



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL RIESGO POR
EROSIÓN HÍDRICA APLICANDO LA
SUPERPOSICIÓN DEL PELIGRO Y LA
VULNERABILIDAD**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Carlos Eduardo Soriano Villegas

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Ma. Del Rosío Ruíz Urbano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

AGRADICIMIENTOS

A mis padres

Quiero agradecer de todo corazón a mis padres por la formación, educación y el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de esta etapa de mi vida., este logro es de ustedes. Siempre les estaré eternamente agradecido y como ya se los he mencionado agradezco a mi padre por haberme enseñado el sendero y en especial agradezco a mi madre por haberme enseñado a caminar el dicho sendero. Gracias Mama por siempre estar al pendiente de mí durante toda esta etapa por todo el apoyo que me diste, por todas esas noches que te desvelabas esperándome y todas esas mañanas que te levantabas muy temprano a veces para despertarme. Gracias Papa por haberme brindado siempre las herramientas y los materiales para poder desarrollarme al máximo en mis estudios. Ha ambos les agradezco porque sin ustedes esto no hubiera sido posible este logro.

Se los agradeceré de por vida. Te amo MAMA y Te amo PAPA.

A mis hermanos

Les agradezco a mis hermanas Ángeles, Mariana y a mi hermano Luis por estar conmigo, ayudarme y apoyarme de manera incondicional en esta etapa. Espero de todo corazón poder apoyarlos en el futuro tanto. Quiero que sepan que siempre contarán conmigo.

A mi familia

Agradezco de todo corazón a Jazmín y a mi hija Lunita por todo su apoyo y motivación que me han brindado para cerrar este ciclo. Te agradezco Min por permanecer y luchar a mi lado en este camino lleno de adversidades y aunque no sé lo nos depara el destino, ahí siempre estaré para ustedes. Te agradezco Lunita por haberme brindado la mayor felicidad del mundo al convertirme en Papa. Les agradezco de corazón por todo lo vivido hasta el día de hoy las amo con todo mi corazón.

A la Dra. Ma. Del Rosio Ruiz Urbano

Le quiero agradecer a la Dra. Ma. Del Rosio Ruiz Urbano por haberme recibido al terminar mis estudios de licenciatura porque prácticamente me adopto en ese momento que me sentía desorientado, al ofrecerme mi primer empleo apoyándola, por motivarme a estudiar la especialización en hidráulica, por enseñarme como se debe redactar un informe, por fomentarme a siempre mejorar, por impulsarme en el mundo laboral. Por todo eso y muchas cosas más le agradezco de todo corazón, jamás la olvidare doctora usted fue pieza fundamental en mi formación profesional, de corazón muchas gracias.

A mis profesores

Les agradezco a todos mis profesores de la universidad por haberme dado una formación profesional excelente porque gracias a ello hoy estoy aportando a los grandes retos de la ingeniería. Gracias profesores por su formación técnica, ética y de calidad. Un agradecimiento especial a los profesores que forman parte de mi jurado por darme la confianza y el apoyo incondicional para cerrar este ciclo.

Un agradecimiento especial al M.I. Gabriel Moreno Pecero por haberme permitido formar parte de su grupo de apoyo a las comunidades, por enseñarme la importancia de la ingeniería en la sociedad y por todos los consejos que me dio durante mi estancia ahí. Siempre lo recordare con gran estima profesor.

Un agradecimiento especial a mi profesor de física Felipe Santander por haberme orientado y motivado en la elección de la carrera de ingeniería civil, le agradezco las clases extras de ciencias básicas y los libros que me brindo para mi formación.

A mis amigos

Les agradezco a mis amigos de la facultad (Edgar, Alejandro, Rocío, Sergio, Cristian, Rafael, Luis Enrique) por haber compartido esta aventura conmigo, por haber compartido muchos momentos especiales dentro y fuera de las aulas, nunca los olvidare amigos.

Un agradecimiento especial para mis amigos del CCH (Edgar, Joel, Raúl, Miguel, Isamar e Irvin) pues con ustedes pase momentos inolvidables en esa etapa de la vida y aunque tomamos caminos distintos fue un honor haber coincidido con ustedes en tiempo y forma siempre los recordare.

Un agradecimiento especial para mi amigo Juan Manuel que desde la secundaria hasta el día de hoy me ha brindado su amistad incondicional cuando más lo necesito.

Muchas gracias a todos mis amigos, saben que siempre pueden contar conmigo.

Universidad Nacional Autónoma de México

Siempre le estaré agradecido a la máxima casa de estudios, mi alma mater por haberse convertido en mi segundo hogar, por todo lo que aprendí en sus aulas y fuera de ellas por haberme abierto y extendido el panorama de como ver y entender el mundo. Gracias por que fue aquí donde viví las mejores etapas de mi vida, donde se saciaba mi hambre de conocimiento y la vez me enseñó la importancia de compartir este. En mi corazón siempre llevare la frase “Por mi raza hablara el espíritu” Gracias UNAM por todo.

A dios

Gracias a dios por la vida, mis padres, mis hermanos, mi familia, mis profesores, mis amigos y todas las personas, pruebas y etapas que me puso en mi camino para llegar hasta este punto de mi vida.

