biosfera de la Michilía en subcuenca Mezquital.....	61
Figura 22.- Áreas vulnerables al medio físico -Marismas Nacionales	62
Figura 23.- Análisis de similitud.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-Área de Subcuencas pertenecientes a la cuenca Río San Pedro Mezquital	21
Tabla 2.-Tipos de Cobertura del Suelo	24
Tabla 3.- Tipo de Suelo Cuenca San Pedro Mezquital	26
Tabla 4.-Literatura consultada.....	29
Tabla 5.- Ecuaciones regionalizadas para la República Mexicana (Becerra, 1997) (Fuente Montes et al., 2011).	36
Tabla 6.- Factor K, de acuerdo a clasificación WRB	37
Tabla 7.-Factor C para Uso de Suelo y Vegetación.	41
Tabla 8.-Valores NDVI áreas desprovistas de vegetación	46
Tabla 9.-Áreas de cambio en cobertura del suelo en la cuenca del Río San Pedro Mezquital.....	48
Tabla 10.-Resultados de Erosión por Subcuenca.....	49
Tabla 11.-Riesgo de Erosión t/Ha/año fuente: Mejía 2009.....	50
Tabla 12.-Cruce de tablas subcuenca Santiaguillo.....	52
Tabla 13.- Cruce de tablas subcuenca Graseros.....	53
Tabla 14.- Cruce de tablas subcuenca Tunal	54
Tabla 15.- Cruce de tablas subcuenca Durango.....	55
Tabla 16.- Cruce de mapas subcuenca Santiago	56
Tabla 17.- Cruce de tablas subcuenca Poanas.....	57
Tabla 18.- Cruce de tablas serie I y serie V	58
Tabla 19.-Cruce de tablas subcuenca Saucedá.	59
Tabla 20.- Cruce de tablas subcuenca Mezquital	60
Tabla 21.-Cruce de tablas subcuenca San Pedro.....	63
Tabla 22.-Índice de Kappa para análisis de sensibilidad	64
Tabla 23.- Valoración del Coeficiente de Kappa (Landis y Koch, 1977).	64
Tabla 24.- Recorrido en Subcuenca Santiaguillo	66

RESUMEN

Se realizó un análisis de vulnerabilidad al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital considerando tres criterios: Áreas desprovistas de vegetación, cambios en la cobertura del suelo y erosión actual, y se integraron gracias a la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio. Las áreas desprovistas de vegetación se detectaron por medio de imágenes de satélite y cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para identificar las zonas con cambios en la cobertura del suelo se realizó un cruce de mapas utilizando la Serie I y Serie V de uso de suelo y vegetación de INEGI que corresponden a los años 1976-1982 y 2012-2013 respectivamente, el cálculo de la erosión actual del suelo se realizó con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Los tres mapas obtenidos de dichos criterios se integraron para crear un mapa de vulnerabilidad para la cuenca, donde se detecta que las subcuencas Mezquital y San Pedro son las que presentan mayor vulnerabilidad al medio físico. Esto se relaciona con el impacto en la cobertura, puesto que se registra una disminución de 69,896.6 ha de bosque en la subcuenca Mezquital y 179,767.5 Ha en la subcuenca San Pedro, además se calcula que ambas presentan aproximadamente 3000 t/ha/año de erosión actual debido a sus características físicas como la pendiente del terreno, el tipo de suelo y el grado de erodabilidad de la lluvia en la zona. Las áreas naturales protegidas que se encuentran en la cuenca presentan cambios en la cobertura y esto indica que su objetivo de conservación no se cumple totalmente y se deben analizar las estrategias de acción del proyecto.

ABSTRACT

A vulnerability analysis was carried out on the physical environment in the San Pedro Mezquital River basin, considering three criteria: Areas devoid of vegetation, changes in soil cover and current erosion, they were integrated thanks to the application of Geographic Information Systems and Assessment Multicriterio. The areas devoid of vegetation were detected by means of satellite images and calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). In order to identify areas with changes in soil cover, a mapping cross was performed using Series I and Series V Of land use and vegetation of INEGI corresponding to the years 1976-1982 and 2012-2013 respectively, the calculation of the current soil erosion was made based on the universal soil loss equation (USLE). The three maps obtained from these criteria were integrated to create a vulnerability map for the basin, where it is detected that the Mezquital and San Pedro sub-basins are the ones that present greater vulnerability to the physical environment. This is related to the impact on the coverage, since there is a reduction of 69,896.6 ha of forest in the Mezquital sub-basin and 179,767.5 ha in the San Pedro sub-basin, in addition it is estimated that both present approximately 3000 t /ha/year of current erosion, due to their physical characteristics such as the slope of the land, the type of soil and the degree of erodability of the rain in the area. The protected natural areas in the basin show changes in coverage and this indicates that their conservation objective is not fully met and the project's action strategies should be analyzed.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas son unidades geográficas de importancia ambiental, ya que brindan servicios ecosistémicos como desarrollo del ciclo hidrológico, producción de alimentos, captura de carbono, belleza escénica, entre otros. La extracción no controlada de los recursos afecta la funcionalidad de la misma, directamente en la eficiencia y productividad de la agricultura, así como en la disminución de la disponibilidad de recursos hídricos.

En Durango se encuentra la cuenca del Río San Pedro Mezquital comprendiendo parte de los estados de Zacatecas y Nayarit. Esta cuenca alberga alrededor de 460 especies de vertebrados, de los cuales 51 son endémicas y al menos 60 se encuentran en peligro de extinción, principalmente por efecto de la sobreexplotación y destrucción de hábitats (WWF, 2012). Además, cuenta con cuatro áreas naturales protegidas; el Área de protección de recursos naturales Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 Estado de Nayarit (C.A.D.N.R 043 Nayarit), La Reserva de Biosfera La Michilía (Durango), el Parque Nacional Sierra de Órganos (Zacatecas) y la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales Nayarit (RBMNN) que representa entre el 15 y 20 % del total de ecosistemas de manglares existente en el país y es parte fundamental del corredor de aves migratorias del Pacífico (CONANP, 2016).

Las cuencas hidrográficas se conforman de una gran variedad de elementos físicos como el relieve, el tipo de suelo y la red de drenaje, que al combinarse con factores entrópicos y ambientales pueden generar vulnerabilidad en el ambiente (Gaspari *et al.*, 2011).

La vulnerabilidad es una condición de susceptibilidad a fenómenos naturales extremos y acciones antrópicas, dentro de un espacio y tiempo determinado con los que se pueden ver amenazados los recursos naturales, productividad económica y calidad de vida de una región (BID, 1999; Gómez, 2001).

El análisis conjunto de factores que determinan la vulnerabilidad, se ha facilitado con la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), percepción remota y técnicas de evaluación Multicriterio (EMC), facilitando el diseño, la elaboración de

mapas y la integración de los factores (Pozzobon y Gutiérrez, 2003) que determinan la vulnerabilidad al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital.

Los criterios que se consideraron para dicho análisis fueron: áreas desprovistas de vegetación, las cuales se identificaron por medio de análisis de imágenes de satélite y el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); cambios en la cobertura del suelo utilizando las Series I y V de uso de suelo y vegetación de INEGI; erosión actual aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) por medio de Sistemas de Información Geográfica.

En las áreas vulnerables al medio físico en la cuenca se encuentran desprovistas de vegetación, presentan cambios en la cobertura del suelo y erosión actual mayor a 301 ton/ha/año, identificándose como las zonas más afectadas las subcuencas San Pedro y Mezquital.

Con la detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca se pretende crear herramientas para la toma de decisiones, que minimicen el impacto de las actividades humanas que puedan afectar su funcionalidad si no se establecen planes de manejo sustentables, en donde además del presente estudio se integren estudios sociales, económicos y ambientales que complementen el análisis de vulnerabilidad.

I. ANTECEDENTES

1.1 Cuenca Hidrológica

La cuenca hidrológica es una unidad del territorio delimitada por un parteaguas, que se refiere a la línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación de la cuenca por donde se distribuye el agua, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida, que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal (DOF, 2016).

Entre los servicios ambientales que se derivan particularmente de las cuencas hidrológicas y sus componentes se encuentran: regulación del recurso hídrico y del clima, conservación de los ciclos hidrológicos, recarga de acuíferos, control de inundaciones, oferta y calidad del agua, retención de sedimentos, formación de suelos, reciclado de nutrientes, captura de carbono, fertilidad de suelos, tratamiento de residuos, refugio de especies, conservación y protección de la biodiversidad, recreación cultural, belleza escénica, entre otros (DOF, 2016).

Los servicios ambientales dependen del buen funcionamiento hidrológico de una cuenca, sin embargo, no se proveen exclusivamente por la conservación del espacio, sino que depende de la interacción entre los elementos que conforman una cuenca como: geología, topografía, suelos, vegetación, cuerpos de agua y las prácticas de manejo de la misma (Madrid-Ramírez, 2011).

Las cuencas son ecosistemas dinámicos que tienden a variar en el tiempo, Sin embargo, los cambios significativos que se llevan a cabo por efecto de las actividades humanas, ponen en peligro su equilibrio ecológico (SEMARNAT, 2013), ya que se ven alterados por la variación del régimen de caudales, lo que puede producir sustituciones importantes en las comunidades biológicas y por tanto en la funcionalidad de la cuenca (Franquet, 2009).

1.1.1. Cuenca San Pedro Mezquital

La cuenca Río San Pedro Mezquital cruza la Sierra Madre Occidental, además de conectar el Desierto Chihuahuense con la región marina del Golfo de California, dos ecorregiones prioritarias en México (WWF, 2012; CONABIO, 2013). En ella la población establecida es de poco más de 1,127,453 habitantes (Estudios técnicos subregión Hidrológica Río San Pedro., 2014), además de que se puede apreciar una gran riqueza natural, cultural y social ya que aun habitan grupos étnicos como Tepehuanes del sur, Coras, Huicholes y Mexicaneros (WWF, 2012).

El agua proveniente del río permite la existencia de complejas redes ecológicas, además de proveer de trabajo y alimento en la región al favorecer el crecimiento de los bosques, la agricultura y la ganadería. En la cuenca alta se pueden encontrar: bosques de pino y encino considerados prioridad mundial para la conservación de la diversidad biológica, el humedal de Málaga que es una parada de miles de aves migratorias y corredores de ahuehetes fresnos y sauces en la ribera del río formando parte indispensable en el desplazamiento de la fauna local (WWF, 2012).

El corredor que forma el cañón del Mezquital le permite a las especies expandir su área de distribución, creando comunidades de gran riqueza biológica en una zona donde coinciden las dos regiones biogeográficas de México, el neotropical y el neártico. Además, propicia que la humedad de la costa de Nayarit ascienda río arriba, favoreciendo el aumento de las lluvias en el altiplano de Durango y con ello la recarga de acuíferos (WWF, 2012).

Con la creciente del río en la temporada de lluvias en la parte baja de la cuenca, se mantiene la salud de los manglares y el equilibrio de la salinidad gracias al aporte de agua dulce. Hay un beneficio directo en las actividades económicas, por ejemplo en la pesca las raíces de los manglares ofrecen protección a los peces en su fase larvaria y juvenil. El valor de los servicios que proveen los manglares del Golfo de California a las pesquerías es de aproximadamente \$37,500 USD por hectárea cada año, además de \$6,700 USD por hectárea al año en servicios indirectos como la depuración del agua (WWF,2012).

1.2 Vulnerabilidad

La dinámica socioeconómica actualmente tiende a la sobreexplotación de los recursos del ambiente y lleva de forma inevitable a ecosistemas altamente vulnerables que son incapaces de adaptarse para remediar los efectos directos o indirectos de la acción humana, y eso conlleva a altos riesgos para las comunidades que los explotan o habitan (Wilches-Chaux, 1993).

La vulnerabilidad ambiental es un concepto que se relaciona con la susceptibilidad o propensión específica del medio y los recursos naturales a ser degradados, ya sea por sus características físicas o biológicas. La degradación de los suelos aumenta con la presencia de riesgos ambientales que son resultado de la interacción entre un fenómeno natural extremo y acciones antrópicas en un espacio y tiempo determinado, repercutiendo en una reducción de la productividad agrícola y de los recursos hídricos (Gaspari *et al.*, 2011).

La vulnerabilidad ambiental en cuencas se encuentra determinada por factores físicos como posición del terreno, textura del suelo, vegetación y uso de suelo, pendiente, uso de suelo sin prácticas de manejo y densidad de drenaje (Gaspari *et al.* 2011).

La vulnerabilidad de los lugares y personas a las perturbaciones climáticas, económicas o socio-políticas se generan en parte a los cambios en la cobertura del suelo, ya que se consideran fuente y sumidero de material y flujo de energía permitiendo con ello el mantenimiento del ciclo hidrológico (Kasperson *et al.*, 1995; Peña-Llovis, 2007).

Este proceso tiende a incrementarse por efecto de la deforestación y falta de medidas de conservación del suelo, por lo que, se considera la conservación y la rehabilitación como parte fundamental para el desarrollo sustentable (Gaspari *et al.*, 2011).

1.3 Cobertura del suelo

La cobertura del suelo hace referencia al aspecto morfológico y tangible del suelo, comprendiendo todos los aspectos que forman parte del recubrimiento de la

superficie terrestre, ya sean de origen natural o cultural. Estos aspectos pueden ser visibles y medibles por medio fotografías aéreas o imágenes de satélite (CVC, 2012). Formando una expresión conjunta, el uso de suelo y la cobertura vegetal, constituyen una expresión del medio biofísico de un área (Velázquez *et al.*, 2010).

Los cambios en la cobertura del suelo impactan en la diversidad biológica, contribuyen al cambio climático local y regional, así como son la principal causa de degradación del suelo afectando la capacidad de los ecosistemas naturales para mantener sus servicios ambientales. Además, repercuten en la productividad de las actividades económicas primarias, la calidad del suelo, el incremento en la escorrentía y sedimentación, e influyen en la vulnerabilidad de los ecosistemas a las perturbaciones ambientales, económicas y sociales (Peña-Lovis, 2007).

El uso del suelo se refiere a las actividades o funciones que se desarrollan sobre la cobertura, ya sea de forma parcial o permanente, con el objetivo de cambiarla, preservarla o para aprovechamiento de sus recursos en la obtención de productos, como la agricultura (CVC, 2012).

La vegetación es la expresión integral y sucesiva entre los factores bióticos y abióticos en un lugar y tiempo determinado, por lo que es un elemento indicador de la condición de los ecosistemas, siendo una de las más importantes manifestaciones espaciales de paisajes naturales (Velázquez *et al.*, 2010).

La extensión y distribución de la cobertura del suelo son un indicador de las actividades de tipo natural o antropogénico que han propiciado un cambio en la naturaleza, considerando 2 procesos importantes: recuperación y perturbación, ya sea de forma natural o por intervención del ser humano como es el caso de la sucesión o las plantaciones, estos procesos brindan información sobre el estado ambiental de las cuencas y de su capacidad para proporcionar bienes y servicios fundamentales para la sociedad (Palacio *et al.*, 2004).

La pérdida de cobertura vegetal no sólo afecta a los ecosistemas naturales, sino también a los cuerpos de agua superficiales y por tanto a los recursos hídricos del país. En México, del año 1973 a 1993 se registró una tasa de deforestación en bosques riparios o vegetación de galería del 3.6%, además de contar con una

disminución de los cuerpos de agua dulce epicontinentales un 0.83% (Aguilar *et al.*, 2000).

1.4 Sistemas de Información Geográfica

Los avances tecnológicos han permitido mejorar el análisis del territorio gracias a la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y percepción remota (PR) (INEGI, 2014).

Un Sistemas de Información Geográfica (SIG) se refiere al conjunto de técnicas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desarrollar datos espaciales del territorio. Su aplicación se permite realizar actividades como: descripción, ordenación, planificación y gestión del territorio (INEGI, 2014)

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de diversos productos, proporciona bases de datos con información sobre la vegetación y el uso de suelo, siendo éstos de gran utilidad para el análisis de cobertura y descripción del territorio (INEGI, 2015).

La teledetección espacial (sensores remotos) se define como el conjunto de técnicas utilizadas en la obtención de información sobre objetos sin tener contacto físico, por medio de la adquisición y registro de energía reflejada o emitida para luego traducirla a archivos de computadora o imágenes para su posterior interpretación (Samaniego, 2015).

1.4.1 Imágenes de Satélite

La utilización de imágenes de satélite se ha incrementado notablemente. Hace una década la información espacial solo era utilizada por especialistas, mientras que actualmente diversos usuarios se pueden ver beneficiados con la información capturada por diversos sensores espaciales, aún cuando se debe considerar que requiere intensas horas de trabajo y financiamiento económico en algunos casos para la obtención, pre-procesamiento y análisis de la información. Se pueden encontrar imágenes de alta resolución (SPOT-HRV, Ikonos-OSA), media resolución (Landsat-MSS/TM/ETM+, Deimos-1-SLIM6,) y baja resolución (Terra/Aqua-MODIS, Meteosat- SEVIRI,) (Hantson *et al.*, 2011).

1.4.2 Pre-procesamiento de imágenes de satélite

El procesamiento digital de imágenes de satélite se refiere al uso de software y hardware para manipular los datos de imágenes almacenados en un formato digital, teniendo como objetivo realzar los datos geográficos y extraer información cuantitativa que permita o facilite la toma de decisiones (Samaniego, 2015).

Una imagen digital se conforma de pequeñas áreas llamadas píxeles, que corresponden a un área de la superficie terrestre en formato raster, el cual se encuentra ordenado en filas horizontales llamadas líneas y columnas verticales llamadas muestras. Cada píxel representa un número digital o "ND" que al unirse constituyen diferentes tipos de datos según su fuente, como en el caso de datos Landsat y SPOT los "NDs" representan la intensidad de energía reflejada en longitudes de onda visible, infrarrojo y otras, mientras que para los modelos digitales de elevación (MDE's), los NDs representan la elevación del terreno (Samaniego, 2015).

1.4.3 Índice de vegetación

En las últimas décadas se ha aumentado la aplicación de índices de vegetación calculados a partir de datos espectrales obtenidos por sensores remotos, esto con la finalidad de obtener información a gran escala sobre el estado de la vegetación y sus características (Carvacho y Sánchez, 2010).

Estos índices aprovechan el comportamiento radiométrico de la vegetación en las diferentes bandas espectrales, especialmente entre la banda roja puesto que los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que recibe, mientras que el infrarrojo cercano apenas se ve afectado. Estos contrastes son los que se aprovechan para detectar diferencias en la vegetación. Chengyuan *et al.* (2008) identificaron alrededor de cincuenta Índices de Vegetación, entre los cuales, el NDVI, es el que ha sido más utilizado en estudios de evaluación de la dinámica vegetal, gracias a su facilidad de cálculo e interpretación (Carvacho y Sánchez, 2010).

1.4.4 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), propuesto por Rouse *et al.*, 1974, tiene un gran potencial para identificar variaciones en la estructura, composición y diversidad de las comunidades vegetales, así como en la identificación de riqueza de especies, generando datos de relevancia para la caracterización regional de la vegetación y su ambiente, así como la productividad de los ecosistemas (Carvacho y Sánchez, 2010).

El valor del NDVI es el resultado de dividir la diferencia de la reflectividad en banda del infrarrojo cercano (banda 4) y la reflectividad en la banda roja (banda3), entre la suma de las mismas, y se representa en un rango de -1 a 1. De acuerdo a Chuviego (2008), valores de 0 a 0.1 corresponde a suelos desnudos, valores de 0.2 a 0.3 corresponde a pastizales y matorrales, valores de 0.4 a 0.5 zonas de bosque y valores entre 0.5 y 0.7 a vegetación densa (Salas, 2010).

Considerando los valores de reflectividad y la adecuada interpretación de los resultados, el NDVI refleja el estado de la vegetación por lo que puede ser considerado un indicador de la situación ambiental de la cobertura del suelo y de las alteraciones de la misma en el caso de análisis de cambios geoespaciales.

1.5 Análisis de cambios en cobertura del suelo

Los ecosistemas se encuentran sometidos a cambios constantes, que se producen a distintas escalas espaciales y temporales (Coppin *et al.*, 2004). Sin embargo, Keith *et al.*, (2013) identifican al cambio de cobertura del suelo como una de las causas más significativas de alteración o perturbación de las funciones de las comunidades biológicas, que puede ser efecto de la introducción de especies exóticas o pérdida de algún elemento clave, modificando así su estructura y funcionalidad (Alaniz-Baeza, 2014).

El crecimiento agrícola hacia superficies forestales tiene como consecuencia mayor susceptibilidad a los procesos erosivos y con ello una baja en la productividad del suelo (Pineda-Jaimes *et al.*, 2009). El análisis multitemporal permite detectar cambios en la cobertura del suelo entre diferentes fechas de referencia, lo que

permite analizar la evolución del medio natural o las repercusiones de las actividades antropogénicas en el medio (Ruiz *et al.*, 2013).

El análisis cartográfico de los cambios de cobertura del suelo se obtiene a través de la comparación de mapas de diferentes fechas, en México el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha generado 5 series de uso de suelo y vegetación desde 1976-1982 hasta 2011-2013, esta comparación es un proceso sencillo, gracias a la aplicación de un sistema de Información Geográfica y el uso de la información disponible en INEGI. Sin embargo, en la práctica este método puede llevar a sobre-evaluar los cambios ya que los errores temáticos (polígonos con atributos erróneos) y de posición (delimitación incorrecta de los polígonos o desfases) crean falsos cambios (Mas y Fernández 2003; Mas *et al.*, 2009).

El análisis de cambios también se puede llevar a cabo por medio de análisis visual de imágenes de satélite y aplicación de metodologías de análisis como las de divergencias, regresiones, índices de vegetación, o componentes principales, brindan un análisis más detallado sobre el área de interés (como se cita en López y Plata, 2007).

El método empleado para llevar a cabo el análisis de cambios en la cobertura del suelo está relacionado con la disponibilidad de tiempo, datos, extensión del área de estudio, las limitantes informáticas y sobre todo con el tipo de aplicación que se desee dar a la información generada (como se cita en López y Plata, 2007).

1.6 Metodologías para el cálculo de Erosión Actual

Según CONAZA (1994) “El 65% del territorio en México tiene pendientes mayores a 10%, esta situación asociada a una escasa cobertura vegetal al inicio de la temporada de lluvias, incrementa el riesgo de erosión hídrica en más del 70% del territorio, llegando a tener valores extremos aproximadamente en un 9% del país”. La erosión se puede evaluar mediante metodologías directas o indirectas, normalmente los métodos indirectos reportan valores más altos, en cambio los métodos directos suelen proporcionar datos precisos, pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos (Pando *et al.*, 2003).

El riesgo de erosión se define como el efecto combinado de los factores causales de la misma (lluvia, escurrimiento, suelo y topografía). La combinación de estos factores se denotan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo: EUPS o USLE por sus siglas en inglés, esta metodología fue desarrollada por Wischmeier y Smith (1965, 1978) permitiendo estimar la erosión anual, lo que facilita la toma de decisiones en la planeación de la conservación del suelo. Aunque su diseño fue dirigido al estudio de parcelas se deben considerar algunas modificaciones para emplearse en áreas de mayor dimensión como el caso una cuenca hidrográfica (Montes *et al.*, 2000).

Basándose en el planteamiento de la USLE, Williams y Berndt (1972) propusieron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés). Esta estima la producción de sedimentos por tormenta, en lugar de emplear un factor para la energía de precipitación (R) introduce un factor para los escurrimientos, siendo más factible su aplicación en zonas áridas y semiáridas (Ramírez, 2009).

En 1987 se comenzó una revisión de los criterios y los datos considerados en la USLE, dando origen a la RUSLE de Renard *et al.* (1997), la cual conserva los criterios y se modifica la metodología para evaluar los factores (Ramírez, 2009).

1.7 Evaluación multicriterio

Un método de Evaluación multicriterio (EMC) puede ser útil para la clasificación, análisis y ordenamiento de una serie de alternativas a partir de criterios que se consideren importantes en la evaluación de un sinfín de escenarios (Pozzobon y Gutiérrez, 2003).

La Evaluación multicriterio (EMC) se fundamenta en la evaluación de diferentes alternativas basándose en una serie de criterios, siendo una matriz de evaluación la mejor forma de organizarlos y representar la relación que hay entre ellos, en esta matriz los criterios (j) pueden ocupar la columna principal, y las alternativas (i) la fila principal. Una vez asignados los pesos a cada uno de los criterios, éstos se pueden incluir en una matriz de prioridades para después poder implementar los procedimientos de EMC (Pozzobon y Gutiérrez, 2003).

La aplicación de los métodos de EMC involucra las siguientes fases (Gómez y Barredo, 2005; García-Aguilar, 2012):

- ❖ Definición del problema
- ❖ Búsqueda de alternativas y selección de criterios. Se analizan las alternativas de solución y se establecen los criterios de evaluación de dichas alternativas.
- ❖ Evaluación de las alternativas. Se estima el grado de ajuste y de impacto de cada alternativa en función de los criterios establecidos.
- ❖ Selección de alternativas. Se ordenan las alternativas en función de lo que se desea evaluar
- ❖ Análisis de sensibilidad. Se realizan modificaciones sobre los componentes del modelo para evaluar su estabilidad y de qué manera las modificaciones alteran los resultados.

II. JUSTIFICACIÓN

Según Ávila-García, (2008) la vulnerabilidad se define como: “La condición por el cual la población humana y los ecosistemas están sujetos al riesgo de sufrir daños o amenazas ocasionadas por factores biofísicos y sociales, generando una situación de limitada o nula capacidad de respuesta frente a tal contingencia y grandes dificultades para adaptarse al nuevo escenario generado por la materialización del riesgo”.

La mayoría de las cuencas hidrológicas presentan un alto grado de alteración debido a diferentes presiones antropogénicas como el crecimiento de los asentamientos humanos, el sobrepastoreo ya que es el principal motivo de la degradación de las praderas naturales, el laboreo de los suelos, y la quema indiscriminada de campos contribuyendo con el deterioro de la cobertura vegetal (Scasso, 2002). En México de 1970 a 2009 más de 80% de las cuencas perdieron entre el 1% y 20% de su vegetación primaria (Cuevas *et al.*, 2010), poniendo en riesgo su capacidad para proveer bienes y servicios ambientales.

Las actividades económicas como agricultura, ganadería, minería y aprovechamiento forestal, pueden alterar la funcionalidad de la cuenca si se realizan en áreas donde las características físicas son vulnerables. Por lo que fue necesario identificar las zonas con mayor vulnerabilidad al medio físico, con la finalidad de crear herramientas para la toma de decisiones en la cuenca que lleven a identificar las áreas prioritarias para la elaboración y desarrollo de proyectos de restauración y conservación con la finalidad de mejorar calidad de la cobertura del suelo y por ende el incremento en la recarga de acuíferos.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Detectar las áreas con mayor vulnerabilidad al medio físico en la cuenca del Río San Pedro-Mezquital con base en cambios de cobertura del suelo, áreas deforestadas y erosión actual, por medio del uso de Sistemas de Información Geográfica y Percepción remota.

3.2 Objetivos específicos

3.1.1 Identificar cambios significativos en la cobertura del suelo

3.1.2 Detectar las áreas desprovistas de vegetación por medio del cálculo de NDVI

3.1.3 Estimar la erosión actual del suelo en la cuenca

IV. Preguntas de investigación

- ¿Ha habido cambios significativos en la cobertura vegetal de la cuenca San Pedro Mezquital de los años 1982 a 2013?
- ¿En qué medida la cuenca es vulnerable a la erosión actual?
- ¿Cuáles son las zonas prioritarias para realizar trabajos de conservación y restauración?

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del Río San Pedro Mezquital se encuentra ubicado en dentro de la región hidrológica 11, comprende una superficie de 2,767,406 ha de las cuales el 74% corresponde al estado de Durango, el 10% a Zacatecas y 16% a Nayarit, recorriendo una longitud de 540 Km desde el sur del estado de Durango hasta su desembocadura en marismas Nacionales en Nayarit.

Presenta un intervalo altitudinal que va del nivel del mar a los 3325 msnm. Y una precipitación media anual de 400 mm en el área más seca y de hasta 2000 mm en la parte baja. La cuenca está conformada por 10 Subcuencas como lo muestra la Figura1, siendo la Subcuenca Mezquital la de mayor superficie (tabla 1).

Tabla 1.-Área de Subcuencas pertenecientes a la cuenca Río San Pedro Mezquital

Subcuencas	Área Ha
R. Durango	490,079.38
R. Graseros	52,980.64
R. Mezquital	826,335.05
R. Poanas	255,672.02
R. Súchil	209,126.03
R. San Pedro	301,634.10
R. Santiago	105,448.91
R. Santiaguillo	254,695.41
R. Saucedá	253,569.04
R. Tunal	185,047.88
Total general	2,934,588.47

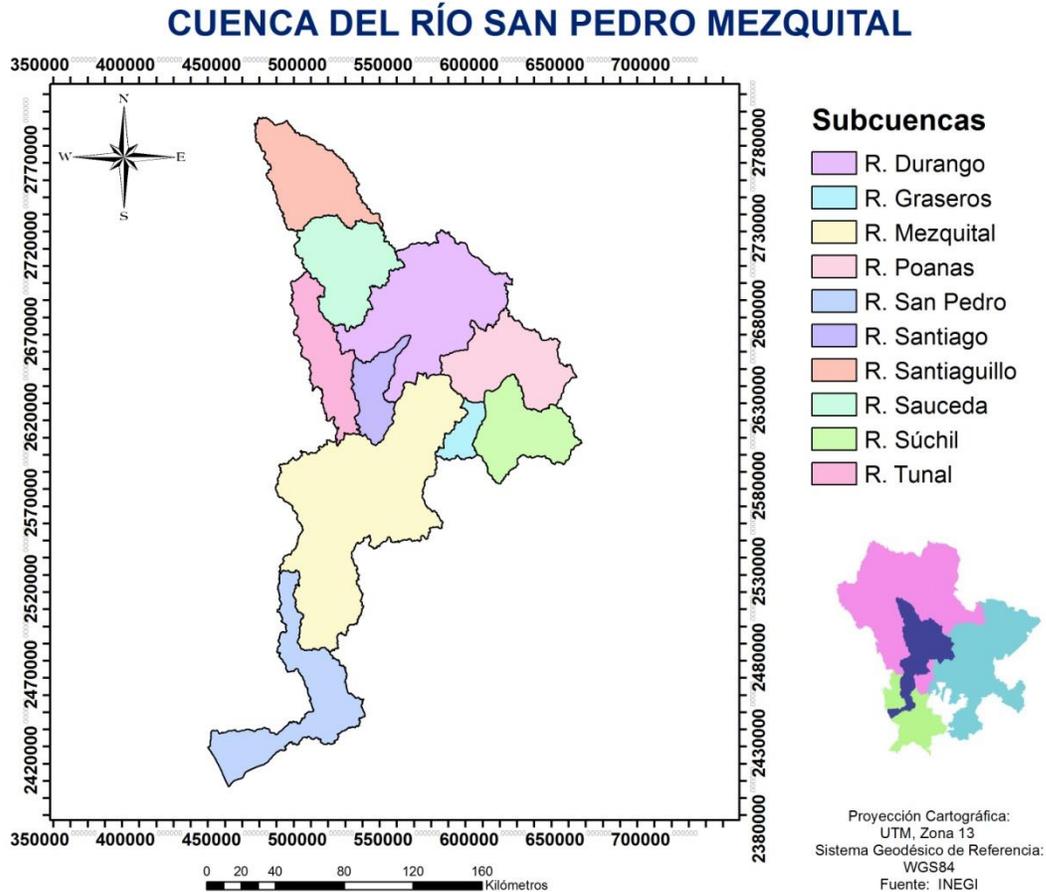


Figura 1.-Subcuencas de la Cuenca del Río San Pedro Mezquital

5.1.1. Tipo de Cobertura del Suelo

En el área de estudio se encuentran 12 tipos de vegetación (Figura 2), entre los que destacan los bosques, que ocupan cerca del 27.35% de la misma, del cual el bosque de pino-encino es el más abundante. Aproximadamente el 20% de la vegetación es agricultura, donde predomina la agricultura de temporal con una superficie de 431,846.2 Ha. Las selvas se distribuyen en menor cobertura con un 2.55 % y con preponderancia de la selva baja caducifolia (tabla 2).

Uso de Suelo y Vegetación Cuenca Río San Pedro Mezquital

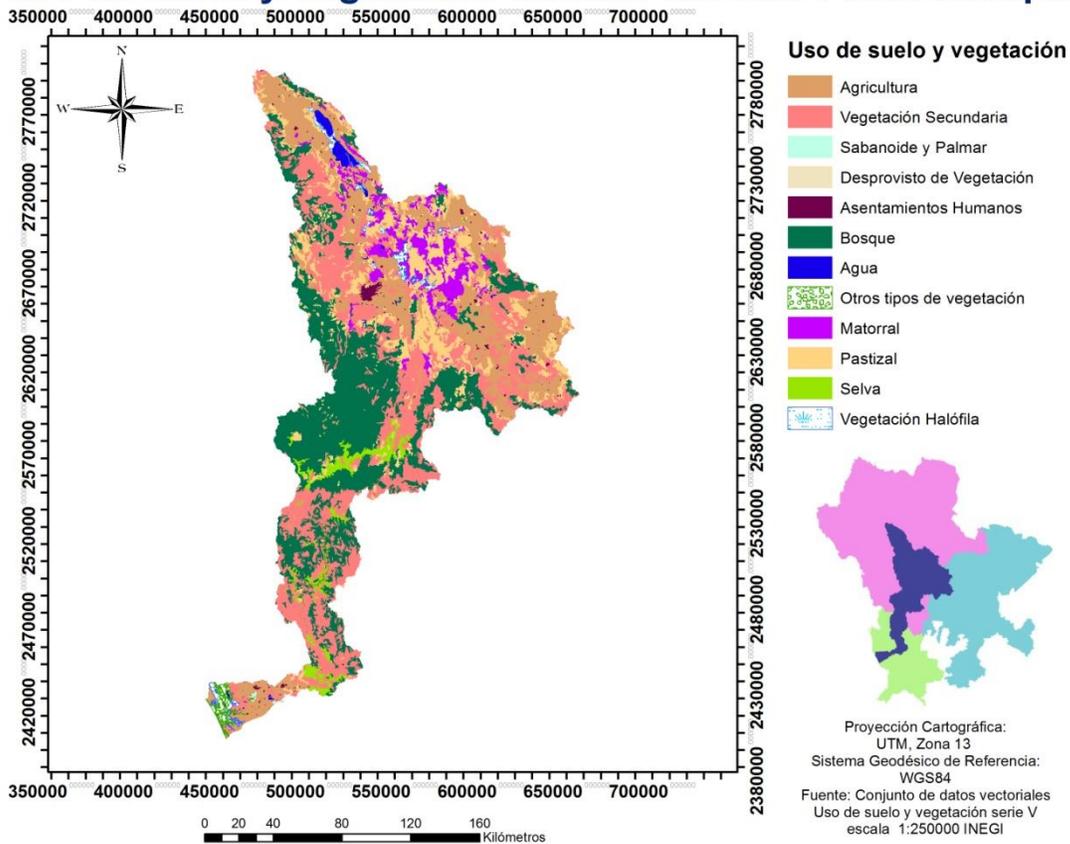


Figura 2.-Tipo de cobertura del suelo Cuenca San Pedro Mezquital

La vegetación secundaria representa el 27.99% de la superficie de la cuenca (tabla 2) y hace referencia a un tipo de vegetación que es eliminado o alterado por diversos factores humanos o naturales, teniendo como efecto una comunidad vegetal significativamente diferente a la original y con estructura y composición florística diversa (INEGI, 2014).

Tabla 2.-Tipos de Cobertura del Suelo

TIPO DE COBERTURA	SUPERFICIE ha	%
AGRICULTURA	613,717.72	20.91
Agricultura de riego anual	149,635.40	
Agricultura de riego anual y permanente	15,648.90	
Agricultura de riego anual y semipermanente	1,731.48	
Agricultura de riego permanente	14,855.77	
Agricultura de temporal anual	428,249.08	
Agricultura de temporal anual y permanente	3,087.86	
Agricultura de temporal permanente	509.23	
VEGETACIÓN SECUNDARIA	821,366.34	27.99
SABANOIDE Y PALMAR	1,990.50	0.07
SIN VEGETACIÓN APARENTE	5.89	0.0002
ASENTAMIENTOS HUMANOS	19,534.60	0.67
BOSQUE	802,685.90	27.35
Bosque cultivado	94.00	
Bosque de ayarín	5,555.79	
Bosque de encino	113,825.91	
Bosque de encino-pino	158,152.08	
Bosque de mezquite	6,362.94	
Bosque de pino	154,603.88	
Bosque de pino-encino	347,660.19	
Bosque mesófilo de montaña	16,431.11	
CUERPOS DE AGUA	29,216.74	1.00
OTRO TIPO DE VEGETACIÓN	15,746.14	0.54
Manglar	13,080.89	
Tular	442.15	
Vegetación de dunas costeras	372.01	
Vegetación de galería	1,851.09	
MATORRAL	147,649.50	5.03
PASTIZAL	370,109.88	12.61
Pastizal cultivado	3,811.94	
Pastizal inducido	90,422.91	
Pastizal natural	275,875.02	
SELVA	74,895.48	2.55
VEGETACIÓN HALÓFILA	37,669.68	1.28
Total general	2,934,588.37	100.00

Los bosques cultivados se consideran artificiales ya que son plantaciones de árboles, algunas veces de especies exóticas, con fines de recreación, estética o con el fin de evitar la erosión de suelo. Entre ellas se puede encontrar el pino (*Pinus* spp.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), cedro (*Cupressus* spp.), casuarina (*Casuarina* spp.), pirúl (*Schinus molle*), álamo o chopo (*Populus* spp.), fresno (*Fraxinus* spp.), aíle (*Alnus* spp.), entre otros (INEGI, 2014).

5.1.2. Tipos de Suelo

De acuerdo al conjunto de datos vectoriales edafológicos de INEGI (Figura 3) el tipo de suelo Regosol representa el 30.74% de superficie de la cuenca, seguido del Castañozem, Litosol y Cambisol con menos del 14%, mientras que el Solonchak es el tipo de suelo que se encuentra en menor proporción ya que solo representa el 1.03% de la cuenca (tabla 3).

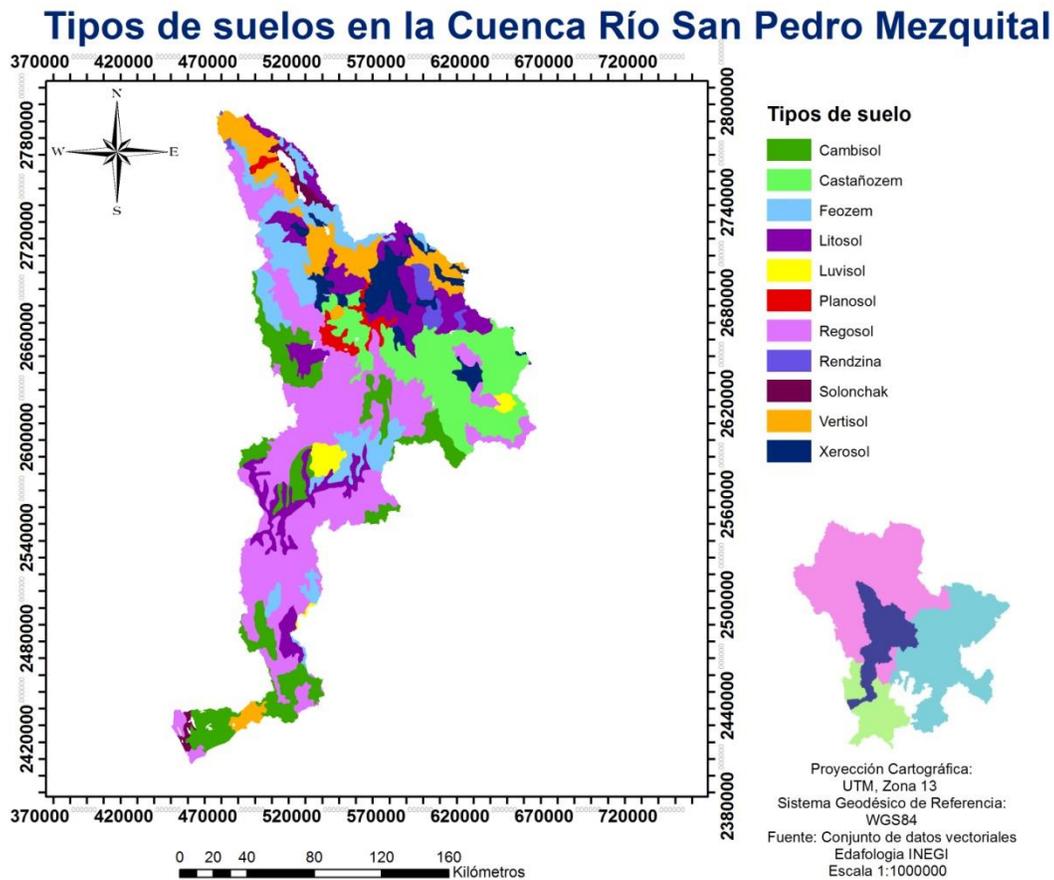


Figura 3.-Tipos de Suelo Cuenca San Pedro Mezquital

Tabla 3.- Tipo de Suelo Cuenca San Pedro Mezquital

Tipo de Suelo	Área ha	Porcentaje
Cambisol	369,032.4	12.58
Castañozem	406,544.2	13.85
Feozem	320,621.4	10.93
Litosol	369,301.7	12.58
Luvisol	44,830.7	1.53
Planosol	50,934.1	1.74
Regosol	902,138.2	30.74
Rendzina	42,515.1	1.45
Solonchak	30,238.7	1.03
Vertisol	234,989.6	8.01
Xerosol	146,649.5	5.00

Descripción de los tipos de suelo representativos de la cuenca (INEGI, 2004):

Regosol: Suelos con poco contenido de materia orgánica, su fertilidad es variable según las condiciones del área, su productividad depende de la profundidad y la presencia de roca, su textura es de media a gruesa y muchas veces son asociados con suelos Litosoles.

Castañozem: Suelos alcalinos que se encuentran en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales se puede encontrar vegetación de pastizal con algunas áreas de matorral, se caracteriza por presentar una capa superior de color pardo o rojizo oscuro con alto contenido de materia orgánica y nutriente ligeramente cementado en el subsuelo con textura de fina a media, siendo moderadamente susceptibles a la erosión.

Cambisol: Suelos formados recientemente en los que se puede encontrar cualquier tipo de vegetación o en cualquier clima excepto en los de zonas áridas. Es caracterizado por presentar capa de tierra compactada en el subsuelo además de algunas acumulaciones de arcilla y otros minerales su textura es media y son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

Litosol: Son suelos de piedra, estos son los más abundantes del país pues ocupan el 22% de su superficie, se encuentran a una profundidad menor de 10 centímetros, su textura va de media a gruesa y su fertilidad y susceptibilidad a la erosión es cambiante ya que depende de las características ambientales.