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 | ANTECEDENTES Y OBJETIVOS..... | 8 |
| 2.1 | Introducción..... | 8 |
| 2.2 | El ciclo del Agua..... | 9 |
| 2.3 | Cuenca hidrológica..... | 10 |
| 2.4 | Clasificación de las cuencas..... | 10 |
| 2.4.1 | Por su sistema de corrientes..... | 10 |
| 2.4.2 | Por su tamaño..... | 11 |
| 2.5 | Características fisiográficas de una cuenca hidrológica..... | 13 |
| 2.5.1 | Área de la cuenca..... | 13 |
| 2.5.2 | Centroide..... | 14 |
| 2.5.3 | Parteaguas..... | 15 |
| 2.5.4 | Corrientes tributarias..... | 15 |
| 2.5.5 | Numero de orden..... | 15 |
| 2.5.6 | Densidad de corriente..... | 16 |
| 2.5.7 | Pendiente del cauce principal..... | 16 |
| 2.5.8 | Clasificación de corrientes..... | 19 |
| 3 | PELIGRO O AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA..... | 22 |
| 3.1 | Introducción..... | 22 |
| 3.2 | Concepto de peligro por erosión hídrica en una cuenca..... | 23 |
| 3.3 | Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)..... | 36 |
| 3.4 | Sistemas de información geográfica (SIG). Software ArcGis..... | 48 |
| 3.4.1 | Introducción a los sistemas de información geográfica..... | 48 |
| 3.4.2 | Generalidades del Software ArcGIS..... | 54 |
| 3.4.3 | Algebra de mapas..... | 59 |
| 4 | VULNERABILIDAD Y RIESGO..... | 67 |
| 4.1 | Conceptos de vulnerabilidad..... | 68 |
| 4.2 | Tipos de vulnerabilidad..... | 69 |
| 4.3 | Conceptos de riesgo..... | 72 |
| 4.4 | Metodología para un atlas de riesgo..... | 75 |
| 5 | CASO DE ESTUDIO..... | 83 |
| 5.1 | Descripción de la zona..... | 84 |
| 5.2 | Características Fisiográficas..... | 95 |
| 5.3 | Determinación de la erosión hídrica..... | 110 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.1 | Información de Precipitación. | 110 |
| 5.3.2 | Factor de erosividad de la lluvia (R). | 116 |
| 5.3.3 | Factor de erodabilidad del suelo (K) | 122 |
| 5.3.4 | Factor topográfico Longitud - Pendiente (LS) | 127 |
| 5.3.5 | Factor de vegetación y cultivo (C) | 131 |
| 5.3.6 | Factor de prácticas de conservación (P) | 134 |
| 5.3.7 | Evaluación de la Erosión Hídrica. | 135 |
| 5.4 | Evaluación de la vulnerabilidad | 138 |
| 5.5 | Obtención del riesgo por erosión hídrica | 142 |
| 6 | ANÁLISIS DE RESULTADOS. | 146 |
| 6.1 | Del peligro..... | 146 |
| 6.2 | De la Vulnerabilidad | 150 |
| 6.3 | Del Riesgo..... | 153 |
| 7 | CONCLUSIONES Y/O RESULTADOS..... | 157 |
| 8 | Bibliografía | 160 |
| 9 | Anexos..... | 163 |
| | Anexo A | 163 |
| | Anexo B | 164 |
| | Anexo C | 165 |

1 INTRODUCCIÓN.

En la naturaleza existen varios fenómenos a los que estamos expuestos, hay fenómenos que no sabemos cuándo, dónde y en que magnitud se presentarán como los sismos, los tsunamis, los huracanes y las erupciones volcánicas. Por lo regular este tipo de fenómenos son poco frecuentes y siempre que se presentan dejan daños significativos. Sin embargo, existen otro tipo de fenómenos que se presentan de manera más frecuente y los daños son prácticamente inapreciables como la lluvia, el granizo, las tormentas eléctricas y los vientos. Sin embargo, este tipo de fenómenos funcionan como factores detonantes a otros fenómenos, como por ejemplo la lluvia, que es la responsable de alterar el nivel de los cauces de los ríos, la erosión del suelo, la inundación en zonas bajas y los niveles del agua subterránea. Para nuestro caso nos enfocaremos en la erosión hídrica.

La erosión es un fenómeno en el que el suelo se removió y es transportado de un sitio a otro, es detonado principalmente por la lluvia, se clasifican en erosión hídrica y por el viento como erosión eólica.

La erosión hídrica se define como la remoción del suelo y se debe al impacto de las gotas de lluvia contra el terreno causando un desprendimiento de partículas suspendidas, que son trasportadas por los escurrimientos generados por la lluvia y la pendiente del terreno.

Dicha erosión hídrica se puede calcular a diferentes escalas, a nivel de parcelas o a nivel de la república mexicana, aunque por lo regular se calcula a nivel de cuencas. Una cuenca se define como un área natural donde el agua de lluvia es captada y escurre por un sistema de corrientes que conocemos como ríos. Además, la cuenca es la unidad básica de estudio de la hidrología.

Existen varias maneras para calcular la erosión hídrica en una cuenca, puesto que se han desarrollado modelos y ecuaciones que intentan predecir la cantidad de suelo que aporta una cuenca. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se basan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Dicha ecuación considera múltiples factores como la lluvia y las condiciones físicas del suelo.

El principal objetivo de calcular la erosión hídrica es conocer la cantidad de suelo que se está perdiendo en una zona y que se está aportando a otra. Pues ambas situaciones en exceso pueden causar consecuencias como la degradación del suelo o generación de azolves en cuerpos de agua respectivamente.

Justificación

La precipitación es un fenómeno que es constante, por lo regular las primeras lluvias del año empiezan en abril y posteriormente la temporada de lluvias empieza en julio y termina en octubre e incluso en noviembre se presentan las últimas precipitaciones del año. Esto debido a fenómenos hidrometeorológicos que se forman en el océano pacífico y el golfo de México.