Feozem: Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país, su textura generalmente es media y se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.

5.1.2 Áreas Naturales Protegidas

En la cuenca del Río San Pedro Mezquital se ubican cuatro zonas catalogadas como área natural protegida (Figura 3): Área de protección de recursos naturales Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 Estado de Nayarit (C.A.D.N.R 043 Nayarit), Reserva de Biosfera La Michilía, Parque Nacional Sierra de Órganos y Marismas Nacionales Nayarit. Las áreas de protección de recursos naturales son destinadas para la preservación y conservación de suelo, agua y cualquier recurso natural, considerando dentro de esta categoría las reservas y zonas forestales, zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, especialmente cuando éstos se consignan para el abastecimiento de agua a la población (Art. 53 LGGEPA, 2015).

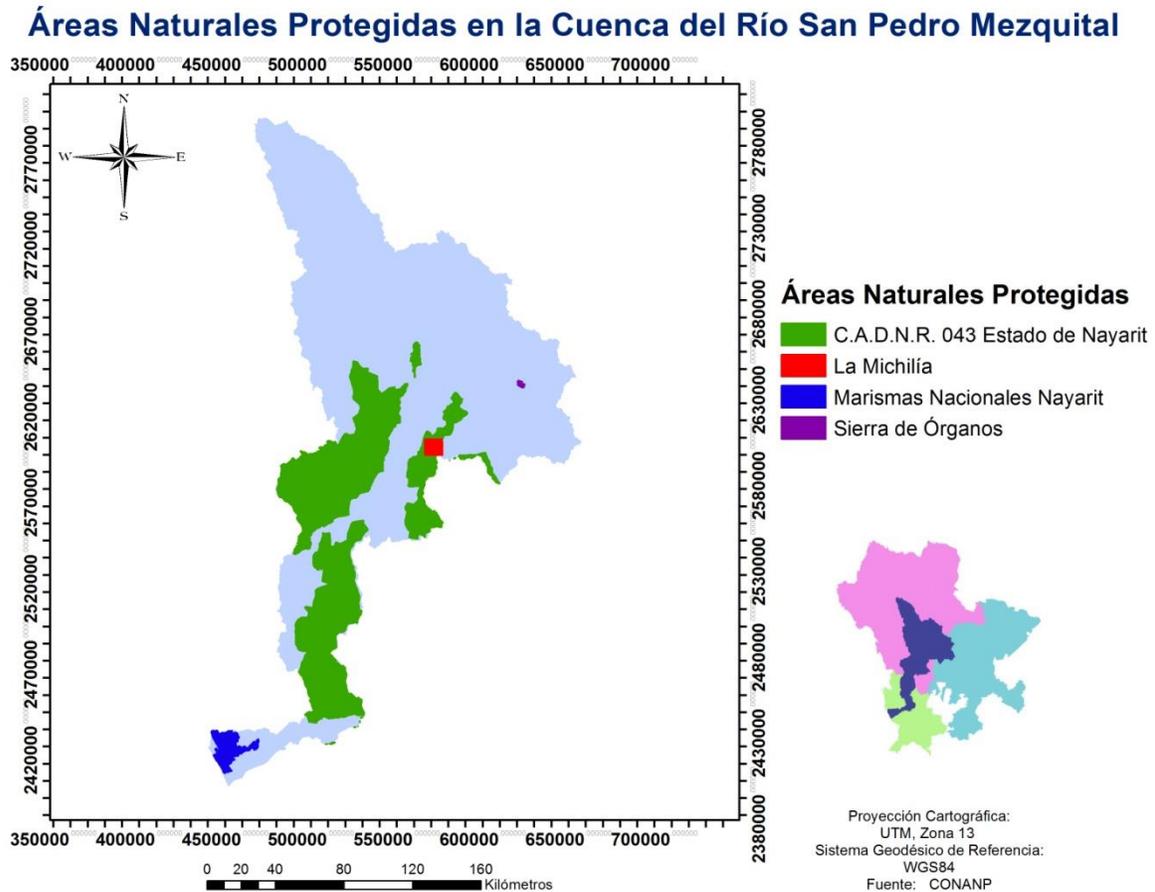


Figura 3.-Áreas Naturales Protegidas en la cuenca Río San Pedro Mezquital

5.2 Método para la detección de áreas vulnerables en la cuenca del Río San Pedro Mezquital

Se seleccionaron el cambio en la cobertura del suelo, la erosión actual y las áreas desprovistas de vegetación como las variables que determinan la vulnerabilidad al medio físico en la cuenca Río San Pedro Mezquital, con base en el estudio de vulnerabilidad realizado por Gaspari *et al.*, (2011) para cuencas serranas y lo citado Peña-Llovis (2007) (Tabla 4).

Tabla 4.-Literatura consultada

Autor	Literatura consultada
Gaspari <i>et al</i> (2011)	La metodología para la zonificación de la vulnerabilidad ambiental en este trabajo se estableció a partir de la generación y procesamiento geoespacial de factores físicos de la cuenca como; Posición y pendiente del terreno, textura del suelo, cobertura vegetal y uso del suelo, densidad de drenaje, como factor activador se considero la erosividad de la precipitación ya que actúa durante los eventos pluviales. Su magnitud se determina a través de la intensidad, duración y frecuencia de la tormenta.
Peña-Llovis (2007)	Los cambios en la cobertura incluyen cambios en la productividad primaria, calidad del suelo, y tasas de escorrentía y sedimentación, ante los cambios significativos las comunidades se reorganizan, y su composición se modifica. Formando parte de los factores que determinan la vulnerabilidad de los lugares y personas a perturbaciones ambientales.

El nivel de vulnerabilidad se asignó de forma numérica en un intervalo de 0 a 100, dando el valor más alto a las áreas con peores condiciones. La integración de los sistemas de información geográfica con las técnicas de evaluación multicriterio, facilitó la detección de áreas vulnerables al unificar de forma efectiva los criterios (figura 4).

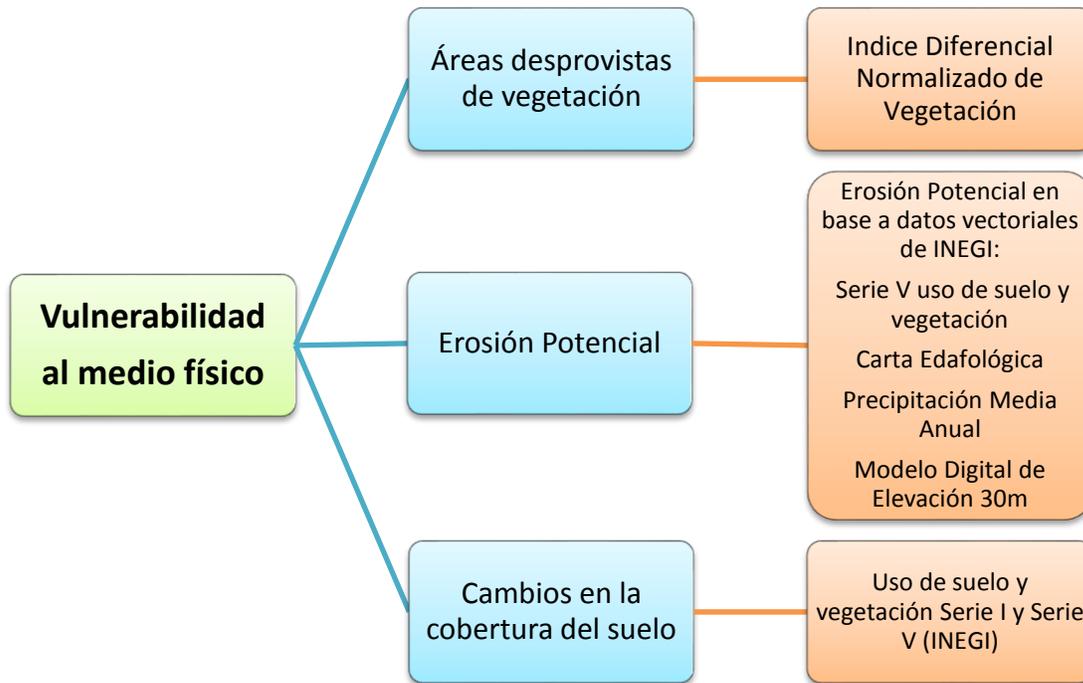


Figura 4.- Metodología general

5.3 Determinación de las áreas desprovistas de vegetación

Se obtuvieron cinco imágenes satelitales a través de la plataforma en línea del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); tres imágenes son del tres de marzo del 2015, mientras que las otras dos corresponden al día 26 del mismo mes y año (Figura 5).

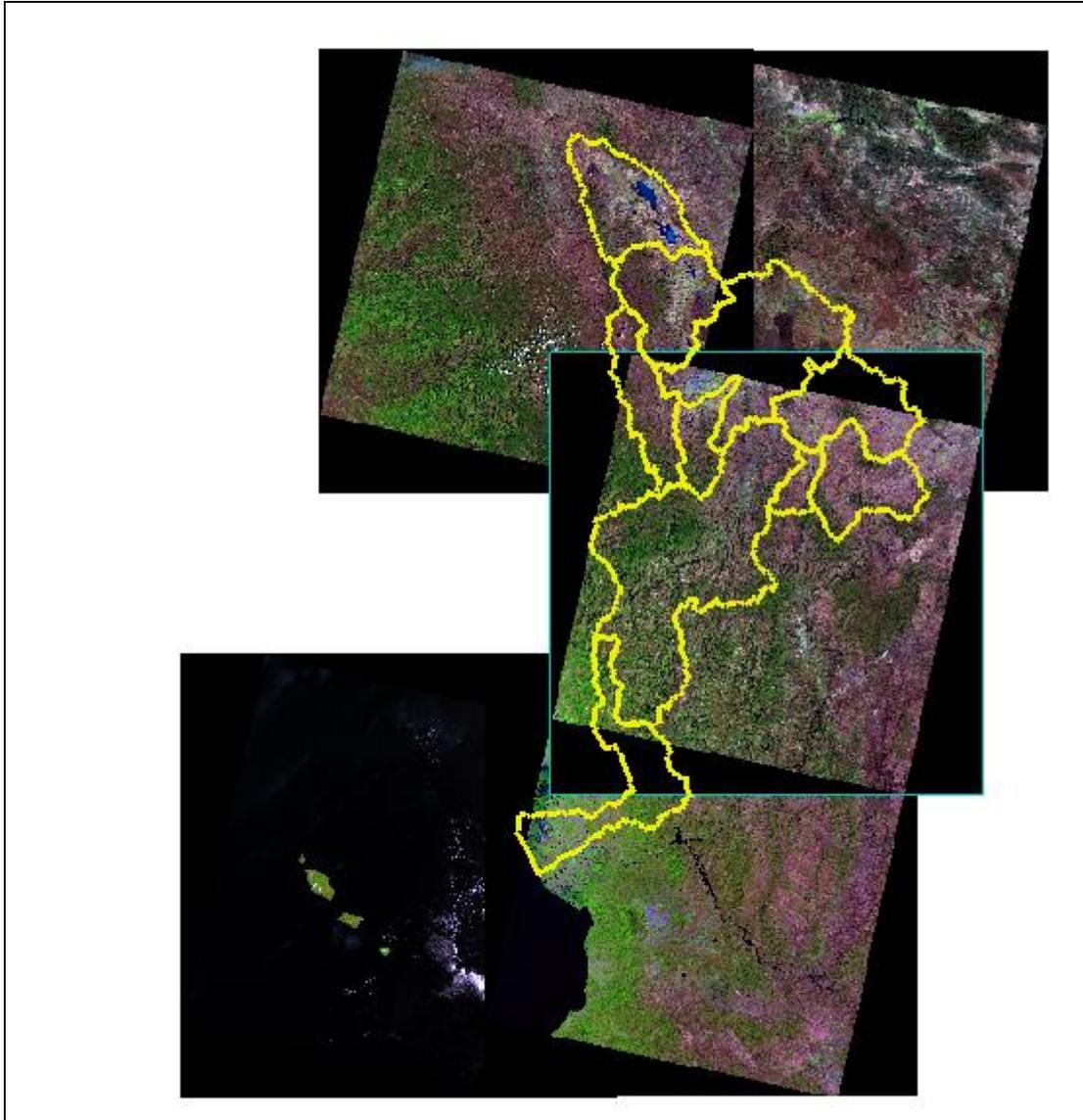


Figura 5.-imágenes de satélite realce de vegetación (combinación 6,5,4)

Se utilizó el Software de prueba de ENVI 5.3 el cual permitió realizar la calibración radiométrica y la corrección atmosférica de las imágenes, utilizando el complemento FLASH, para después aplicar la fórmula de NDVI correspondiente a Landsat 8 (Figura 6).

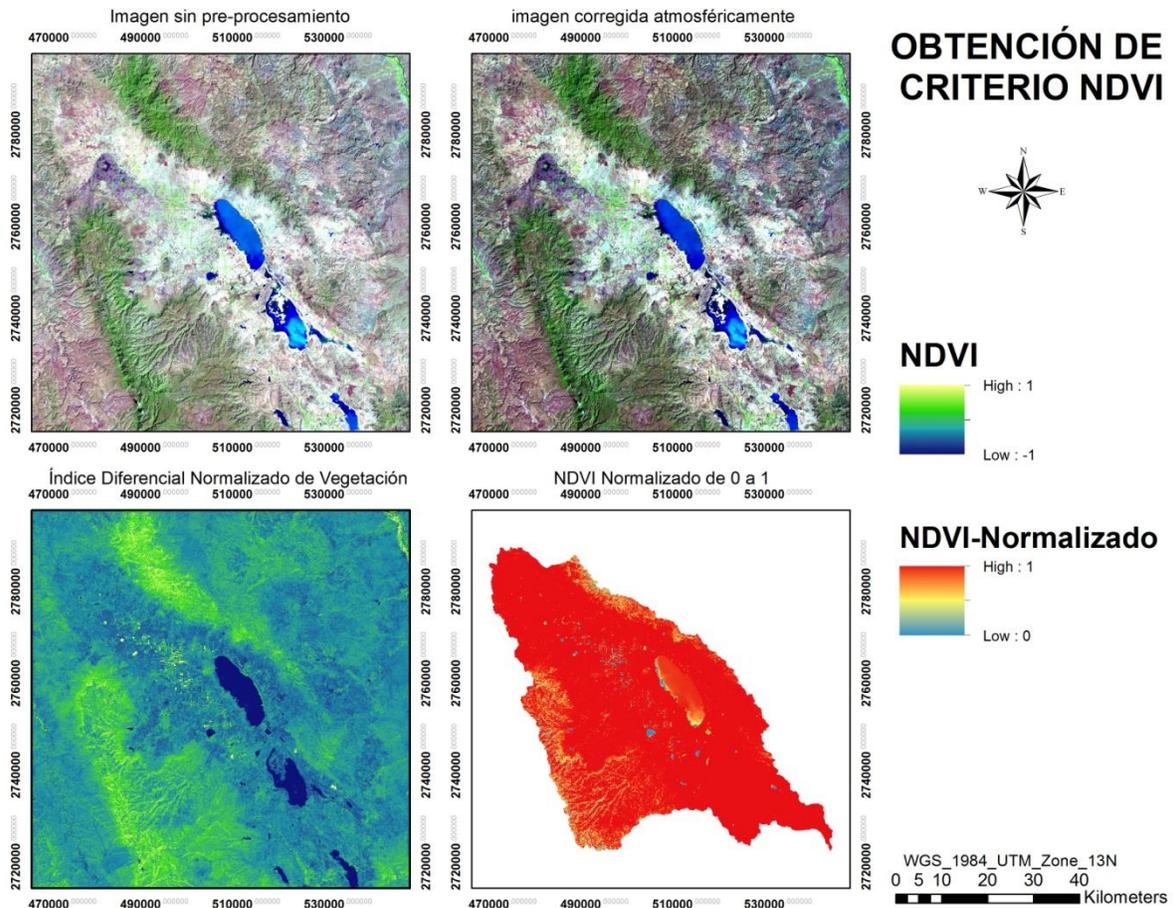


Figura 6.-Obtención de NDVI

Con base a análisis visual de las imágenes de satélite y de imágenes de Google Earth, se tomaron puntos de referencia en zonas desprovistas de vegetación, para después identificar el valor de NDVI.

5.4 Metodología para análisis de cambios en cobertura del suelo

Para el análisis de los cambios de cobertura del suelo se realizó un proceso de intersección (Figura 7) y cruce de tablas, esto con base en las cartas de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, serie I (1976–1982) y la serie V (2011-2013), lo cual permitió generar tanto un mapa de cambios (Figura 8) como una matriz de transición donde se puede identificar numéricamente los cambios que se han tenido en un periodo aproximado de 30 años (Franco-Mass y Regil-García, 2010).

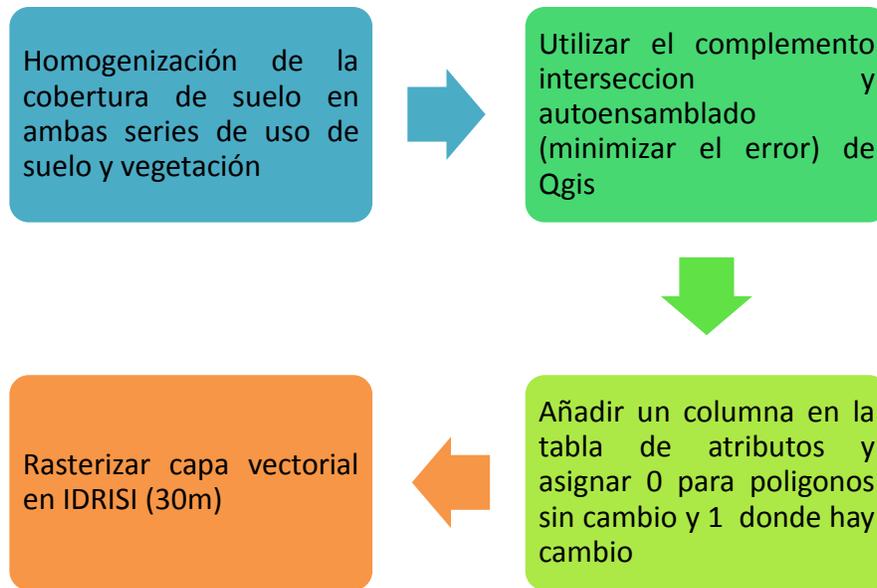


Figura 7.--Metodología de identificación de cambios en cobertura del suelo

Cambio de cobertura de suelo Cuenca Río San Pedro Mezquital

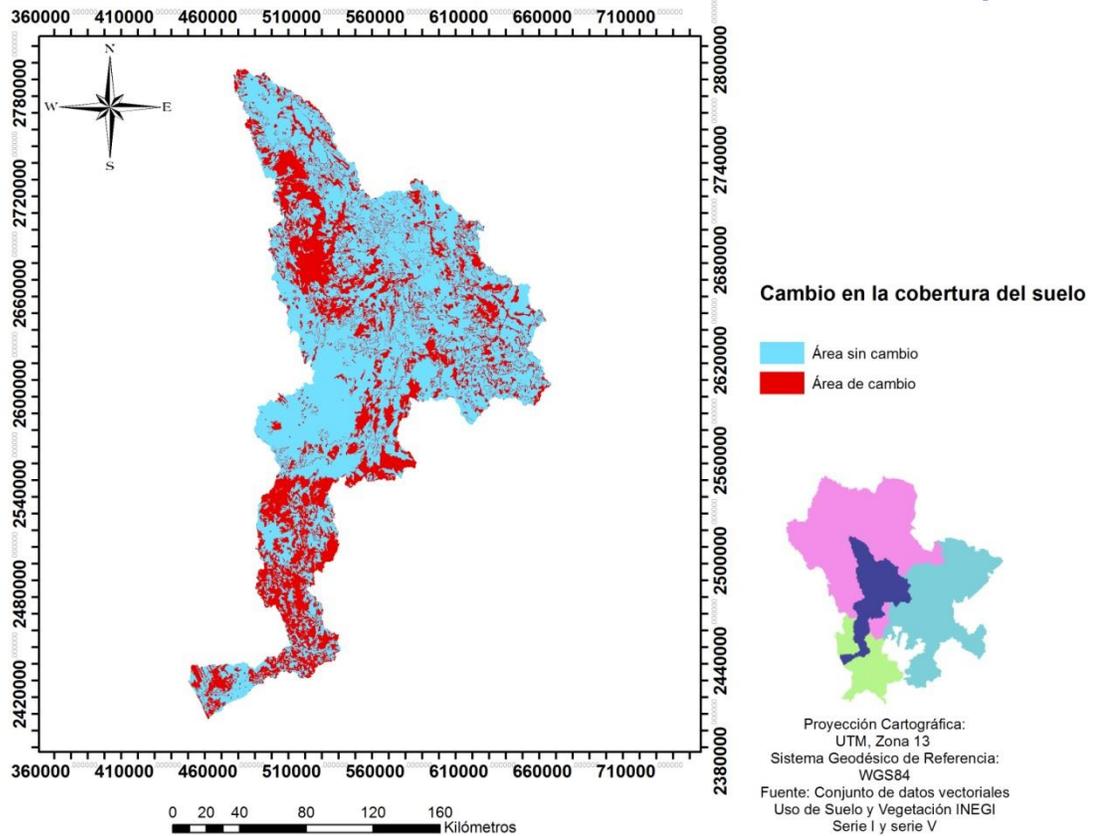


Figura 8.-Cambios en cobertura del suelo cuenca Río San Pedro Mezquital

5.5 Determinación de la Erosión Actual

Se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*USLE*, por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith 1965, 1978) para obtener el mapa del criterio de erosión actual (Figura 9):

$$A = R * K * (l * S) * C * P$$

Donde:

A = tasa de erosión anual (ton/Ha.año).

R = factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/Ha.h).

K = factor de erodabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm).

LS = factor topográfico longitud-pendiente.

C = factor de vegetación y cultivo.

P = factor de prácticas conservación.

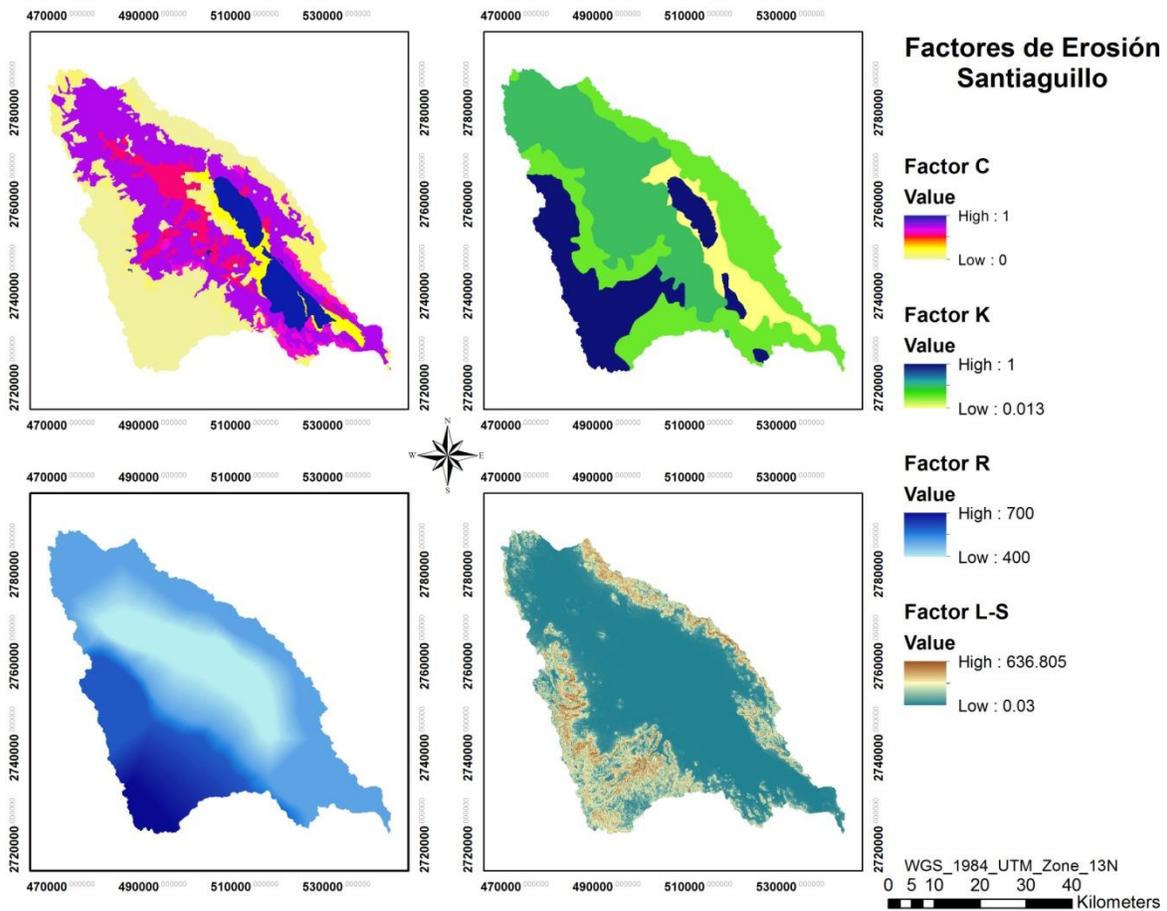


Figura 9.-Ejemplo de cálculo de factores de erosión para subcuenca Santiagoullo

5.5.1 Factor de erosividad de la lluvia R

El factor R representa el potencial erosivo de las precipitaciones, su cálculo se puede realizar conociendo la energía cinética de la lluvia y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos. La suma de estos valores en un año da el valor de R (López, 2005).

Este procedimiento es complicado cuando no se cuenta con datos de intensidad de la lluvia, en México esta es una de las principales limitantes, por esta razón, la determinación de este factor se llevó a cabo con base en la Precipitación Media Anual (PMA), donde se aplicaron las ecuaciones de erosividad, asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana (Figura 9 y tabla 5) determinadas por Cortés en 1991 (Becerra, 1997; Montes *et al.*, 2011).

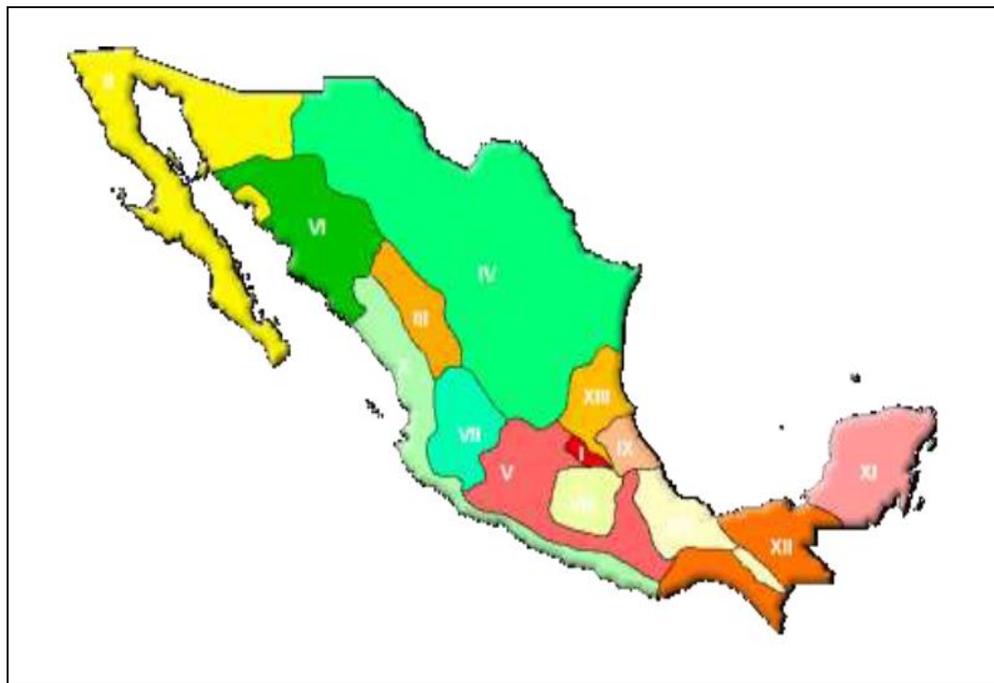


Figura 10.-Regionalización nacional de factor R (Cortés, 1991), Fuente (Magaña, 2003).

Tabla 5.- Ecuaciones regionalizadas para la República Mexicana (Becerra, 1997) (Fuente Montes et al., 2011).

Región	Ecuación	R2
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

Con base en los datos vectoriales 1:100000 de Precipitación Media Anual de INEGI se realizó una interpolación en el programa ArcMap con la herramienta “crear TIN (Red de Triangulación Irregular)”, para después realizar una rasterización con 30 m de resolución y multiplicarse por la ecuación regionalizada para la República Mexicana de las zonas 3 y 10, que son donde se identificó una intersección de la cuenca con el mapa de regionalización nacional de factor R (Becerra, 1997; Montes *et al.*, 2011).

5.5.2 Factor de erodabilidad del suelo K

El factor *K* indica el grado de susceptibilidad del suelo a ser desprendido, ya sea por las gotas de lluvia, por el flujo superficial, o por ambos factores. Debido a la magnitud del área de estudio, este factor se determinó con base en la metodología de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación),

empleando el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1:100000 de INEGI y la clasificación de suelos del World Reference Base for Soil Resources (WRB) (FAO, 2006), adaptado por el INEGI para las condiciones ambientales de México, donde de acuerdo a la clasificación del tipo de suelo y su textura se le asigna el valor del factor K como se muestra en la tabla 6 (Montes *et al.*, 2011).

Tabla 6.- Factor K, de acuerdo a clasificación WRB

Clasificación WRB		Orden	Textura		
Nombre	Símbolo		G	M	F
Acrisol	AC	AC	0.026	0.04	0.013
Albeluvisol	AB	AL	0.026	0.04	0.013
Alisol	AL	AN	0.026	0.04	0.013
Andosol	AN	AR	0.013	0.02	0.007
Anthrosol	AT	CH	0.013	0.02	0.007
Arenosol	AR	CL	0.053	0.079	0.026
Calcisol	CL	CM	0.026	0.04	0.013
Cambisol	CM	DU	0.053	0.079	0.026
Chernozem	CH	FL	0.026	0.04	0.013
Cryosol	CR	FR	0.013	0.02	0.007
Durisol	DU	GL	0.026	0.04	0.013
Ferralsol	FR	GY	0.053	0.079	0.026
Fluvisol	FL	HS	0.053	0.02	0.007
Gleysol	GL	KS	0.026	0.04	0.013
Gypsisol	GY	LP	0.013	0.02	0.007
Histosol	HS	LV	0.026	0.04	0.013
Kastanozem	KS	LX	0.013	0.02	0.007
Leptosol	LP	NT	0.013	0.02	0.007
Lixisol	LX	PH	0.013	0.02	0.007
Luvisol	LV	PL	0.053	0.079	0.026
Nitisol	NT	PT	0.026	0.04	0.013
Phaeozem	PH	RG	0.026	0.04	0.013
Planosol	PL	SC	0.026	0.04	0.013
Plinthosol	PT	SN	0.053	0.079	0.026
Podzol	PZ	UM	0.026	0.04	0.013
Regosol	RG	VR	0.053	0.079	0.026
Solonchak	SC				
Solonetz	SN				
Umbrisol	UM				
Vertisol	VR				

Una vez que se asignó el valor de K para cada polígono en los datos vectoriales de INEGI, se realizó una rasterización en el software ArcMap en base al modelo digital de elevación de 30 m de resolución.

5.5.3. Factor topográfico longitud-pendiente LS

El factor L se refiere a la distancia que hay desde el punto de origen del escurrimiento hasta donde se encuentra un canal de salida que es el punto donde disminuye el valor de la pendiente, mientras que el factor de grado de pendiente (S) refleja la influencia del ángulo de la misma en la erosión. Se aplicó la fórmula a nivel de subcuenca para minimizar el error del cálculo.

$$L = \left(\frac{X}{22.13} \right)^m$$

Donde:

x = longitud del terreno en metros

m = exponente que depende del grado de pendiente.

Factor m de L

$$m = \beta / 1 + \beta$$

β de Factor L

$$\beta = (\text{sen } \theta / .0896) / [3(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56]$$

θ es la pendiente del terreno

Se realizó el cálculo de m y β previamente, para sustituirlas en la fórmula de Desmet y Govers en 1996 para el cálculo del factor L (Morales-Ascarrunz, 2014):

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde:

$A_{(i,j)[m]}$ = área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda)

D = tamaño del pixel (30m)

x = es el factor de corrección de forma (1)

El cálculo del Factor S se realizó de acuerdo a la expresión siguiente:

Factor S

$$S = 10.8 \operatorname{sen} \theta + 0.03 ; \theta \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.50 ; \theta > 9\%$$

Para la aplicación de las formulas anteriores se utilizó el software ArcMap y el Modelo Digital de Elevación de 30 m de resolución de INEGI con la metodología descrita en la Figura 11.

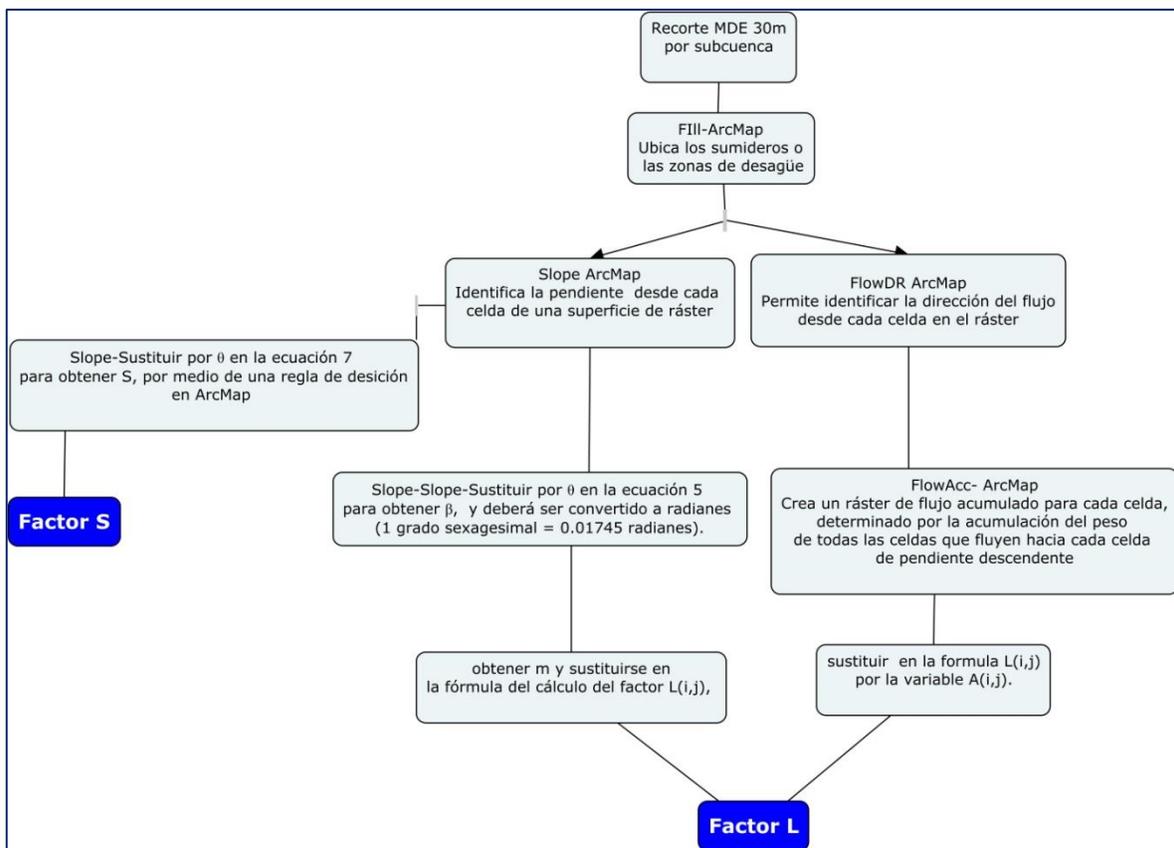


Figura 11.- Metodología para obtener factores L y S

5.5.4. Factor de vegetación y cultivo C

El factor *C* considera el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo en la erosión, ya que estima la tasa de pérdida de suelo en las condiciones actuales en relación a aquella que se experimentaría bajo las condiciones naturales del área (Montes *et al.*, 2011).

Para un área que en condiciones normales se encuentra sin cobertura y con barbecho continuo, el valor del factor *C* es 1, pues las condiciones favorecen al proceso de erosión y a medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor de *C* irá disminuyendo, por lo que el intervalo de este parámetro se encuentra de 0 a 1, considerando 0 un terreno totalmente cubierto de vegetación (Montes *et al.*, 2011).

En este factor también es considerado la presencia de residuos de plantas muertas, raíces y pastos ya que estos elementos contribuyen a evitar el desprendimiento del suelo e incrementar la infiltración. La obtención del factor *C* se realizó con base en la Carta de Uso del Suelo y Vegetación 1:250,000 Serie V (INEGI) y de acuerdo con diversas bibliografías como Renard, 1997; Montes, 2002; Becerra 1997, entre otras, que establecen un valor *C* para cada tipo de vegetación como se muestra en la tabla 7 (Montes *et al.*, 2011).

En el programa de Qgis se modificó la tabla de atributos agregando una fila para el factor *C* con base en el tipo de Vegetación, estos datos de pasaron al Software ArcMap para después rasterizar a una resolución de 30m.

Tabla 7.-Factor C para Uso de Suelo y Vegetación.

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01	Pastizal gipsofílo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halofílo	0.25
Bosque de encino	0.1	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.1	Popal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de tascate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque de mesofilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.5
Manglar	0.1	Selva baja espinosa caducifolia	0.5
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.5
Matorral de coníferas	0.2	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico microfílo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico roetofílo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.1
Matorral rosetofílo costero	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral sarcocaulé	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sarco-crasicaule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25	Vegetación halófila	0.85
Matorral submontano	0.35	Zona urbana	0.005
Matorral subtropical	0.12	Cuerpos de agua	1
Mezquital	0.65	Agricultura en riego	0.55
Palmar inducido	0.75	Agricultura de temporal	0.75
Palmar natural	0.75	Agricultura de humedad	0.25

5.5.5. Factor de práctica de soporte P

El factor *P* considera la tasa de pérdida de suelo con respecto a las prácticas de soporte como:

- Elaboración de surcos de contención, siembra y plantación, siguiendo las curvas de nivel
- Cultivos en faja
- Terraceo
- Establecimiento de obras de drenaje superficial

Estas prácticas de soporte disminuyen el proceso de erosión debido a que modifican el patrón de flujo, el grado de la pendiente, dirección del escurrimiento superficial y reducen la cantidad de escurrimiento. El factor P no considera prácticas de labranza mejoradas, tales como labranza de conservación, rotaciones de cultivo, tratamientos de fertilidad, manejo de cosecha o cero labranza, puesto que estos ya son considerados en el factor C (Montes *et al.*, 2011).

En el presente trabajo se consideró el factor de protección con el valor 1 puesto que no se tiene información suficiente que cubra totalmente el área de estudio.

5.6 Normalización de criterios

Para poder realizar una comparación entre los distintos criterios, se deben representar en las mismas unidades por lo que es importante realizar una normalización. En el software IDRISI Selva se puede realizar tal normalización con el complemento Fuzzy que corresponde al método de lógica difusa (Zadeh, 1965), que consiste en estandarizar los valores de cada criterio en una escala de 0 a 1 considerando los valores mayores como los más vulnerables, logrando entre ellos una transición gradual (Tena- González, 2010).

Vulnerabilidad = Zona con cambios (1) + Erosión Actual (0-301 t/Ha/año) + áreas desprovistas de vegetación (NDVI 0.10 - 0.38)

5.6.1 Funciones de Normalización

En IDRISI se pueden implementar 4 tipos de funciones: Sigmoidea, "J", Lineal y definida por el usuario, en donde se debe considerar la forma de la función: incremento continuo, decremento continuo o simétrico.

Una función de incremento continuo considera el valor más pequeño como el menos vulnerable y conforme el valor aumenta, aumenta la vulnerabilidad (Figura 12), por lo que se utilizó para la normalización del criterio erosión Actual.

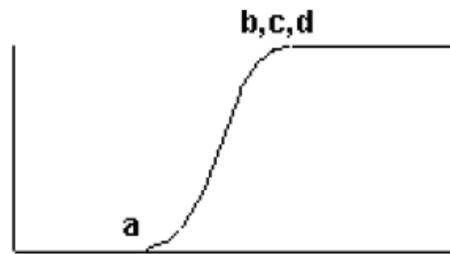


Figura 12.-Función Sigmoidea Incremento continuo

Una función de forma simétrica (Figura 13) indica que a partir del valor mínimo de vulnerabilidad, este se va incrementando hasta el punto más vulnerable, para luego decrecer nuevamente hasta llegar al menor valor. Considerando lo anterior se utilizó esta función para la normalización del criterio del NDVI pues se identificó que del intervalo de -1 a 1 el valor más vulnerable es de 0.10 a 0.38 ya que corresponde a las áreas desprovistas de vegetación.

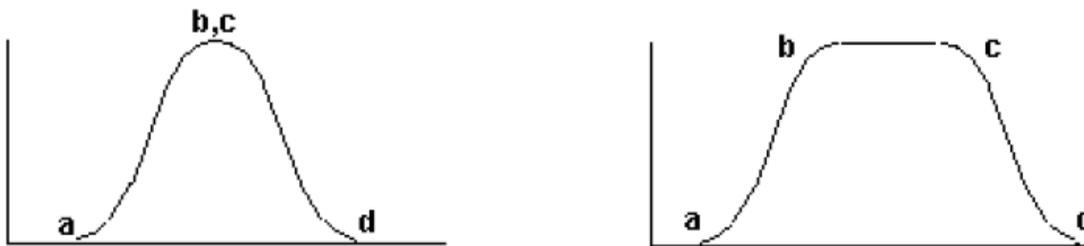


Figura 13.- Función sigmoidea simétrica

La función Linear de incremento continuo (Figura 14) se utilizó en la normalización del criterio cambio en la cobertura del suelo ya que se tienen solo dos valores, considerando 0 como no vulnerable y 1 como vulnerable.

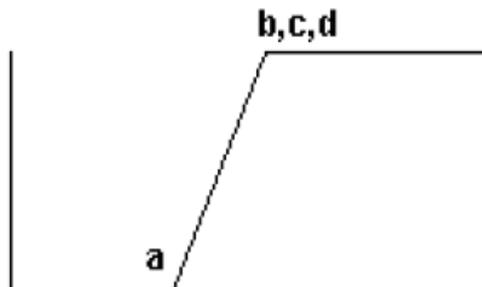


Figura 14.- Función Linear incremento continuo

5.7 Determinación de los pesos para cada variable

Con base en consulta a expertos y literatura consultada se asignaron los pesos o ponderación (W_j) utilizando del complemento “weight” en el software IDRISI Selva, el cual se basa en el Método de comparación por pares de Saaty (1977). Para ello, se crea una matriz de evaluación en la que se comparan por pares todos los factores. La escala de medida se hace mediante la asignación de juicios de valor en una escala continua que va desde un mínimo 1/9 hasta 9.