La erosión hídrica también es un fenómeno que se considera de manera anual. Dada esta situación y las consecuencias que genera la erosión hídrica podemos tener zonas expuestas en una cuenca. Particularmente las zonas donde se desarrollan actividades como la agricultura. Afectando la producción o la cosecha misma.

Es por ello que es importante tener en cuenta el fenómeno de erosión hídrica, aunque es un fenómeno que genera daños prácticamente inapreciables después de una precipitación normal, a largo plazo puede ocasionar daños considerables.

Planteamiento del problema

La ubicación geográfica de nuestro país en el planeta es de las más favorables desde el punto de vista de diversidad, ya que al encontrarnos entre el golfo de México y el océano pacífico tenemos varios tipos de climas y una diversidad inmensa en flora y fauna. Además de contar con una cantidad considerable de recursos hidráulicos, consecuencia de fenómenos meteorológicos provenientes de nuestros mares, que también representan, un constante riesgo para nuestro país.

Como se mencionó, la erosión hídrica tiene consecuencias como la generación de azolves y la pérdida de suelos. Sin embargo, si puntualizamos, el problema en la pérdida potencial de suelo podemos considerar a la erosión hídrica como una amenaza potencial. Puesto que es un fenómeno que está ligado a las precipitaciones anuales, se deben considerar sus consecuencias a corto, mediano y largo plazo.

Existen una serie de amenazas en la infraestructura de nuestro país ante la erosión hídrica como las vías de transporte, en especial los caminos rurales. La reducción de la capacidad útil de las presas y la misma estructura del suelo. Además, dichas amenazas se pueden convertir en consecuencias económicas y sociales.

Enfocándonos en la estructura del suelo tenemos una serie de características físicas que lo hacen vulnerable, como la edafología, la pendiente y el uso de suelo que exista. Por ejemplo, la agricultura es uno de los usos de suelo más vulnerable. Debido a que la pérdida de suelo tiene como consecuencia la pérdida de nutrientes, lo cual afecta directamente la producción.

Esto representa un riesgo importante tanto para la sociedad, la infraestructura y el suelo mismo. Ya que son vulnerables a la erosión hídrica. Los riesgos se enfocan en las condiciones físicas del suelo, ya que es sobre él, donde se construyen diversos tipos de estructuras (Carreteras, presas, zonas urbanas, etc.). Es por esto que es importante conocer el riesgo de la erosión hídrica a partir del análisis, de la vulnerabilidad y la amenaza ó peligro.

Pregunta principal de investigación.

¿Qué es la erosión hídrica y cuál es el riesgo que existe en la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, teniendo en cuenta el análisis de la vulnerabilidad física del terreno y superposición del peligro mediante sistemas de información geográfica (SIG)?

Preguntas secundarias de investigación.

¿Qué es el fenómeno de la erosión de suelo?

¿Qué es la erosión hídrica?

¿Cómo se calcula la erosión hídrica?

¿Qué factores toma en cuenta la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)?

¿Cómo influye la lluvia en el fenómeno de la erosión hídrica?

¿Cómo influye la edafología en el fenómeno de la erosión hídrica?

¿Cómo influye la pendiente en el fenómeno de la erosión hídrica?

¿Cómo influye la cobertura vegetal y el uso de suelo en el fenómeno de la erosión hídrica?

¿Qué es un Sistema de Información Geográfica (SIG)?

¿Qué es el álgebra de mapas?

¿Qué es la vulnerabilidad?

¿Qué es la amenaza ó peligro?

¿Qué es el riesgo?

¿Cuáles son los factores de la ecuación de USLE en la subcuenca RH18Fa – Río Mixteco?

¿Cuál es la amenaza por erosión hídrica potencial en la subcuenca RH18Fa – Río Mixteco?

¿Cuáles son las vulnerabilidades físicas del suelo en la subcuenca RH18Fa – Río Mixteco?

¿Cuál es el riesgo por erosión hídrica en subcuenca RH18Fa – Río Mixteco?

Objetivo General

Describir el fenómeno de erosión hídrica y determinar el riesgo que existe en la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, teniendo en cuenta el análisis de la vulnerabilidad física del terreno, superponiéndola mediante SIG al peligro por erosión.

Objetivos específicos.

Describir el fenómeno de la erosión de suelo.

Definir el fenómeno de la erosión hídrica.

Explicar cómo se calcula la erosión hídrica.

Explicar qué factores toma en cuenta la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE).

Describir cómo influye la lluvia en el fenómeno de la erosión hídrica.

Describir cómo influye la edafología en el fenómeno de la erosión hídrica.

Describir cómo influye la pendiente en el fenómeno de la erosión hídrica.

Describir cómo influye la cobertura vegetal y el uso de suelo en el fenómeno de la erosión hídrica.

Definir qué es un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Explicar qué es el álgebra de mapas.

Definir el concepto de vulnerabilidad.

Definir el concepto de amenaza ó peligro.

Definir el concepto de riesgo.

Definir los factores de la ecuación de USLE en la subcuenca RH18Fa – Río Mixteco.

Determinar la amenaza por erosión hídrica, potencial, la vulnerabilidad física del suelo y el riesgo por erosión hídrica en la subcuenca RH18Fa – Río Mixteco.

Hipótesis de la investigación.

Mediante SIG se puede generar un mapa de riesgo, resultado de la amenaza por erosión hídrica y vulnerabilidad de la estructura el suelo, todo ello para identificar y detectar la existencia de zonas de alto riesgo al fenómeno de la erosión hídrica.

Hipótesis secundarias.