La matriz fue llenada asignando valores de importancia a los criterios en las filas con respecto a los criterios en la columna, donde el valor de 1 corresponde a la comparación entre el mismo criterio (Figura 15).

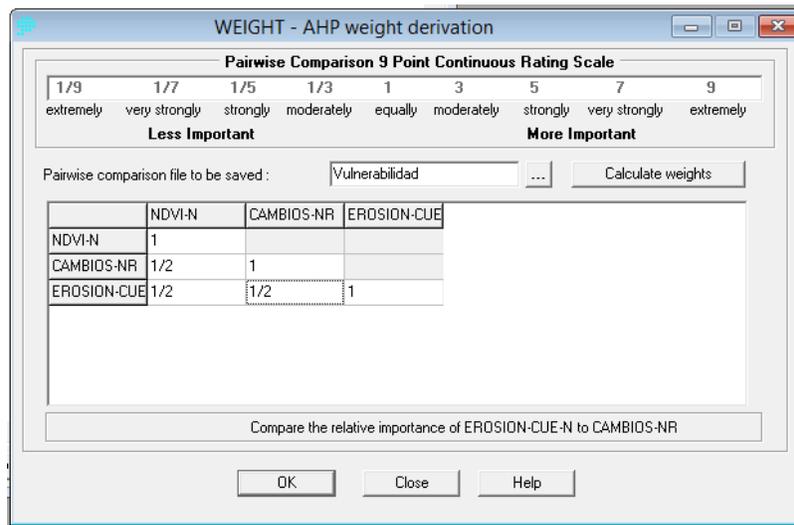


Figura 15.- Comparación pareada Satty en IDRISI

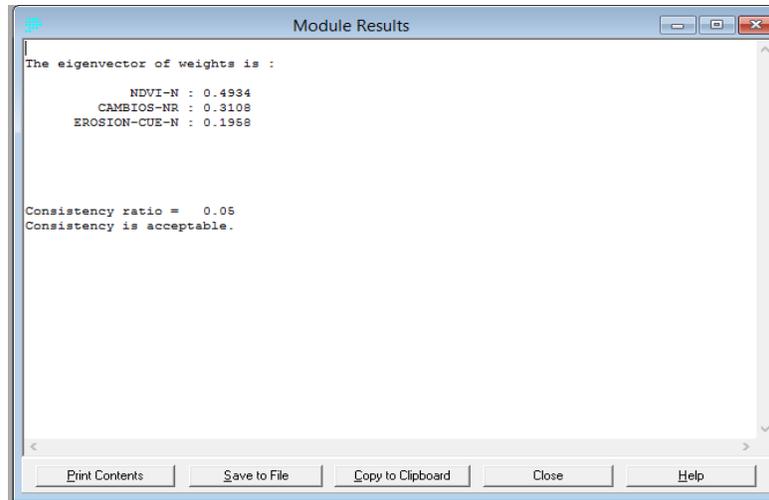


Figura 16.- Pesos para cada criterio de vulnerabilidad

5.8 Análisis de sensibilidad

Para evaluar la calidad de los resultados se realizó un análisis de sensibilidad, el cual consiste en modificar ligeramente los pesos de los datos de entrada (Ishizaka y Labib, 2009). En el presente estudio se evaluó la variación espacial de los resultados al cambiar los pesos de cada criterio. Se realizó un cruce de mapas y se reportó el índice de similitud KAPPA para evaluar el parentesco de los mapas (Eastman, 2006), es decir, el grado de coincidencia en áreas con el mismo nivel de vulnerabilidad. Para lo que se utilizaron 3 modelos diferentes:

$$Vuln1 = (Wj * \text{Áreas desprovistas de vegetación}) + (Wj * \text{Áreas de cambio}) \\ + (Wj * \text{Erosión actual})$$

$$Vuln2 = \text{áreas desprovistas de vegetación} * \text{áreas de cambio} * \text{Erosión actual}$$

$$Vuln3 = \frac{\text{Áreas desprovistas de vegetación} + \text{Áreas de cambio} + \text{Erosión actual}}{3}$$

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Áreas desprovistas de vegetación por medio del cálculo de NDVI

Por medio del análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenido por medio del análisis visual de las imágenes, se identificó que en la cuenca, las áreas desprovistas de vegetación presentan un valor de NDVI de 0.10 a 0.38, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 8.-Valores NDVI áreas desprovistas de vegetación

Imagen	Puntos	Valor NDVI	Imagen	Puntos	Valor NDVI
31-43	1	.19	30-43	1	.17
	2	.13		2	.20
	3	.22		3	.11
	4	.10		4	.17
	5	.35		5	.12
	6	.38		6	.28
	7	.28		7	.19
	8	.26		8	.32
	9	.21		9	.13
	10	.12		10	.18
30-44	1	.16	30-45	1	.38
	2	.18		2	.25
	3	.11		3	.20
	4	.27		4	.18
	5	.15		5	.19
	6	.38		6	.16
	7	.15		7	.10
	8	.25		8	.11
	9	.13		9	.35
	10	.33		10	.26

Según Samaniego (2015), con base a un análisis realizado con diferentes Índices de vegetación en la ciudad peruana Chiclayo, consideró que los valores negativos obtenidos corresponden a superficies sin vegetación, tales como, agua, nieve o nubes; para suelo desprovisto de vegetación se obtuvo un intervalo de 0 a 0.2 mientras que la vegetación estaría entre 0.2 y 1.

En México, en un estudio realizado en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México (Torres *et al.*, 2014) reporta que: “En cuanto a la vegetación dispersa y que no presenta alto follaje y que en ocasiones es suelo desnudo, se identifica como cobertura baja, donde los pixeles son más claros y tienen valores que van de 0.1 a 0.30, de acuerdo al índice de vegetación”, por lo que el valor de NDVI asignado para la zonas desprovistas de vegetación en la cuenca Río San Pedro Mezquital son cercanos al valor reportado por Torres *et al.*, (2014).

6.2 Análisis de cambios en Cuenca del Río San Pedro-Mezquital

El análisis de cambios en la cobertura de suelo en la cuenca del Río San Pedro Mezquital indica un porcentaje de cambio de 32.41% de su superficie, teniendo mayor impacto en los bosques y pastizales, con una disminución de 384,675.21 ha y 103,926.06 ha respectivamente.

Según la información contenida en la Serie I de Uso de Suelo y Vegetación (INEGI) en los años 80 la agricultura representaba el 18.68 % del área total de la cuenca, mientras que para los años 2012-2013 aumentó a 20.9%. En lo que respecta a asentamientos humanos, se tuvo un incremento del 0.62% y el mayor incremento registrado corresponde a 5115,119.63 ha (17.55%) en vegetación secundaria, esto representa la vegetación perturbada o en distintas fases de regeneración considerando todos los tipos de vegetación existentes en la cuenca del Río San Pedro Mezquital.

En México, el incremento de la vegetación secundaria se ha expandido considerablemente en los últimos años, debido a la demanda por más espacios para la agricultura, la ganadería y el crecimiento de población, provocando pérdidas en la cobertura original (López *et al.*, 2014); en la cuenca del Río San Pedro Mezquital

se encuentra principalmente asociado con la sucesión de bosques y pastizales, por terrenos agrícolas e incremento de vegetación secundaria (Tabla 9)

Tabla 9.-Áreas de cambio en cobertura del suelo en la cuenca del Río San Pedro Mezquital

	Área ha Serie I	Área ha Serie V	Superficie de cambio ha	%
Agricultura	548,141.83	613,717.74	65,575.91	11.96
Asentamientos Humanos	1,303.71	19,534.60	18,230.90	1,398.39
Bosque	1,180,998.17	796,322.97	-384,675.20	-32.57
Chaparral	80,941.96	-	-80,941.96	-100.00
Manglar	20,709.01	13,080.90	-7,628.11	-36.83
Matorral y Mezquital	177,108.51	154,012.45	-23,096.06	-13.04
Pastizal	474,035.97	370,109.89	-103,926.08	-21.92
Selva	80,775.13	74,895.50	-5,879.63	-7.28
Vegetación Halófila	32,296.80	27,625.43	-4,671.38	-14.46
Vegetación secundaria	306,246.73	821,366.38	515,119.65	168.20
Sabanoide y Palmar	5,651.02	1,990.50	-3,660.52	-64.78
Vegetación acuática	271.238	12,337.49	12,066.25	4,448.58
Sin vegetación aparente	-	5.886	5.886	100.00
Dunas costeras	446.587	372.011	-74.576	-16.70
Agua	25,661.82	29,216.74	3,554.92	13.85

En la década de los ochenta, México presentaba una conversión anual de aproximadamente 800,000 Ha, considerando como principales factores de cambio la conversión de pastizales para la ganadería. El 24% de la pérdida de bosques se debió a incendios forestales asociados con quemas agrícolas y el 17% a la conversión de los mismos a terrenos agrícolas (Masera *et al.*, 1997; Challenger y Dirzo, 2009). Si bien la deforestación y la afectación a la biodiversidad debido a los incendios antropogénicos se presenta con mayor frecuencia en ecosistemas arbolados (Masera *et al.*, 1997; Challenger y Dirzo, 2009), la ganadería es uno de los factores de cambio en los ecosistemas forestales del país. Según SAGARPA (2001), la ganadería extensiva con baja productividad por hectárea, se ha expandido

considerablemente ocupando más de 110 millones de hectáreas, equivalentes a 57% del territorio nacional, por lo que continúa siendo el uso dominante de la tierra en el país (Challenger y Dirzo, 2009).

6.3 Erosión actual del suelo en la cuenca

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) la erosión actual severa se presenta en valores mayores a 300 toneladas por hectárea al año (Mejía *et al.*, 2009). En el análisis de la cuenca del Río San Pedro Mezquital se obtuvieron valores máximos de erosión de 3000 t/Ha/Año (tabla 10), considerando como el valor del factor $p=1$, puesto que no se tiene información suficiente sobre las prácticas de conservación de suelo que cubra totalmente el área de la cuenca.

Tabla 10.-Resultados de Erosión por Subcuenca

Sub-Cuenca	Erosión t/Ha/Año
Santiaguillo	24.45
Graseros	49.01
Poanas	60.25
Santiago	62.82
Súchil	89.96
Sauceda	97.82
Durango	115.48
Tunal	135.625
San Pedro	2270.89
Mezquital	3000

En la subcuenca Santiaguillo se obtuvieron valores máximos de 24.5 t/Ha/Año, considerando que el terreno no representa valores extremos de elevación y su escurrimiento es endorreico, además de que en las subcuencas de la parte baja se tiene mayor precipitación y por ello un mayor valor del factor R, teniendo con ello un mayor impacto de la erosión en las subcuencas San Pedro y Mezquital con valores muy por encima de lo propuesto por la FAO (Tabla 111).

Tabla 11.-Riesgo de Erosión t/Ha/año fuente: Mejía 2009

Riesgos de erosión en toneladas por hectárea por año (t/Ha/Año) propuestas por la FAO		
	Erosión Potencial	Erosión Actual
Ligera	< 100	< 20
Moderada	100 – 500	20 – 100
fuerte	500 – 1500	100 – 300
severa	> 1500	> 300

6.4 Determinación de pesos para cada criterio

El orden de importancia a considerar en cuanto a vulnerabilidad, permitió asignar los pesos a cada criterio, en base al proceso de análisis jerárquico de Satty en el programa IDRISI con un radio de consistencia de 0.05, obteniendo los siguientes valores:

- 0.4934 Calculo de NDVI para zonas desprovistas de vegetación
- 0.3108 Cambios en la cobertura del suelo
- 0.1958 Erosión

6.5 Áreas vulnerables cuenca Río San Pedro Mezquital

Las áreas con mayor valor de vulnerabilidad (Figura 17) representan zonas desprovistas de vegetación, cambios en la cobertura del suelo y erosión actual mayor a 301 ton/Ha/año.

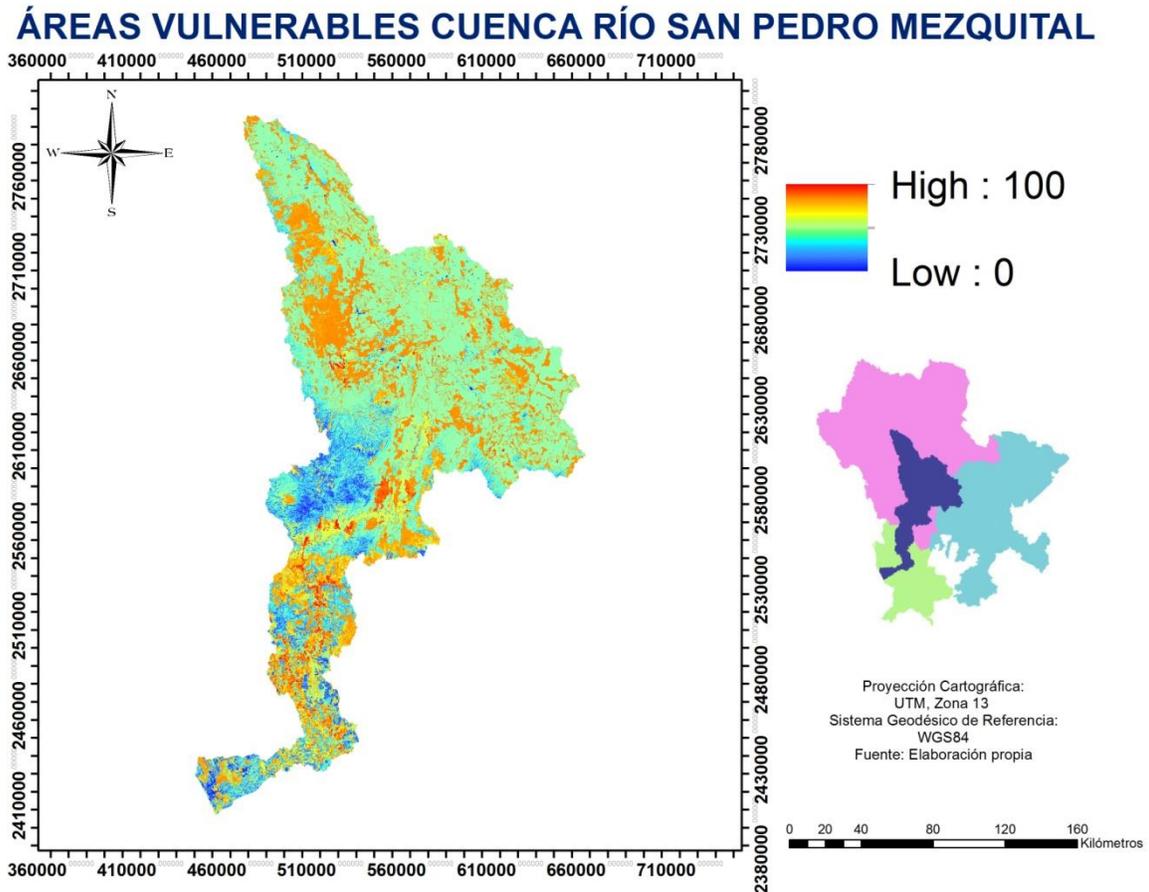


Figura 17.- Áreas vulnerables en la cuenca Río San Pedro Mezquital

6.5.1 Subcuenca Santiaguillo

En la subcuenca Santiaguillo las áreas vulnerables se encuentran en la parte alta de la cuenca como resultado de los cambios en la cobertura vegetal, así como áreas desprovistas de vegetación con valor de NDVI de 0.10 a 0.38.

Actualmente sus principales actividades económicas son forestal, agrícola y ganadera, extrayendo principalmente pino, encino y cedro para ser utilizados como leña y postería. Esto explica los resultados obtenidos por el cruce de mapas entre la Serie I y Serie V de Uso de suelo y vegetación de INEGI (tabla 12), ya que se muestra un mayor cambio de bosque y chaparral a vegetación secundaria disminuyendo 17413.084 ha y 16928.874 ha respectivamente.

Se convirtieron a pastizal 2,037.368 ha de agricultura; este cambio se identifica como cambio de cobertura entrópica a otra, puesto que la agricultura de temporal suele cambiar a pastizales inducidos para mantener con ello actividades económicas de la región.

En el municipio de Nuevo ideal la agricultura representa una de las actividades más importantes, con cultivo de frijol, maíz grano, avena forrajera y manzano. Mientras que en el municipio de Santiago Papasquiario su principal actividad económica es la ganadería, con especies vacuna, porcina, caprina, lanar, equina, bovina, además en de la extracción de especie de coníferas.

Tabla 12.-Cruce de tablas subcuenca Santiaguillo

		Serie I Uso de Suelo y Vegetación ha								
		Agricultura	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Vegetación Halófila	Vegetación Secundaria	Agua	Total general
Serie V Uso de Suelo y Veg. ha	Agricultura	95,964.1	673.0	5.6	1,456.7	9,883.0	21.2	187.0	342.8	108,533.5
	Asentamientos	1,009.7	5.8		0.0	216.5		75.1		1,307.2
	Bosque	1,226.8	34,738.9	2,290.9	98.7	1,022.3		67.9		39,445.4
	Matorral Mezquital	964.3	179.8	36.6	8,572.0	361.8			71.3	10,185.7
	Pastizal	2,037.4	1,676.6	458.4	357.5	25,399.1	34.5	239.8	96.0	30,299.1
	Vegetación Halófila	975.5			7.4	5,567.4	1,111.9		1,223.2	8,885.4
	Vegetación Secundaria	183.7	17,413.1	16,928.9	496.6	889.0		426.4		36,337.7
	Agua	315.6	2.4		11.6	505.5			18,866.3	19,701.4
	Total general	102,677.1	54,689.6	19,720.3	11,000.4	43,844.6	1,167.5	996.3	20,599.6	254,695.4

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.2 Subcuenca Graseros

Una de las zonas que presenta vulnerabilidad en esta subcuenca se encuentra en el área natural protegida La Michilía, donde se registró un cambio de Bosque a Vegetación secundaria (figura 18).

ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA GRASEROS

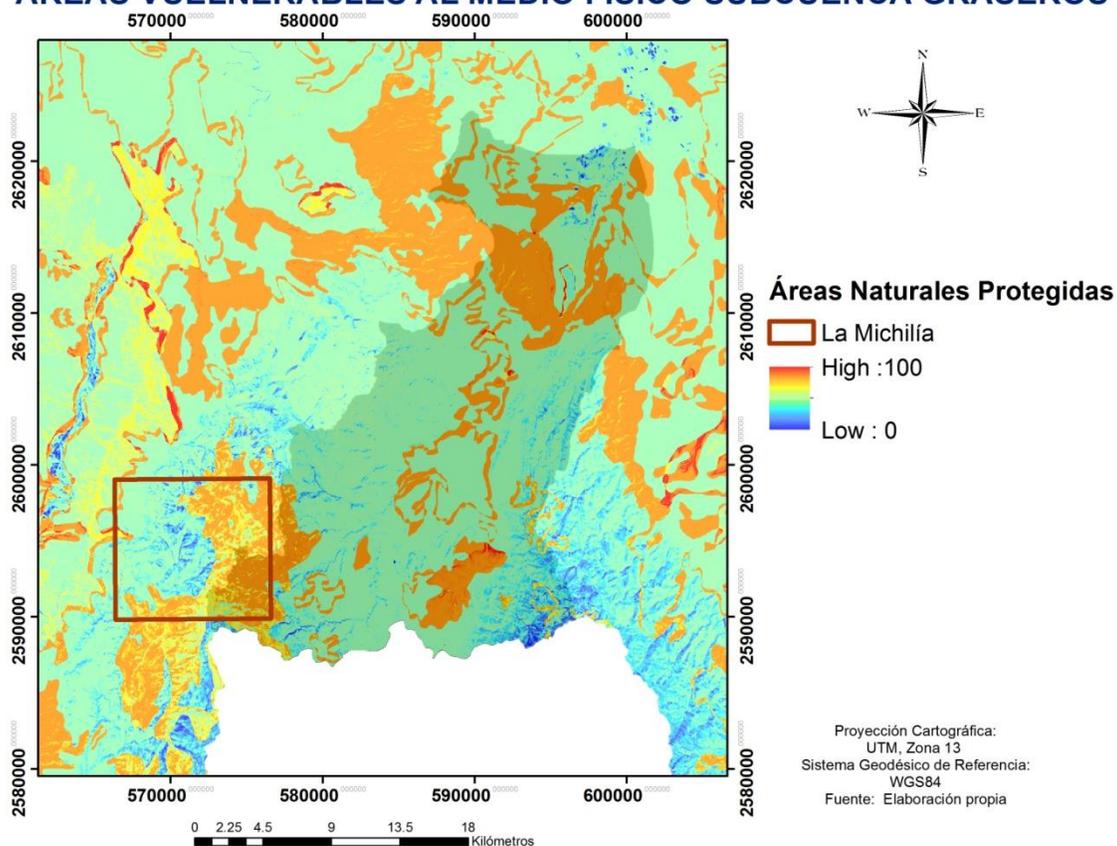


Figura 18.-Áreas vulnerables en el área Natural Protegida la Michilía

El cruce de tablas entre las series I y V muestra que el mayor impacto se tuvo en el bosque, cambiando un aproximado de 4198.121 ha de su superficie a vegetación secundaria (Tabla 133).

Tabla 13.- Cruce de tablas subcuena Graseros

		Serie I Uso de Suelo y Vegetación					
		Agricultura	Bosque	Chaparral	Pastizal	Vegetación Secundaria	Total general
Serie V Uso de Suelo y Vegetación	Agricultura	3,812.6	276.9		1,367.0	417.2	5,873.8
	Asentamientos	10.9				40.1	51.0
	Bosque	52.2	27,260.5	153.9	1,237.0	410.5	29,114.1
	Pastizal	226.4	1,853.5		6,065.4	1,172.4	9,317.7
	Vegetación Secundaria	295.0	4,198.1	1,073.9	782.4	2,090.5	8,439.9
	Agua	182.8				1.3	184.1
	Total general	4,579.9	33,589.1	1,227.8	9,451.8	4,132.0	52,980.6

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.3 Subcuenca Tunal

Entre los impactos más severos en la subcuenca Tunal, se identificaron la pérdida de 19,968.33 ha de bosque y 6,844.467 ha de chaparral, que pasaron a ser vegetación secundaria. Así mismo, se identifica un incremento de 33.481 ha en asentamientos humanos siendo esta superficie anteriormente ocupada por agricultura y bosque (Tabla 14).

Tabla 14.- Cruce de tablas subcuenca Tunal

		Serie I uso de suelo y vegetación ha						
		Agricultura	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Vegetación Secundaria	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	8,164.1	1,237.4	22.6		4,162.8	624.4	14,211.3
	Asentamientos	33.3	0.1					33.5
	Bosque	648.3	101,643.5	476.8	30.4	3,639.7	458.7	106,897.4
	Matorral y Mezquital		402.3		490.4	127.8	57.9	1,078.4
	Pastizal	925.0	7,197.5	196.2	0.0	18,507.0	366.4	27,192.1
	Vegetación Secundaria	203.7	19,968.3	6,844.5	95.5	2,584.5	5,655.7	35,352.2
	Agua				25.6	0.4	257.1	283.0
	Total general	9,974.5	130,449.3	7,540.1	641.9	29,022.2	7,420.0	185,047.9

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.4 Subcuenca Durango

En la subcuenca Durango, se ubica la ciudad de Durango como una de las zonas vulnerables, debido al crecimiento de la mancha urbana en los últimos años, sin embargo son pocos los polígonos encontrados con vulnerabilidad severa en la subcuenca.

El pastizal sufrió un impacto severo debido al incremento de 2,072.7 ha para asentamientos humanos y 17,139.2 ha para agricultura. El Chaparral por su parte dejó de registrarse para la serie V, cambiando en su mayoría a vegetación secundaria, al igual que 8,944.9 ha de Bosque (Tabla 15).

Tabla 15.- Cruce de tablas subcuenca Durango

		Serie I Uso de Suelo y Vegetación ha									
		Agric.	Asentam.	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Vegetación Halófila	Vegetación Secundaria	Veg. acuática	Total general
Serie V Uso de Suelo y Veg. ha	Agricultura	122057.1		515.5	10.3	6358.8	17139.2	2013.7	6069.4	35.4	154199.3
	Asentamientos	5798.3	1303.7	46.1		331.7	2072.7	82.9	486.2		10121.6
	Bosque	66.9		9119.7	600.1	2869.1	595.9		588.5		13840.3
	Matorral Mezquital	1563.7		430.7	38.5	92716.9	7160.8	1146.1	1638.9	70.7	104766.5
	Pastizal	5038.4		2485.5	217.6	7822.7	110649.3	1926.8	2940.1	65.3	131145.8
	Vegetación Halófila	595.5				1589.9	4282.0	7601.9	64.5		14133.8
	Vegetación Secundaria	3888.9		8944.9	2455.0	2624.0	14777.0	708.4	27313.7	14.5	60726.4
	Vegetación acuática						15.2			85.3	100.5
	Agua	114.9				151.6	711.7	34.6	32.5		1045.3
	Total general	139123.7	1303.7	21542.5	3321.6	114464.7	157403.9	13514.4	39133.7	271.2	490079.4

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.5 Subcuenca Santiago

La zona que presenta menor vulnerabilidad corresponde al área C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit (Figura 1919).

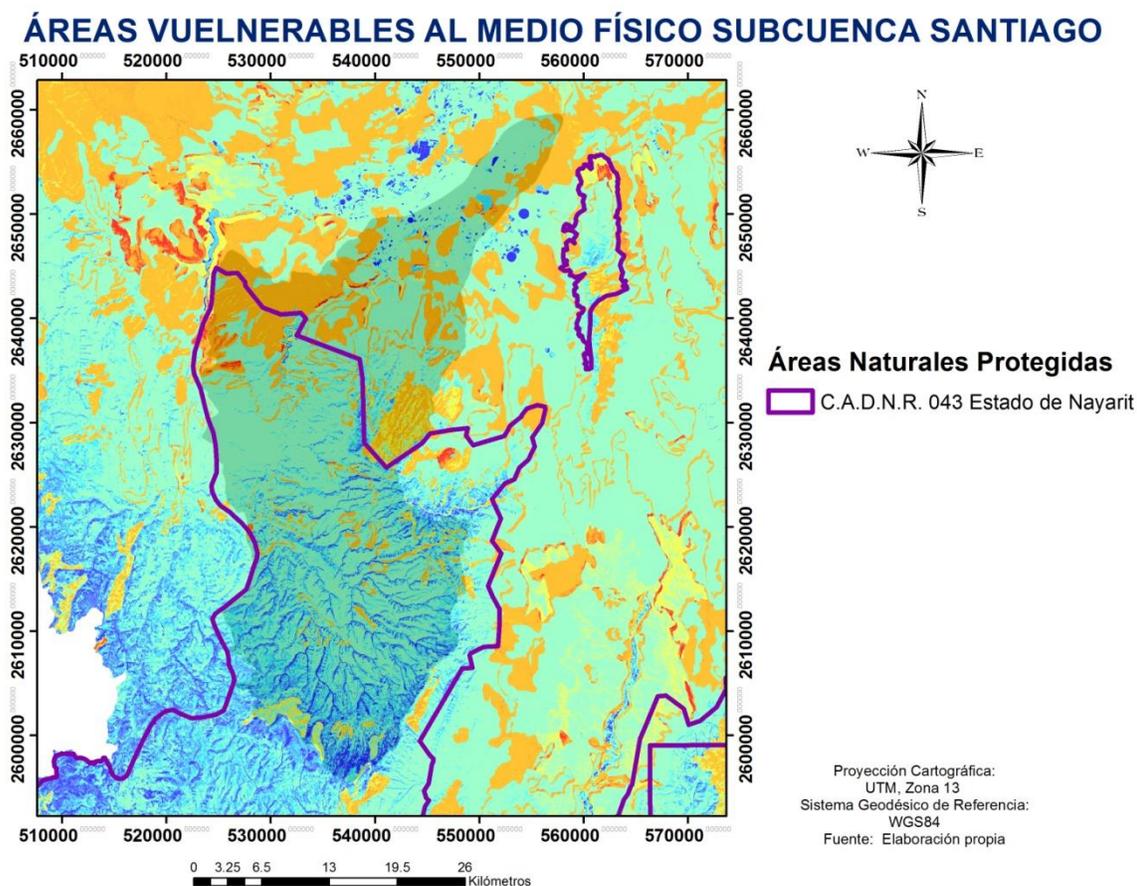


Figura 19.-Subcuenca Santiago y área de protección de recursos naturales

El impacto más severo en la cuenca Santiago se presenta en la pérdida de 5,126.2 ha de bosque y 6,499.3 ha de pastizal a vegetación secundaria (Tabla16).

Tabla 16.- Cruce de mapas subcuenca Santiago

		Serie I Uso de suelo y vegetación ha							
		Agricultura	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Vegetación Halófila	Vegetación Secundaria	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	8,777.3	72.4		362.0	1,521.9	124.6	224.8	11,083.0
	Asentamientos	122.3			2.2	97.8			222.3
	Bosque	34.1	54,469.7	51.5	4.8	740.3		1,732.6	57,033.1
	Matorral y Mezquital	40.9	688.4		272.3	88.8		121.8	1,212.3
	Pastizal	715.5	1,516.3	44.0		5,082.4		1,908.0	9,266.2
	Vegetación Secundaria	222.8	5,126.2	954.0	48.2	6,499.3	3.2	13,114.1	25,967.8
	Agua	27.0	1.3			591.2	0.5	44.1	664.2
	Total general	9,940.0	61,874.4	1,049.6	689.6	14,621.7	128.3	17,145.3	105,448.9

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.6 Subcuenca Poanas

En esta subcuenca se encuentra el Parque Nacional Sierra de Órganos (Anexo 1) donde se identifica una zona de vulnerabilidad debido al cambio en la cobertura vegetal de agricultura a pastizal. Se identifica un mayor impacto en la cobertura del bosque con un cambio de 20,340.7 ha a vegetación secundaria, el pastizal cambió 14,939.3 ha a agricultura y 4,635.5 a vegetación secundaria (Tabla17).

Tabla 17.- Cruce de tablas subcuenca Poanas

		Serie I Uso de suelo y vegetación ha						
	Rótulos de fila	Agricultura	Bosque	Chaparral	Matorral Mezquital	Pastizal	Vegetación Secundaria	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	105,781.3	604.6	4.1	3,017.6	14,939.3	5,079.8	129,426.7
	Asentamientos	766.1	32.5		200.3	1,156.4	339.9	2,495.1
	Bosque	128.8	19,627.0			833.2	1,542.4	22,131.4
	Matorral Mezquital	768.4	16.7		10,751.5	997.4	42.9	12,576.9
	Pastizal	2,218.3	3,351.6	11.6	949.2	25,778.2	1,432.0	33,740.7
	Vegetación Secundaria	2,123.8	20,340.7	468.9	631.2	4,635.5	26,503.7	54,703.7
	Sin vegetación aparente					5.9		5.9
	Agua	225.3			25.4	57.7	283.4	591.7
	Total general	112,011.9	43,972.9	484.6	15,575.1	48,403.4	35,224.1	255,672.0

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.7 Subcuenca Súchil

En esta área se encuentra una pequeña zona perteneciente a C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit (Figura 20), la cual presenta un estado adecuado pues no se han presentado cambios considerables en el área, además que los valores de erosión son bajos y el NDVI cercano a 1.

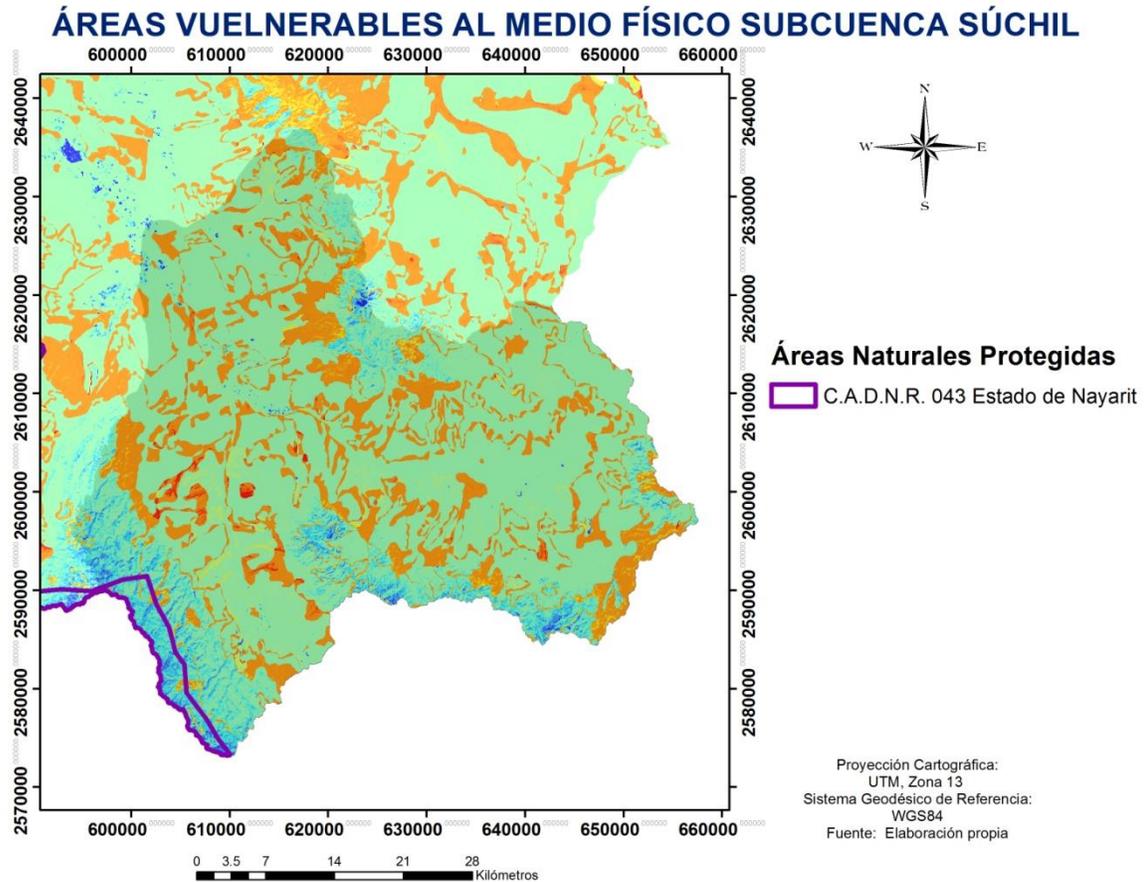


Figura 20.-influencia de C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit en subcuenca Súchil

En la subcuenca Súchil, el bosque tiene un cambio de 15,498.7 ha a vegetación secundaria, este tipo de cambios manifiestan una zona de disturbio considerable, al igual que la utilización de zonas con probable regeneración vegetal en la agricultura.

Tabla 18.- Cruce de tablas serie I y serie V

		Serie I Uso de Suelo y vegetación ha					
		Agricultura	Bosque	Chaparral	Pastizal	Vegetación Secundaria	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	53,737.8	654.3		2,525.3	9,371.7	66,289.2
	Asentamientos	794.5			148.6	750.3	1,693.4
	Bosque	17.4	25,969.8	100.6	560.1	1,265.1	27,913.0
	Pastizal	1,927.3	410.3		19,439.4	2,287.4	24,064.4
	Vegetación Secundaria	7,460.2	15,498.7	879.5	2,053.1	62,978.2	88,869.6
	Agua	152.0	27.0		46.0	71.6	296.5
	Total general	64,089.2	42,560.0	980.2	24,772.4	76,724.3	209,126.0

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.8 Subcuenca Saucedá

La zona de Canatlán perteneciente a la subcuenca Saucedá, según el acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero Valle de Canatlán, clave 1002, en el Estado de Durango, es una de las principales regiones agrícolas del estado con cultivos como el de la manzana, avena forrajera, maíz y trigo de grano lo que explica el cambio de cobertura de 7,597.6 ha de pastizal a agricultura (Tabla 1919).

Otra de las actividades económicas que se desarrollan es la explotación de bosques para la extracción de resinas y maderas, y corresponden con niveles altos de degradación por lo que se deben realizar obras de conservación y restauración forestal. Tan solo en la subcuenca saucedá se tuvo un incremento de 95,880.2 ha de vegetación secundaria de las cuales 40,988.6 ha correspondían a Bosque.

Tabla 19.-Cruce de tablas subcuenca Saucedá.

		Serie I Uso de suelo y vegetación ha								
		Agric.	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Veg. Halófila	Vegetación Secundaria	Agua	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	45,162.9	93.6	132.5	2,235.1	7,597.6	71.4	234.5	114.7	55,642.4
	Asentam.	674.5			25.7	343.3				1,043.5
	Bosque	7.8	29,339.7	2,143.7	771.3	1,255.3				33,517.9
	Matorral y Mezquital	715.6	92.5	12.9	17,252.6	659.9	114.3	55.9		18,903.6
	Pastizal	1,640.9	2,831.2	602.6	1,385.1	27,427.0	2,755.6	338.6	162.5	37,143.6
	Vegetación Halófila	1,095.8			335.8	553.9	2,552.6		68.2	4,606.2
	Vegetación Secundaria	1,042.6	40,988.6	42,212.1	1,125.2	10,546.1	594.7	4,395.1		100,904.3
	Agua	392.2	19.8	0.1	26.5	184.8	80.7		1,103.4	1,807.5
	Total general	50,732.4	73,365.5	45,103.9	23,157.3	48,567.8	6,169.3	5,024.1	1,448.8	253,569

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.5.9 Subcuenca Mezquital

En la Subcuenca Mezquital se presenta un número mayor de áreas vulnerables, puesto que el valor máximo de erosión actual en la zona llega a 3000 t/Ha/año.

En el municipio de Mezquital la principal actividad económica que se desarrolla es la ganadería con un valor anual de 159.6 millones de pesos lo que explica el impacto que se produjo en bosques, sustituyendo 179,767.5 ha de bosque por vegetación secundaria y 11,836.2 ha a pastizal. Un aumento de 2,200.5 ha destinadas a la agricultura como se muestra en la tabla 20.

Tabla 20.- Cruce de tablas subcuenca Mezquital

Serie I Uso de suelo y vegetación ha									
	Agricultura	Bosque	Chaparral	Matorral y Mezquital	Pastizal	Selva	Vegetación Secundaria	Total general	
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agricultura	4,790.5	1,907.2		49.8	1,762.6	150.0	1,130.5	9,790.4
	Asentamientos	80.8	0.0			31.1		21.2	133.1
	Bosque	1,136.3	394,255.9	300.2	543.7	6,574.3	5,287.7	2,563.3	410,661.5
	Matorral y Mezquital	1.6			4,336.1	502.6		448.8	5,289.1
	Pastizal	380.1	11,836.2		376.2	46,728.9	1,756.7	2,105.0	63,183.2
	Selva	3.9	7,869.8		96.2	2,499.7	42,540.1	1,684.2	54,693.9
	Vegetación Secundaria	1,196.8	179,767.5	1,213.7	6,177.4	20,047.3	13,707.7	59,132.1	281,242.6
	Vegetación acuática		91.2			186.5	791.9	242.8	1,312.3
	Agua					27.1		1.8	28.9
	Total general	7,589.9	595,727.7	1,513.9	11,579.6	78,360.1	64,234.1	67,329.6	826,335

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

En la subcuenca mezquital se encuentra superficie del área protección de recursos naturales C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit y la Reserva de la Biosfera La Michilía (Figura 21), donde se puede apreciar que sus valores son bajos, considerando así un efecto positivo el estatus de protección de la zona.

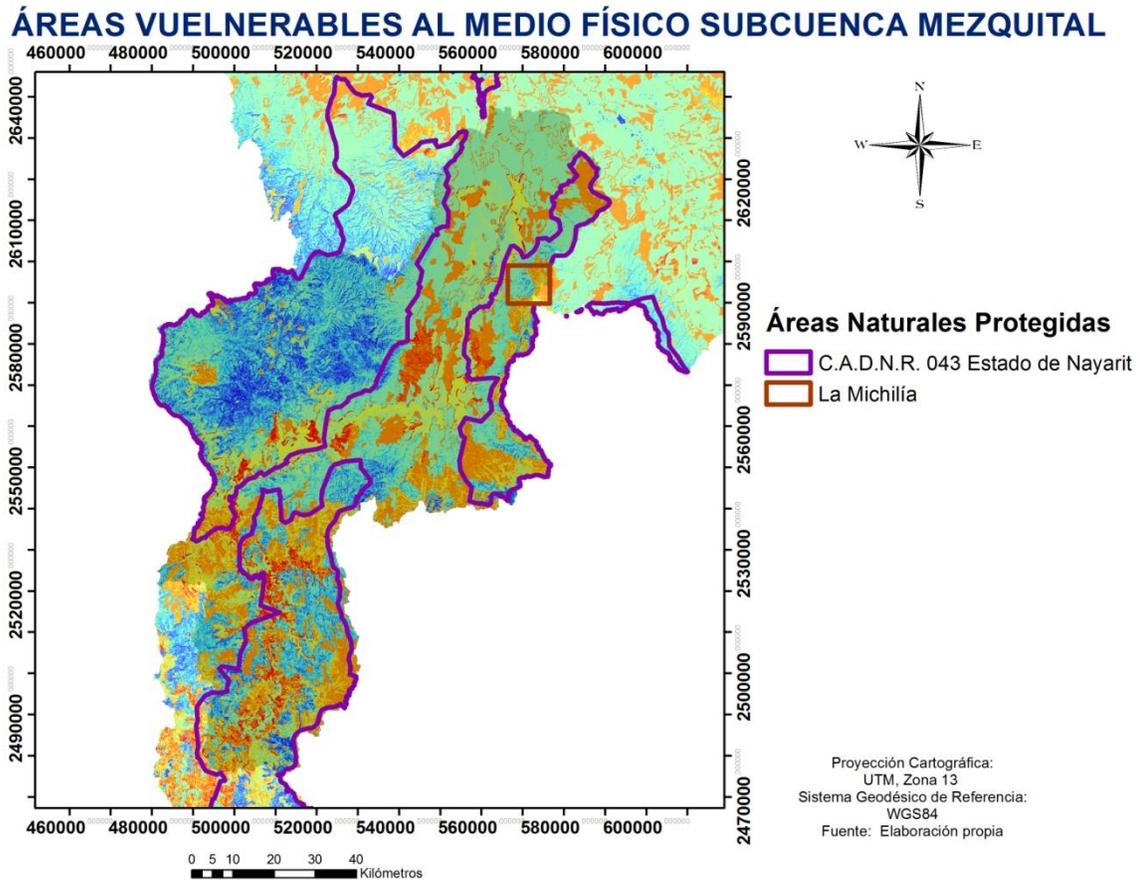


Figura 21.-Influencia de C.A.D.N.R. 043 del Estado de Nayarit y la biosfera de la Michilía en subcuenca Mezquital

6.5.10 Subcuenca San Pedro

En la subcuenca San Pedro se encuentra Marismas Nacionales Nayarit, se protege uno de los sistemas de humedales más productivos en México, resguardando el 20% del mangle total del país (CONANP, 2016), en esta zona se detectan áreas vulnerables (figura 22) registrando áreas desprovistas de vegetación y cambios en la cobertura del suelo con transiciones de vegetación halófila (herbáceas) a manglar y fuera del área natural protegida de manglar a agricultura.