El riesgo por erosión hídrica dependerá de distintos factores como, sus características fisiográficas y climatológicas. Estas variables deben estar asociadas a los distintos niveles de riesgo que se puedan presentar en una cuenca.

Al determinar un mapa de riesgo resultado de la superposición de los mapas de peligro por erosión hídrica y vulnerabilidad física del suelo, se podrá visualizar y analizar el nivel de riesgo que se encuentra en la zona.

Resumen capitular.

Este trabajo se divide en una introducción, cuatro capítulos, análisis de resultados, conclusiones y las referencias bibliográficas.

En el capítulo 1, se presenta un resumen de los recursos hídricos con los que cuenta la República Mexicana y los antecedentes necesarios para poder definir que es una cuenca y como obtener sus principales características fisiográficas, como el área, perímetro, la pendiente, el centroide, etc.

EL capítulo 2 describe de manera general el fenómeno de la erosión del suelo y las consecuencias que pueden generar la erosión del suelo. Posteriormente se centralizará en el tema de la erosión

hídrica, así como los factores que detonan dicho fenómeno. También se describirá la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), así como los factores que toma en cuenta dicha ecuación.

En la segunda parte de este capítulo se describirá lo que es un Sistema de Información Geográfica (SIG) y cuáles son los fundamentos que toma en cuenta, se mencionaran algunas herramientas que tiene el software ArcGis y los sistemas de datos que procesa como los archivos raster y los datos vectoriales que son esenciales para el álgebra de mapas.

En el tercer capítulo se definirá de manera general el concepto de vulnerabilidad, así como los tipos de vulnerabilidad que existen. Además, se definirá el concepto de riesgo y como se asocia a algunos fenómenos naturales. También se relacionan los conceptos de vulnerabilidad y amenaza para poder conocer el riesgo.

El cuarto capítulo se aplicará lo descrito en los capítulos anteriores, es decir se calcularán las características fisiográficas de una cuenca mediante sistemas de información geográfica. Aunque la parte medular de este capítulo será la aplicación de la ecuación de USLE a la subcuenca RH18Af – río mixteco. Para poder calcular la erosión hídrica considerándose como una amenaza potencial. Además de hacer un análisis de las vulnerabilidades físicas de la estructura del suelo y con el apoyo del álgebra de mapas generar un mapa de riesgo de la subcuenca en estudio.

En el siguiente capítulo se hará un análisis de resultados, para interpretar los mapas obtenidos.

Finalmente, se presentarán las conclusiones de la tesis, así como las referencias bibliográficas.

Matriz de congruencia de la investigación.

| Pregunta | Objetivo General | Hipótesis |
|--|--|---|
| <p>¿Qué es la erosión hídrica y cuál es el riesgo que existe en la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, teniendo en cuenta el análisis de la vulnerabilidad física del terreno y superposición del peligro mediante sistemas de información geográfica (SIG)?</p> | <p>Describir el fenómeno de erosión hídrica y determinar el riesgo que existe en la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, teniendo en cuenta el análisis de la vulnerabilidad física del terreno, superponiéndola mediante SIG al peligro por erosión.</p> | <p>Mediante SIG se puede generar un mapa de riesgo, resultado de la amenaza por erosión hídrica y vulnerabilidad de la estructura el suelo, todo ello para identificar y detectar la existencia de zonas de alto riesgo al fenómeno de la erosión hídrica.</p> |
| Preguntas secundarias | Objetivos particulares | Hipótesis secundarias |
| <p>¿Qué es el fenómeno de la erosión de suelo?</p> <p>¿Qué es la erosión hídrica?</p> <p>¿Cómo se calcula la erosión hídrica?</p> <p>¿Qué factores toma en cuenta la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE)?</p> <p>¿Cómo influye la lluvia en el fenómeno de la erosión hídrica?</p> <p>¿Cómo influye la edafología en el fenómeno de la erosión hídrica?</p> <p>¿Cómo influye la pendiente en el fenómeno de la erosión hídrica?</p> <p>¿Cómo influye la cobertura vegetal y el uso de suelo en el fenómeno de la erosión hídrica?</p> <p>¿Qué es un Sistema de Información Geográfica (SIG)?</p> <p>¿Qué es el álgebra de mapas?</p> | <p>Describir el fenómeno de la erosión de suelo.</p> <p>Definir el fenómeno de la erosión hídrica.</p> <p>Explicar cómo se calcula la erosión hídrica.</p> <p>Explicar qué factores toma en cuenta la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE).</p> <p>Describir cómo influye la lluvia en el fenómeno de la erosión hídrica.</p> <p>Describir cómo influye la edafología en el fenómeno de la erosión hídrica.</p> <p>Describir cómo influye la pendiente en el fenómeno de la erosión hídrica.</p> <p>Describir cómo influye la cobertura vegetal y el uso de suelo en el fenómeno de la erosión hídrica.</p> <p>Definir qué es un Sistema de Información Geográfica (SIG).</p> | <p>El riesgo por erosión hídrica dependerá de distintos factores como, sus características fisiográficas y climatológicas climatológicos. Estas variables deben estar asociadas a los distintos niveles de riesgo que se puedan presentar en una cuenca.</p> <p>Al determinar un mapa de riesgo resultado de la superposición de los mapas de peligro por erosión hídrica y vulnerabilidad física del suelo, se podrá visualizar y analizar el nivel de riesgo que se encuentra en la zona.</p> |