En esta subcuenca el valor máximo de erosión actual es de 2271 t/Ha/año, por lo que al igual que la subcuenca Mezquital debe de considerarse un área de prioridad para realizar obras de conservación de suelo.

Se tuvo un incremento de 75,704.9 ha de vegetación secundaria siendo así una de las subcuencas con mayor incremento en este tipo de cobertura, debido al cambio de 69,896.6 ha de Bosque, 13,230.9 ha de Pastizal y 6,579.9 ha de Selva.

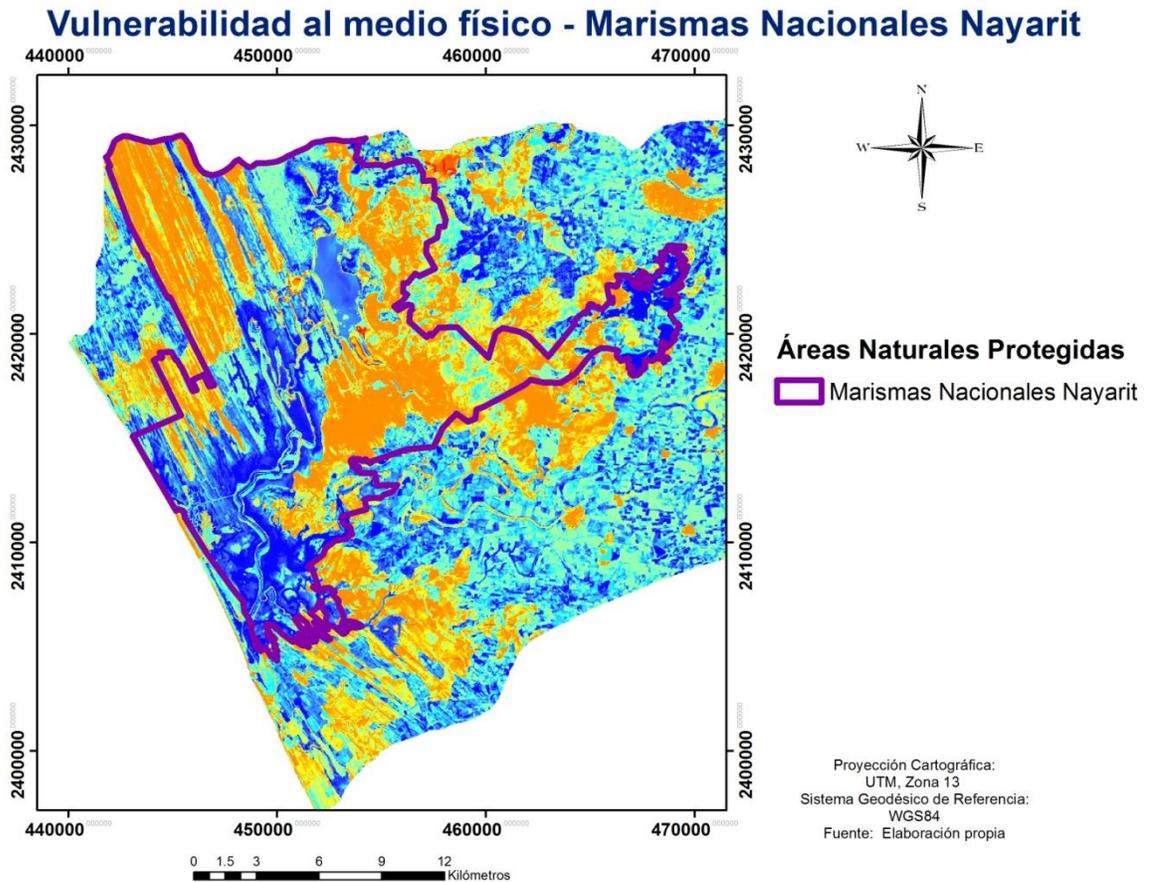


Figura 22.- Áreas vulnerables al medio físico -Marismas Nacionales

Se tuvo un incremento de 75,704.9 ha de vegetación secundaria siendo así una de las subcuencas con mayor incremento en este tipo de cobertura, debido al cambio de 69,896.6 ha de Bosque, 13,230.9 ha de Pastizal y 6,579.9 ha de Selva.

Tabla 21.-Cruce de tablas subcuenca San Pedro

		Serie I Uso de suelo y vegetación ha										
		Agric.	Bosque	Manglar	Pastizal	Selva	Veg. Halófila	Veg. Sec.	Saban. y Palmar	Dunas cost.	Agua	Total general
Serie V uso de suelo y vegetación ha	Agric.	41,432.5	1,086.6	2,380.7	2,367.3	171.6	2,323.9	6,399.4	2,261.4	99.3	145.4	58,668.1
	Asent.	1,585.5	77.9	41.5	420.0	22.2		147.5	123.7	15.7	0.0	2,433.9
	Bosque		48,069.8		1,191.4	2,515.8		3,992.0				55,769.0
	Manglar	315.2		11,237.3	5.9		716.2	10.5		34.2	761.6	13,080.9
	Pastizal	206.1	125.3		1,054.5	465.2		2,200.3	705.6			4,757.0
	Selva	136.0	3,958.0		927.3	6,763.4		8,416.9				20,201.6
	Veg. Sec.	1,584.0	69,896.6	3,366.3	13,230.9	6,579.9	1,276.9	31,024.4	1,093.9		769.4	128,822.3
	Saban. y Palmar	93.9			276.0		6.1	151.3	1,463.2			1,990.5
	Veg. acuática	1,071.5	13.1	2,422.0	93.3	19.7	6,374.0	613.3	0.6	3.5	313.6	10,924.7
	Dunas costeras	18.3		30.9	16.4			7.3		210.1	89.1	372.0
	Agua	980.1		1,230.3	4.9	3.2	620.2	154.5	2.5	84.0	1,534.5	4,614.2
	Total general	47,423.1	123,227.3	20,709	19,588	16,541	11,317.3	53,117.4	5,651	446.6	3,613.4	301,634.1

Se marca en rojo la superficie que presenta mayores cambios de la Serie I a la Serie V, y en azul el área que se conservó

6.6 Análisis de sensibilidad

Con la finalidad de tener cierto grado de certeza en la distribución y superficie estimada para la identificación de zonas vulnerables al medio físico. Se utilizó el índice de coincidencias KAPPA para evaluar la similitud, este toma valores de cero a uno, donde 0 significa sin coincidencia y 1 completa coincidencia.

Los modelos evaluados fueron:

$$Vuln1 = (Wj * \text{Áreas desprovistas de vegetación}) + (Wj * \text{Áreas de cambio}) + (Wj * \text{Erosión actual})$$

$$Vuln2 = \text{áreas desprovistas de vegetación} * \text{áreas de cambio} * \text{Erosión actual}$$

$$Vuln3 = \frac{\text{Áreas desprovistas de vegetación} + \text{Áreas de cambio} + \text{Erosión actual}}{3}$$

El índice de Kappa para la comparación entre los mapas de vulnerabilidad se muestra en la tabla 22.

Tabla 22.-Índice de Kappa para análisis de sensibilidad

Análisis de similitud	Índice de Kappa
Vuln1 y Vuln2	.0733
Vuln1 y Vuln3	.3987
Vuln2 y Vuln3	.0733

Los resultados sufren alteraciones al cambiar el peso de las variables de entrada, lo que nos indica que los resultados obtenidos son sensibles a variaciones según su peso.

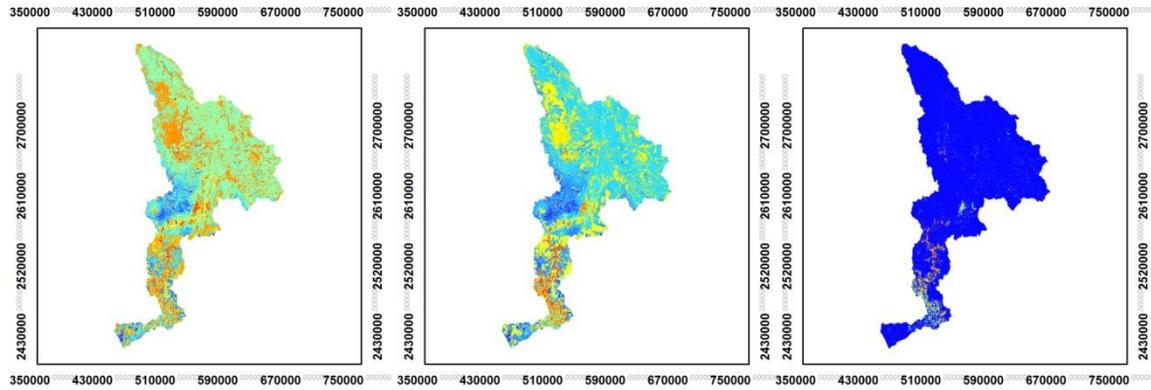
La tabla 23 corresponde a la escala utilizada para expresar cualitativamente la fuerza de la concordancia, según Landis y Koch 1997 (Cerde y Villarroel, 2008). Al considerar los valores obtenidos en el análisis de similitud entre el modelo utilizado (Vuln 1) y el modelo de prueba (Vuln 3) presenta una similitud aceptable, mientras que con el modelo de prueba (Vuln 2) presenta una similitud leve (Figura 23).

Tabla 23.- Valoración del Coeficiente de Kappa (Landis y Koch, 1977).

Fuente: Cerda y Villarroel (2008)

Coeficiente de Kappa	Fuerza de la concordancia
0,00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

ANÁLISIS DE SIMILITUD ENTRE TRES MODELOS PARA DETECCIÓN DE ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO

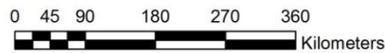
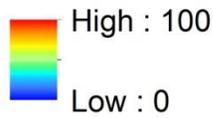


Modelo de vulnerabilidad 1

Modelo de vulnerabilidad 2

Modelo de vulnerabilidad 3

Vulnerabilidad al medio físico



WGS_1984_UTM_Zone_13N
Fuente: Elaboración propia

Figura 23.- Análisis de similitud

6.7 Visitas de Campo en Subcuenca Santiaguillo

Se realizó un recorrido por la subcuenca santiaguillo en Octubre 2015, en la que se pudieron obtener algunas imágenes de la zona para comparar con los resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital.

Tabla 24.- Recorrido en Subcuenca Santiaguillo

Valor de Vulnerabilidad al medio físico	Imágenes de campo
<p>Vulnerabilidad= 49.34</p> <p>El área no presenta vegetación vigorosa ni riesgo de erosión actual.</p>	
<p>Vulnerabilidad= 46.34</p> <p>La zona presenta valores de NDVI de .42, valores bajos de erosión actual y no se identificaron cambios.</p>	
<p>Vulnerabilidad = 49.34</p> <p>En el área no se identificaron cambios en la cobertura del suelo, ni valores altos de erosión potencial pero el valor de NDVI se encuentra dentro del rango de 0.10 a 0.38.</p>	

Vulnerabilidad = 80.41

El área presenta valores de NDVI correspondientes a zonas desprovistas de vegetación, cambio en la cobertura del suelo de agua a vegetación halófila y no presenta valores de erosión actual.



VII. Conclusiones

- La metodología de trabajo permitió alcanzar el objetivo propuesto de detectar las áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del Río San Pedro Mezquital mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, permitiendo obtener una base de datos cartográfica, que ofrece elementos esenciales para la definición de planes de manejo del territorio.
- La identificación de áreas vulnerables por subcuenca permite detectar las zonas de prioridad en las que se deben realizar obras de conservación y restauración en cada región.
- Se consideró más relevante el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación por lo que fue ponderado con el mayor valor, puesto que si el área se encuentra desprovista de vegetación se considera que hay un probable cambio en la cobertura y un incremento en la erosión actual.
- El cálculo de Erosión actual por medio de sistemas de información geográfica brinda un panorama general de las condiciones físicas de la cuenca y su deducción es menos compleja que aquella realizada por un método directo.
- Como se muestra en los recorridos en campo, las zonas con valores de erosión actual cercanos a cero son terrenos sin pendiente, lo que nos indica que el factor $L * S$ es uno de los más importantes en el cálculo de USLE.
- Seis de las diez Subcuencas que conforman la cuenca del Río San Pedro Mezquital presentan erosión actual moderada, mientras que las subcuencas Durango y Tunal presentan una erosión fuerte y la Mezquital y San Pedro presentan erosión severa siendo por ello las más vulnerables a las actividades humanas.
- Se consideran las zonas con mayor vulnerabilidad a la erosión son las subcuencas Mezquital y San Pedro, por lo que se deben de realizar obras de conservación de suelo en las partes con mayor pendiente en la zona.
- Una de las estrategias del Programa Nacional de Restauración de Ecosistemas Forestales es el Identificar cuencas hidrológicas prioritarias

como unidad básica de planeación y la microcuenca como unidad de operación, y considerando que la variable de cambio es uno de los factores más significativos en la detección de áreas vulnerables, siendo el Bosque la cobertura con mayor superficie perturbada en la cuenca San Pedro Mezquital, se deben realizar obras de reforestación considerando que las subcuencas Mezquital y San Pedro son las que se encuentran más afectadas.

- El incremento de la vegetación secundaria en la Cuenca del Río San Pedro Mezquital se encuentra asociado principalmente a la sucesión de bosques, terrenos agrícolas y pastizal debido a la creciente demanda de espacios agrícolas y aprovechamiento forestal.
- Las subcuencas bajas presentan valores severos de erosión al igual que los mayores incrementos en vegetación secundaria por lo que se debe tener mayor énfasis en la elaboración de proyectos de conservación y reforestación que beneficien esta zona, además de que en ellas se encuentra mayor superficie de áreas de protección.
- Las áreas naturales protegidas que se encuentran en la cuenca presentan cambios en la cobertura y áreas desprovistas de vegetación, lo que sugiere que el objetivo de conservación no se cumple totalmente, y se deben analizar los planes de manejo de estas áreas.

VIII. Recomendaciones

Realizar un análisis en áreas de menor superficie sobre erosión actual que involucre prácticas de manejo del suelo para consideración del factor p .

Identificar las áreas vulnerables por subcuenca ya que permite detectar las zonas de prioridad en las que se debe realizar obras de conservación y restauración en cada región.

En los puntos de mayor vulnerabilidad de la cuenca, realizar un análisis integral que considere aspectos sociales y económicos para diseñar estrategias de conservación.

Al detectar áreas vulnerables al medio físico, se recomienda realizar acciones de conservación en las áreas con vulnerabilidad en la cuenca, así como actualizar los planes de manejo de las áreas naturales protegidas que la integran.

Realizar orto-rectificación al trabajar con la serie I y V de uso de suelo y vegetación, ya que al ser de diferente escala tiende a tener desfases entre una serie y otra, así como en el mapa de vulnerabilidad se deberá considerar para futuras interpretaciones como errores del modelo.

IX. Bibliografía.

- Aguilar, C., Martínez, y L. Aguiaga. 2000. Deforestación y fragmentación de ecosistemas que tan grave es el problema en México. CONABIO. *Biodiversitas* 30:7-11.
- Alaniz-Baeza, A . 2014. Análisis de los cambios en la cobertura de los ecosistemas de la zona central de Chile (regiones v, rm, vi) asociado a dinámicas de uso de suelo. Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo
- Ávila-García, P. 2008. Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. UNAM. *Redalyc Ciencias*, Núm. 90.
- Becerra, M.A. 1997. Erosión de suelos. México, D.F. Universidad Autónoma de Chapingo.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo).1999. Reducing Vulnerability to natural Hazards: Lessons Learned from Hurricanes Mitch. A strategy Paper on Environmental Management; Washington.
- Bosque, J., y García. 2000. El uso de los sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial. In *Anales de Geografía de la Universidad complutense* .Vol. 20.
- Carvacho, L. y M. Sánchez. 2010. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1.
- Cerda, J.L., y Villarroel Del P., L. 2008. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54–58.
- Challenger, A. y Dirzo, R. 2009. Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 37-73.
- Chengyuan, H., Shaohong, W, y Chaunyang, X. 2008 .Comparison of some vegetation indices in seasonal information. *Chinese Geographical Science*, 18 (3): 242-248.
- Chuvienco, E. 2008. Teledetección Ambiental: LA observación de la Tierra desde el espacio. 3ª ed. Editorial Ariel.594 pp.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2003. México: Imagen desde el espacio. CONABIO, México.

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Nacionales Protegidas). 2016. Consultado 18/11/2016 en: <http://marismasnacionales-nayarit.conanp.gob.mx/>

CONAZA (Comisión Nacional de de las Zonas áridas).1994, Plan de acción para combatir la desertificación

Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25(9): 1565-1596.7

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (S.F)." Guía explicativa de la temática de cobertura y uso del suelo". Consultado en: <http://geocvc.co/pdf/GuiaCoberturaUso.pdf>

Cortés, T. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Méx. pp 168.

Cuevas,M., Garrido, L. A., Pérez J.L y D.I. González. 2010. Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. In: Cotler, H., coord. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte I.A.P. México, D.F. p: 96-103.

CVC. 2012. Guía explicativa de la temática de cobertura y uso del suelo, 5.

Desmet, P.J.J., Govers G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. 51: 427-433.

DOF. 2015.Ley de General de Equilibrio Ecologico (LGGEPA).Articulo 53.

DOF. 2016. Ley de Aguas Nacionales.

DOF.2010. ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero Valle de Santiaguillo, clave 1001, en el Estado de Durango. Consultado 10/10/2016 en: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5156156

DOF.2010.ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero Valle de Canatlán, clave 1002, en el Estado de Durango. Consultado 10/10/2016 en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5156155&fecha=23/08/2010

Eastman, R. 2006. *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Maryland: Clark University, USA.

Franco-Mass, S. y H,Regil-García. 2010. "IDRISI como herramienta para la evaluación de áreas naturales protegidas. El caso del parque nacional

Nevado de Toluca". Revista Geográfica de América Central. N° Especial. II Semestre

Franquet-Bernis, J.M. 2009 "El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro". Edición electrónica gratuita. Texto completo en www.eumed.net/libros/2009b/564/

García, J.L., y M.C. Giménez Suárez. 2009. "Metodología para la Estimación del Factor Topográfico, LS, de los Modelos RUSLE y USPED Bajo Entorno SIG". 5° congreso forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Gaspari, J., A.M. Rodríguez., M.I. Delgado., G.E. Senisterra., y G.A. Denegri .2011. "Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG". Multequina vol.20 no.1 Mendoza

Gómez, J.J. 2001. "Vulnerabilidad y Medio Ambiente". Seminario Internacional Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe Santiago de Chile, 20 y 21 de junio de 2001. División de medio ambiente y asentamientos humanos. CEPAL

Gómez, M. y Barredo, J. 2005. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del Territorio. Segunda edición, México DF.

Hantson, S., Chuvieco E., Pons. X., Domingo. C., Cea. C., Moré. G., Cristobal J., Peces. J. y Tejeiro. J. 2011. Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. Revista de Teledetección 36, 51-61. ISSN: 1988-8740

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Guía para la interpretación de cartografía climatológica. Consultado 05/09/2016 en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231781/702825231781_1.pdf

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250, 000 : serie V. consultado el 02/08/2015 en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/doc/guia_interusos_uelov.pdf

Ishizaka A. y Labib. A. 2009. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. ORInsight, 22(4): 201-220.

IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports. FAO. No. 103. Vol. (43). <http://doi.org/10.1017/S0014479706394902>

Kasperson, J., Kasperson, R. y Turner, B. 1995. Regions at Risk. United Nations University Press, Tokyo, Japan.