| | | |
|---|--|--|
| <p>¿Qué es la vulnerabilidad?</p> <p>¿Qué es la amenaza ó peligro?</p> <p>¿Qué es el riesgo?</p> <p>¿Cuáles son los factores de la ecuación de USLE en la subcuena RH18Fa – Río Mixteco?</p> <p>¿Cuál es la amenaza por erosión hídrica potencial en la subcuena RH18Fa – Río Mixteco?</p> <p>¿Cuáles son las vulnerabilidades físicas del suelo en la subcuena RH18Fa – Río Mixteco?</p> <p>¿Cuál es el riesgo por erosión hídrica en subcuena RH18Fa – Río Mixteco?</p> | <p>Explicar qué es el álgebra de mapas.</p> <p>Definir el concepto de vulnerabilidad.</p> <p>Definir el concepto de amenaza ó peligro.</p> <p>Definir el concepto de riesgo.</p> <p>Definir los factores de la ecuación de USLE en la subcuena RH18Fa – Río Mixteco.</p> <p>Determinar la amenaza por erosión hídrica, potencial, la vulnerabilidad física del suelo y el riego por erosión hídrica en la subcuena RH18Fa – Río Mixteco.</p> | |
|---|--|--|

2 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

2.1 Introducción.

México se encuentra entre el Golfo de México y el océano pacifico y en el periodo de Julio a octubre se presentan diversos fenómenos hidrometeorológicos, como: tormentas tropicales, ciclones y huracanes de distintas categorías.

Según el documento Estadísticas del Agua en México¹, en el país contamos con los siguientes recursos hídricos:

653 Acuíferos de los cuales 105 en condición de sobre explotación, 32 con presencia de suelos salinos, 18 con intrusión salina, 731 cuencas superficiales, 8 Cuencas Transfronterizas y 51 ríos Principales.

Debido a los vastos recursos con los que se cuenta es necesario que se administren los recursos de la mejor manera. Para esto dentro de la carrera de ingeniería civil, el área de hidráulica se encarga de estudiar fenómenos hidráulicos para el diseño de estructuras que ayuden a controlar parte de los recursos hídricos de una zona. Para poder hacer esto es necesario poder comprender como se lleva a cabo dicho fenómeno, como es el caso del ciclo hidrológico, las lluvias, los escurrimientos, las infiltraciones y múltiples fenómenos.

La hidrología se encarga de estudiar la distribución espacio temporal y las propiedades del agua, de manera global o específica y se dedica a analizar tanto al ciclo hidrológico como a los recursos de agua incluyendo a las ciencias ambientales o geológicas, geografía física, e ingeniería civil y ambiental.

¹ CONAGUA. (2015). Atlas del agua en México 2015. México.

Para poder entender estos fenómenos se requiere de una unidad básica de estudio, que es la cuenca hidrológica, la cual más adelante se definirá desde el punto de vista de la hidrología superficial, además de sus características fisiográficas y parámetros que se utilizan para la clasificación de cuencas; por ejemplo es importante si la corriente principal de una cuenca tiene uno o varios puntos de salida, si la cuenca desemboca en otra cuenca, en un río, en un lago o en el mar, también para poder hacer algunas cuantificaciones a través de distintos criterios como la pendiente. Todo con la finalidad de conocer el comportamiento del agua de lluvia cuando escurre a través de los ríos dentro de la cuenca en estudio.

Una vez comprendido como se obtienen los parámetros y cuál es su función podremos contar con la parte de la hidrología y entrar al fenómeno de la erosión de los suelos, porque cuando combinamos la lluvia con la erosión, se genera el fenómeno de la erosión hídrica el cual es tema principal de la tesis.

2.2 El ciclo del Agua.

El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico, describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido. El sol dirige el ciclo calentando el agua de los océanos, parte de esta agua se evapora en vapor de agua, el hielo y la nieve pueden sublimar directamente en vapor de agua.

En la Figura 2.1 se observan los procesos involucrados (sublimación, evaporación, precipitación, condensación, traspiración y filtración), dentro del ciclo del agua.



Figura 2.1 El Ciclo hidrológico. (SMAPA, 2017)

Las corrientes de aire ascendentes toman el vapor de la atmósfera, junto con el agua de evapotranspiración, que es el agua procedente de las plantas y la evaporación del suelo.

El vapor se eleva en el aire, donde las temperaturas más frías hacen que se condense en nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes alrededor del globo. Las partículas de las nubes chocan, crecen y caen del cielo como precipitación. Algunas caen como precipitaciones de nieve y pueden acumularse como casquetes polares y glaciares, que almacenan el agua congelada durante miles de años. En climas más cálidos, los bloques de nieve a menudo se descongelan y se derriten cuando llega la primavera, y el agua derretida fluye por la tierra. La mayor parte de la precipitación cae sobre los océanos o la tierra, donde, debido a la gravedad, fluye sobre la superficie. Una parte de dicha agua entra en los ríos a través de valles en el paisaje, y la corriente mueve el agua hacia los océanos. El agua filtrada pasa a las aguas subterráneas, que se acumulan y son almacenadas como agua dulce en lagos. No toda el agua fluye por los ríos. La mayor parte de ella empapa la tierra como infiltración. Un poco de agua se infiltra profundamente en la tierra y rellena acuíferos (roca sub superficial saturada), que almacenan cantidades enormes de agua dulce durante grandes períodos de tiempo. Algunas infiltraciones permanecen cerca de la superficie de la tierra y pueden emerger, acabando como agua superficial (y oceánica). Algunas aguas subterráneas encuentran grietas en la tierra y emergen. Con el tiempo, el agua sigue fluyendo, para entrar de nuevo en el océano, donde el ciclo se renueva.

2.3 Cuenca hidrológica.

Definición.