- KEITH, D., et al .(2013). Scientific Foundations for an IUCN Red List of Ecosystems, PLOS ONE 8(5): e62111.
- Landis, J., y Koch, G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*; 33: 159-74.
- López, A. D. G., 2005. Estimación De La Erosión Hídrica Para Diferentes Escenarios De Manejo en la Microcuenca “El Calabozo” Municipio de Morelia, Michoacán. Tesis profesional. Universidad autónoma chapingo. Chapingo, Edo., de México
- López, D., Castillo, O., Zavala, J., Hernández, H .2014. "Estructura y composición florística de la vegetación secundaria en tres regiones de la Sierra Norte de Chiapas, México". *Polibotánica* 37: 1-23 .
- López, V. H. V., y Plata, W. R. 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geograficas*, 68, 85–101. <https://doi.org/10.14350/rig.18000>
- Madrid-Ramírez, L. 2011. Los pagos por servicios ambientales hidrológicos: Más allá de la conservación pasiva de los bosques. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C.
- Magaña, R.N y A, Juárez. 2003. Cálculo de la erosión hídrica con énfasis en el factor LS mediante modelos de elevación digital (caso estudio: cuenca Coatlinchán, Méx.). Tesis para obtener el título de ingeniero en planeación y manejo de recursos naturales renovables. Universidad Autónoma de Chapingo
- Martín-López, B y Montes, C .2010. Funciones y servicios de los ecosistemas: una herramienta para la gestión de los espacios naturales. Departamento de Ecología. Universidad Autónoma de Madrid (UAM)
- Mas, J.F., Velázquez, A., y Couturier, S. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1), 23–39.
- Mas, J.F., y T. Fernández. 2003. Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones Geográficas* 51:73-87.
- Masera, O.R, M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: Current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35 : 265-295.
- Mejía, J., F. Dal-Pozzo., P.Montilla y G.Torres .2009. Evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 51(2)

- Montes, M. A. L., Domínguez, M. A., y Ventura, E. (2000). Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Ambientales,9.
- Montes, M.A.L., E.M. Uribe., E. Garcia. 2011. Mapa Nacional de Erosión Potencial.Tecnología y Ciencias del Agua, vol. II, núm. 1
- Morales-Ascarrunz, M.C, 2014.Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical De Investigación Y Enseñanza
- Palacio,J.,et al. 2004 .Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. Secretaría de desarrollo social secretaria de medio ambiente y recursos naturales instituto nacional de ecología universidad nacional autónoma de México. INNEC
- Pando, M. M., Gutiérrez, G. G., Maldonado, A. H., Palacio, J.L.P., Estrada, A. E. C. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. Invest. Geog no.51
- Peña-Llovis,J. 2007. "Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la Marina baixa (Alicante). Tesis de doctorado. Universidad de Alicante.
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., y Plata Rocha, W. (2009).Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 33-52.
- Pozzobon, E y Gutiérrez.J. 2003. Utilización de un sistema de información Geográfica para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la ciudad de Mérida, Venezuela. Revista Forest. Venezuela. 47.
- Ramírez, J, M, L. 2009. Producción De Sedimentos En La Cuencas: Revisión De Criterios Y Aplicabilidad a La Cuenca Del Río Apulco. Tesis de maestria. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. JIUTEPEC, MORELOS
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weeises, G.A., Mccool, D.K. y Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agriculture Handbook Number 703. Washington, D.C.: USDA-ARS.

- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. y Harían, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.
- Ruiz, V., Savé, R., y Herrera, A. 2013. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Mirafior Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente, 117-123.
- Saaty, T.L. 1977. A Scaling Method for priorities in Hierarchical Structures. J. Math. Pdhychology, 15:234-281.
- Salas, E. 2010. Análisis del cambio en la cobertura arbórea de la subcuenca del Río el Tunal (1990-2008). Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN-Durango.
- Samaniego, L. 2015. Manual del curso -taller procesamiento digital de imágenes de satélite con ENVI. Facultad de ingeniería civil Universidad Nacional de ingeniería. Consultado 05/10/2016 en: <https://drive.google.com/file/d/0Bz2JARLkKYt-N2NOTUFHbUdEczQ/view>
- Scasso, F. 2002. Ambientes Acuáticos De La Zona Costera De Los Humedales Del Este, Estado actual y estrategias de Gestión. Programa de Conservación de la Biodiversidad y Desarrollo Sustentable en los Humedales del Este (PROBIDES). Documentos de Trabajo – N° 43
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2001. Programa Sectorial de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.(SEMARNAT) . 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- Sinat. SEMARNAT. 2014. Fraccionamiento campestre -documento técnico unificado modalidad "a" para el cambio de uso del suelo semarnat-03-066. Proyecto: Fraccionamiento campestre, San Francisco del Madroño .
- Tena-González, G.A. 2010 Determinación de áreas priorotarias para la conservación de la Biodiversidad en la zona costera e islas de Bahía Magdalena, B.C.S., México. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biologicas del Noreste, S.C.
- Torres, E., Linares, G., Tenorio, M. G., Peña, R., y Castelán, R. 2014. Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105 : Cuetzalan , México. Revista Iberoamericana de Ciencias.
- Velázquez, A., Duran.E., Larrazábal.A., López.F. y Medina. C. 2010. La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Atlas. Tepalcatepec. cap 4.Consultado 06/06/2015 en : <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/601/cobertura.pdf>

Wilches-Chaux, G. 1993. La vulnerabilidad Global. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina. SL.CO

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, D.C.: U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 282.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, D.C.: U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537.

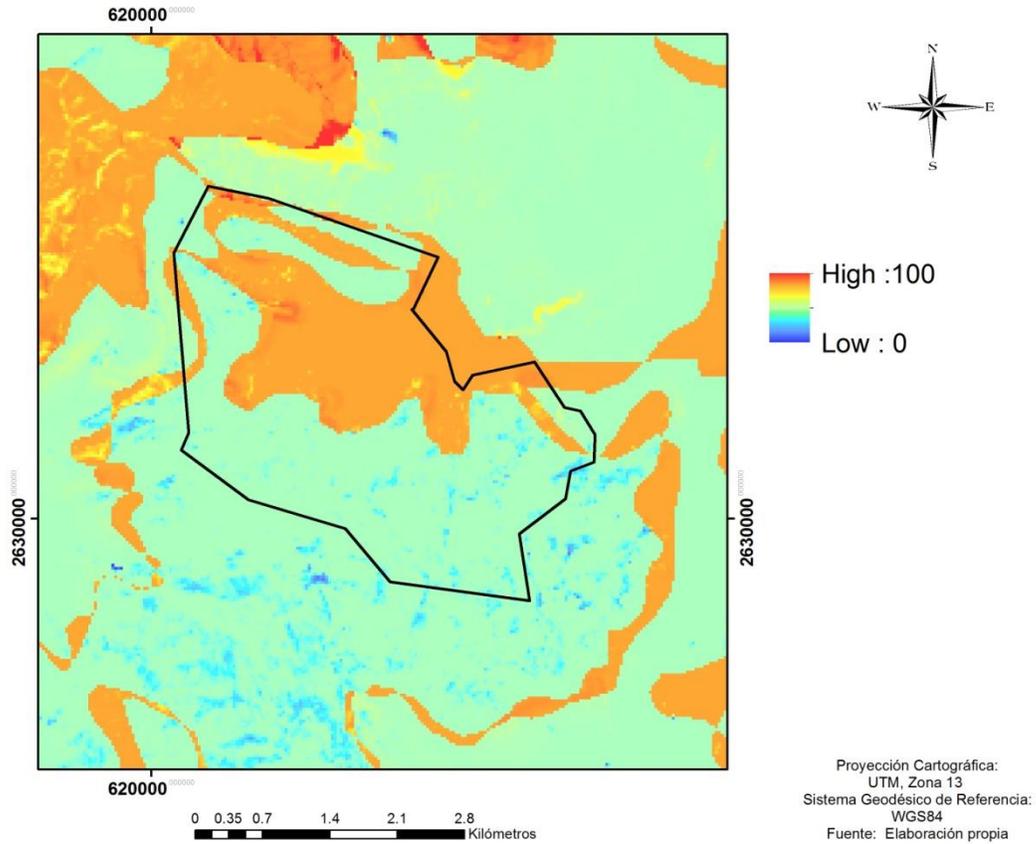
WWF.2012. "Ficha técnica Cuenca del Río San Pedro Mezquital"

Zadeh, L.A., (1965). Fuzzy Sets. Information and control, 8:338-353. en México, CONAZA, Saltillo, Coahuila, México.

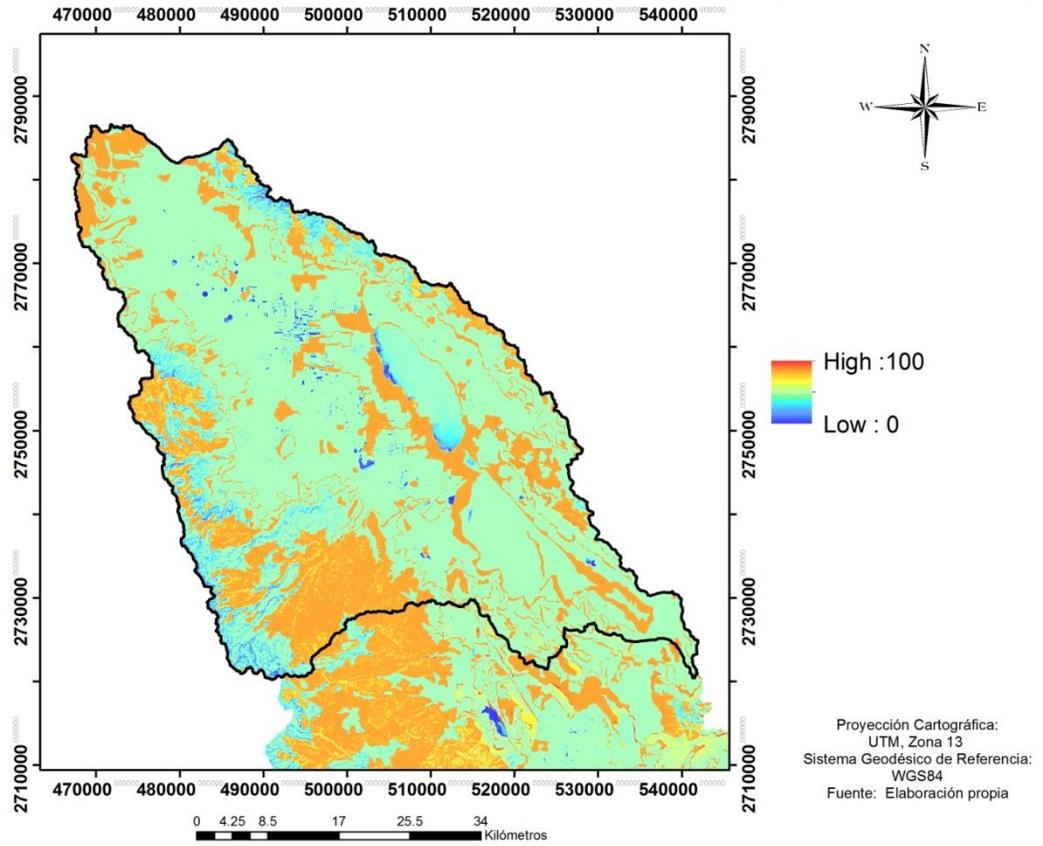
X. Anexos

- I. Áreas vulnerables al medio físico en sierra de órganos
- II. Áreas vulnerables al medio físico por subcuencas
- III. Encuesta a expertos

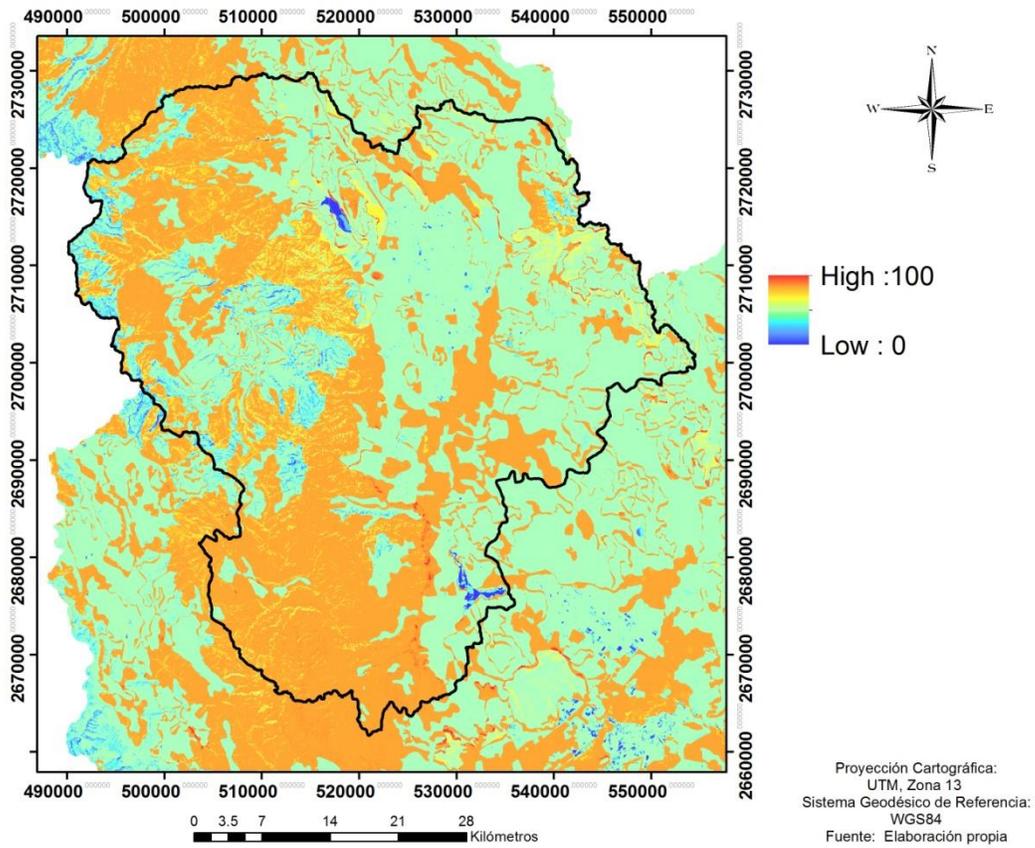
ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SIERRA DE ÓRGANOS



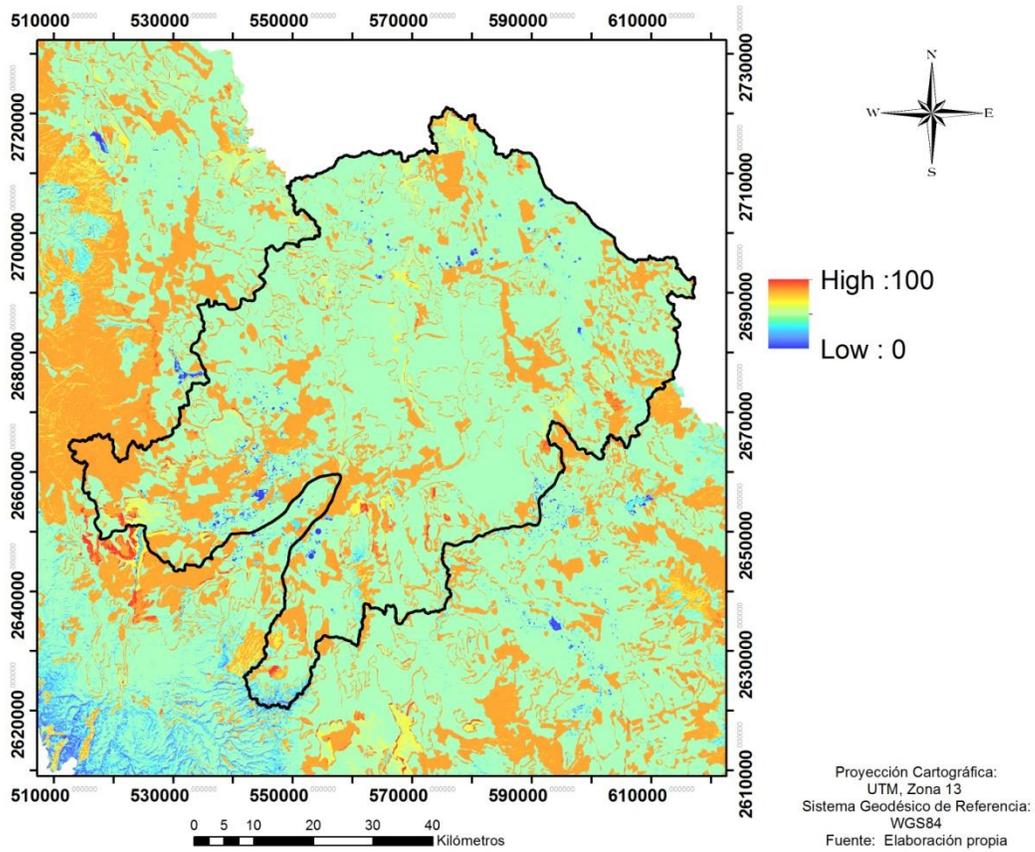
ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA SANTIAGUILLO

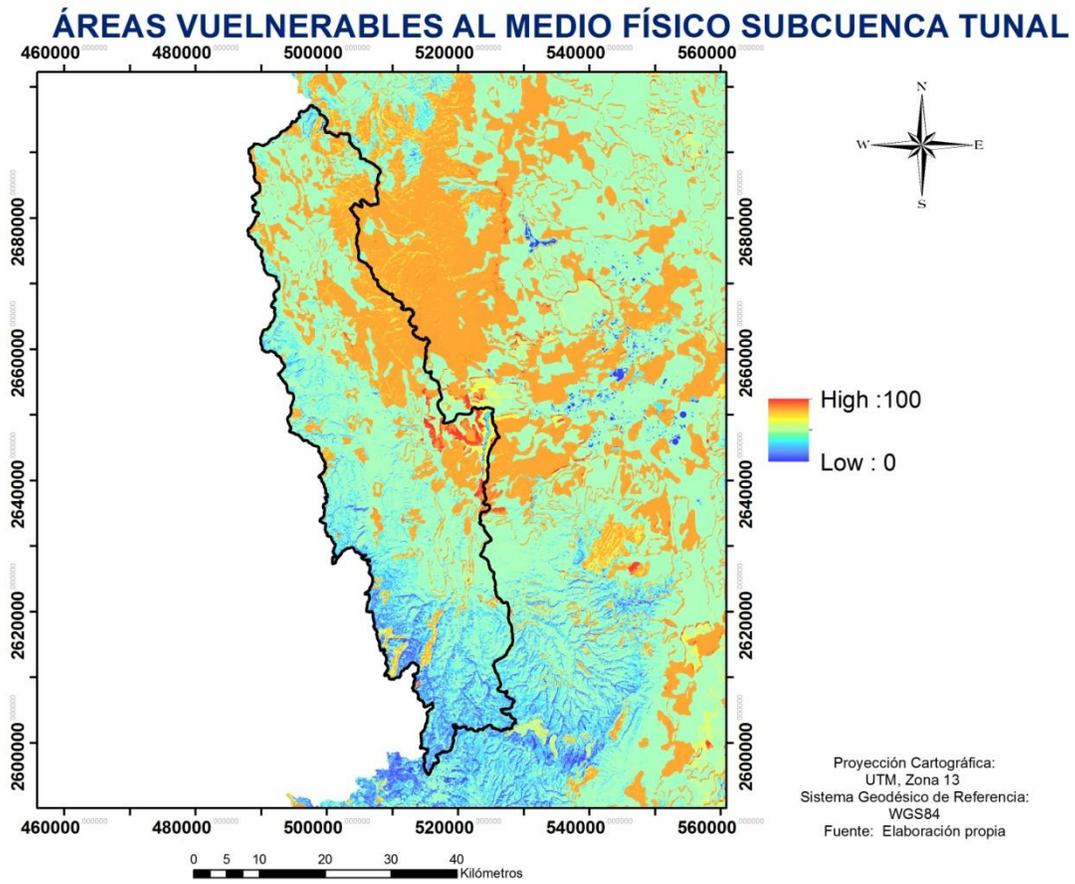


ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA SAUCEDA

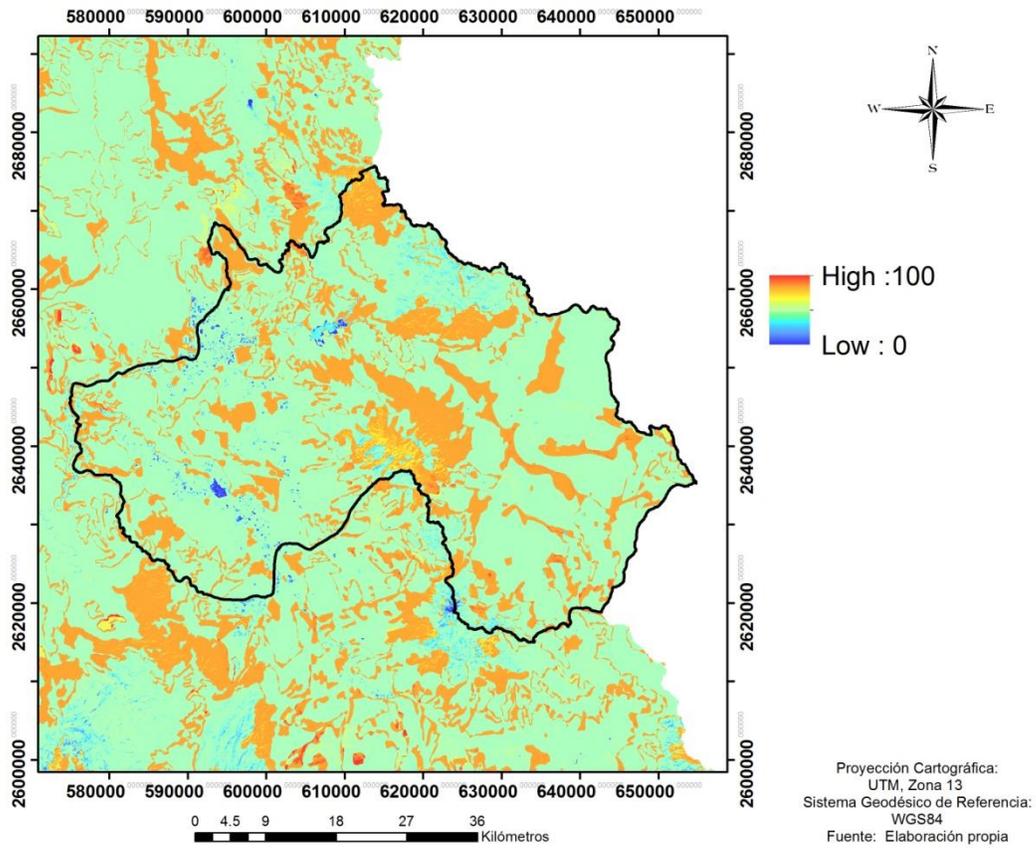


ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA DURANGO





ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA POANAS



ÁREAS VULNERABLES AL MEDIO FÍSICO SUBCUENCA SAN PEDRO