Existen diferentes definiciones de cuenca, dependiendo el contexto en el que se encuentre. A continuación, se presentan las definiciones desde el punto de vista hidrológico y desde el punto de vista geográfico.

La fundación Gonzalo Rio Arrone² define la cuenca como el área geográfica por donde transita el agua hacia una corriente principal y luego hacia un punto común de salida, es también el territorio en el que ocurre el ciclo hidrológico. Se considera la cuenca como la unidad básica de estudio para la hidrología. Estas formaciones que la naturaleza ha creado en la superficie de la tierra mediante las fuerzas tectónicas, la fuerza del agua, los tipos de suelos y la vegetación, pueden extenderse desde algunos kilómetros cuadrados hasta cientos o miles.

Aparicio³, precisa la cuenca como un concepto geográfico e hidrológico que se define como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto común de salida.

2.4 Clasificación de las cuencas.

En las cuencas de cualquier país existen situaciones físicas y socioeconómicas con variados grados de complejidad, sobre las cuales actúan factores técnicos, institucionales y políticos también diversos. Para entender su funcionamiento y facilitar su manejo, se las clasifica en función de varios criterios; algunos de los criterios más comúnmente usados se mencionan a continuación:

2.4.1 Por su sistema de corrientes

Aparicio³, menciona que cuando fluye un sistema de corrientes puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna o el embalse de una presa, en cuyo caso se llama cuenca endorreica.

² Arronte, G. R. (31 de Agosto de 2017). Agua.org.mx. Obtenido de <https://agua.org.mx/quienes-somos/>

³ Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa.

Cuando las descargas llegan hasta el mar se le denomina cuenca exorreica. (Figura. 2.2). Normalmente la corriente principal es la que define el nombre de la cuenca.

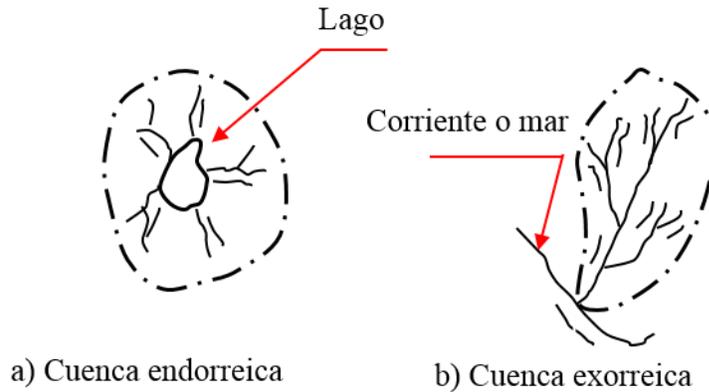


Figura 2.2 Tipos de cuencas (Aparicio Mijares, 1992)

2.4.2 Por su tamaño

Existe un sistema de clasificación de cuencas propuesto por la S.A.R.H.⁴ Consiste en las siguientes divisiones:

➤ Región hidrológica

Es el área natural agrupada a partir de cierta uniformidad de algunos de sus elementos, siendo la red hidrográfica el elemento principal en la subdivisión del paisaje a nivel región. La representación cartográfica se realiza principalmente a las escalas; 1: 1 000 000 y 1: 500 000. (Figura 2.3)

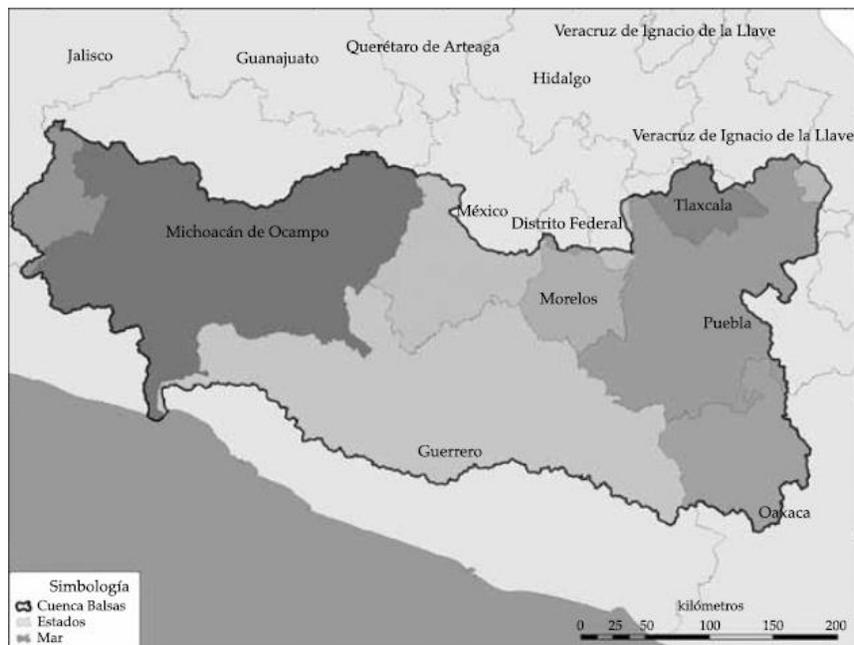


Figura 2.3 Región hidrológica numero 18 Balsas. (D.O.F, 2002)

⁴ Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1987.

➤ **Cuenca**

Se considera como parte integrante de la Región Hidrológica. Se define como un área natural donde el agua de lluvia es captada y desalojada o depositada en un almacenamiento natural; por un sistema de drenaje, definido por medio de líneas divisorias, topográficamente llamadas parteaguas. Las cuencas, como áreas con sistema de drenaje definido, se representarán cartográficamente a una escala de 1: 500 000 y 1: 250 000.

➤ **Subcuenca**

Se considera como parte integrante de una cuenca, se define como el área cuyos escurrimientos superficiales son captados y conducidos por un afluente o arroyo secundario, que según su posición dentro de la cuenca tiene regímenes hídricos determinados. Su representación cartográfica se recomienda a una escala de 1: 250 000 y 1: 100 000.

➤ **Subcuenca tributaria**

Se considera como parte de una subcuenca, se define como el área de aporte del escurrimiento superficial hacia una sección de un afluente. La representación cartográfica representativa es 1: 100 000 y 1: 50 000.

➤ **Subcuenca específica**

Éstas se obtienen a partir de las subcuencas tributarias considerando superficies mayores a 6 000 ha y menores de 10 000 ha. La representación cartográfica varía de 1: 50 000 a 1: 10 000 de acuerdo a las características específicas de la misma subcuenca específica y a los programas a desarrollar en ella. (Figura 2.4)

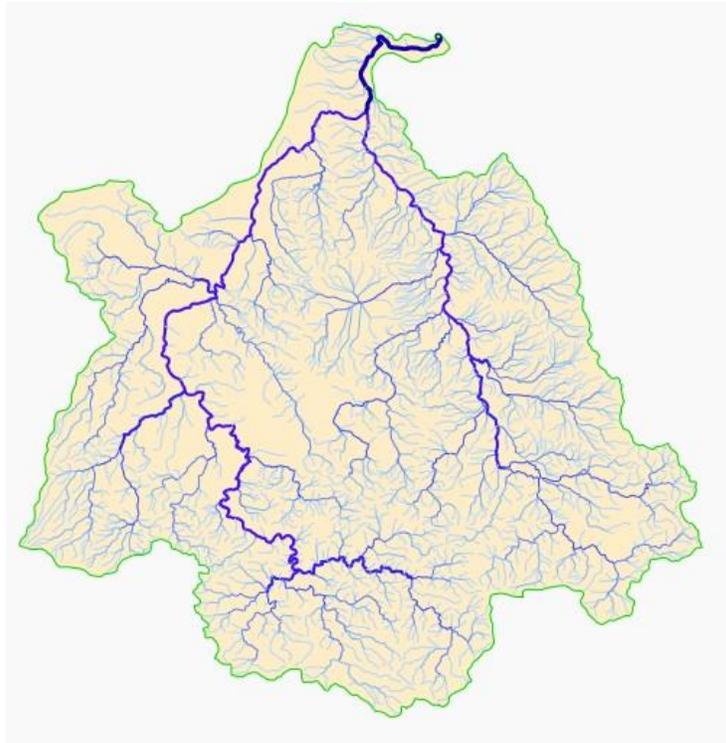


Figura 2.4 Subcuenca R. Mojarras. (SIATL, 2017)

➤ Micro Cuenca

Constituyen la unidad hidrográfica básica de operación, forman parte y se obtienen a partir de la subcuenca específica, considerando superficies menores de 6 000 ha. La escala representativa es de 1: 20 000 y 1: 10 000

Actualmente la CONAGUA⁵, clasifica a las cuencas con un concepto conocido como regiones hidrológicas administrativas. Las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos. Los límites de las regiones respetan la división política municipal, para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos

2.5 Características fisiográficas de una cuenca hidrológica.

El ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Dichas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc.

A continuación, se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-escurrimiento.

2.5.1 Área de la cuenca

El área de una cuenca (A) es el área plana en proyección horizontal, encerrada por el parteaguas. Usualmente es determinada con planímetro y se reporta en kilómetros cuadrados, excepto para cuencas pequeñas las cuales se expresan en hectáreas. (Figura 2.5)

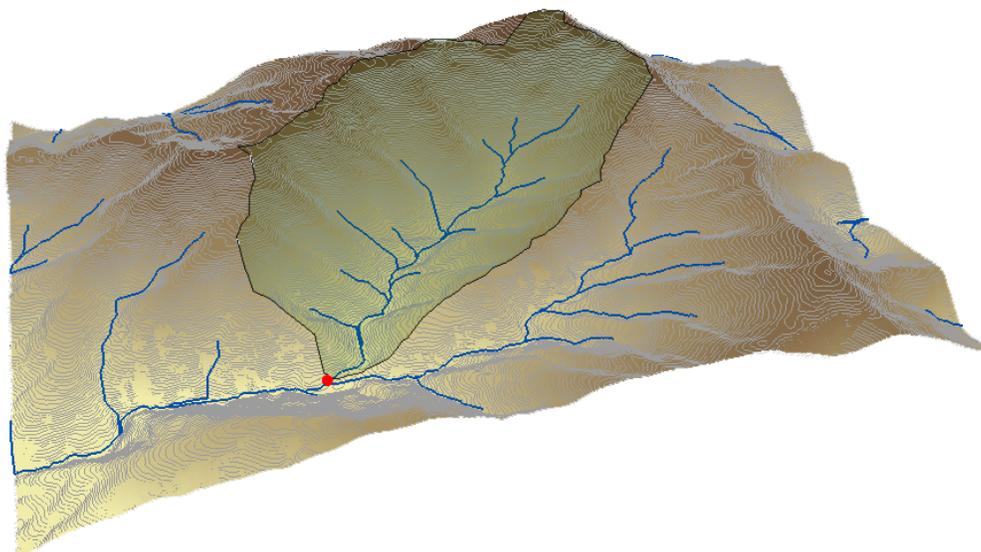


Figura 2.5 Delimitación del área de una cuenca. (Orellana, 2017)

⁵ Comisión Nacional del Agua, 2006.

Las investigaciones hidrológicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia significativa entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control. En cambio, para grandes cuencas el efecto del almacenamiento en el cauce llega a ser pronunciado y habrá que darle más atención a la hidrología de la corriente Principal.⁶

2.5.2 Centroide

El centroide, también conocido en física como centro de gravedad, nos ayuda a encontrar el punto en el que se concentran las fuerzas que actúan sobre una superficie, es decir, se refiere al punto que define el centro geométrico del área.⁷

Para calcular el centroide se podrán utilizar las siguientes expresiones:

$$c_x = \frac{\int x dA}{A}, \quad c_y = \frac{\int y dA}{A}, \quad A = \int f(x) dx \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$\int x dA$, momento total sobre el eje “x”

$\int y dA$, momento total sobre el eje “y”

A, superficie total

c_x , centroide en “x”

c_y , centroide en “y”

Las cuencas hidrológicas comúnmente representan superficies complejas que dificultan el cálculo del centroide por lo que se sugiere dividirla en varias secciones para después combinarlas mediante las expresiones:

$$c_x = \frac{\sum_{i=1}^n A_i c_{x_i}}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad c_y = \frac{\sum_{i=1}^n A_i c_{y_i}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$\sum A_i c_{x_i}$, momento total sobre el eje “x”

$\sum A_i c_{y_i}$, momento total sobre el eje “y”

$\sum A_i$, superficie total

⁶ Aranda, D. C. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí: Universitaria Potosina.

⁷ Sandoval, L. (16 de Enero de 2016). Cuadernillo de apuntes de Calculo Integral. Obtenido de <http://es.slideshare.net/abrahamaj752/calculo-de-centroides>

c_x , centroide en “x”

c_y , centroide en “y”

2.5.3 Parteaguas.

El parteaguas se define como una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas. Puede ser medido a través de un hilo o alambre con una escala establecida, con un curvómetro ó bien con un software digitalizando previamente el parteaguas como por ejemplo un sistema de información geográfica (SIG).

2.5.4 Corrientes tributarias

La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma solamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman cuencas tributarias o subcuencas. (Figura 2.6)

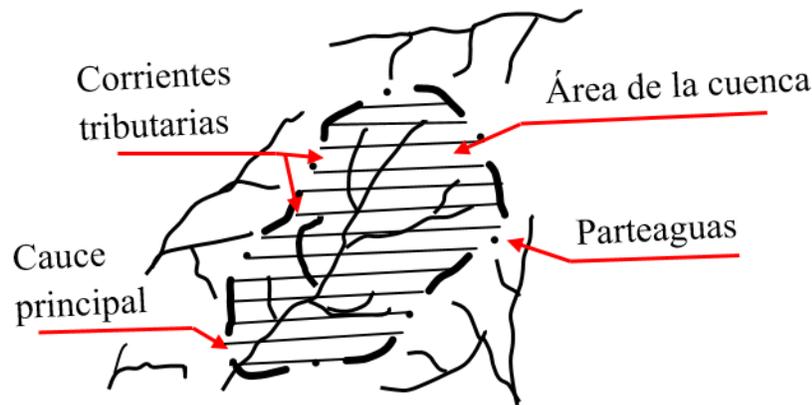


Figura 2.6 Características de una cuenca. (Aparicio Mijares, 1992)

Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación. Por ello, se han propuesto un cierto número de Parámetros de dicho grado de bifurcación, algunos de los cuales son los siguientes:

2.5.5 Numero de orden.

El número de orden se determina con respecto a la distribución de las corrientes tributarias. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene sólo tributarios de primer orden, etc. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc., pero, por ejemplo, una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3. Se conoce como método del número de Strahler o número de Horton-Strahler. (Figura 2.7)

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Dado que esta pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media; para ello existen varios métodos, de los cuales se mencionan tres:

1. Método de la pendiente geométrica.

La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente, dividido entre su longitud medida en planta. (Figura 2.8)

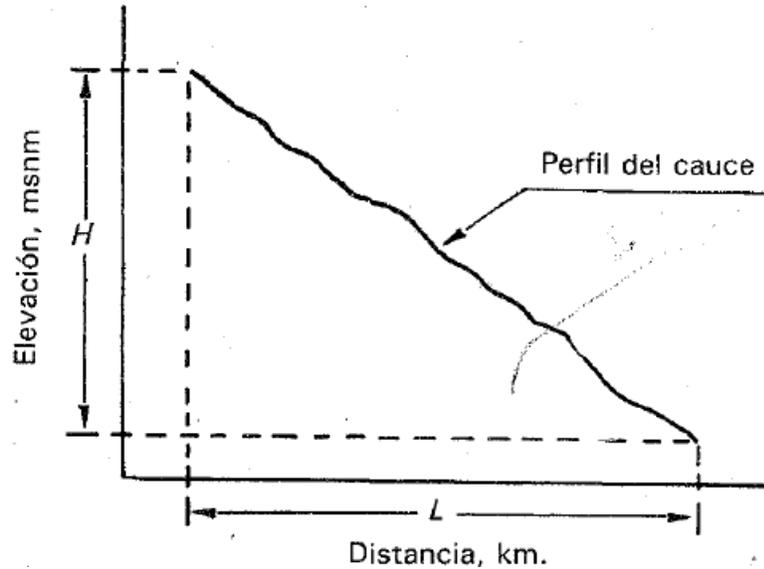


Figura 2.8 Método de la pendiente geométrica. (Aparicio Mijares, 1992)

2. Método de la pendiente compensada.

La pendiente media es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas abajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y abajo de dicha línea. (Figura 2.9)

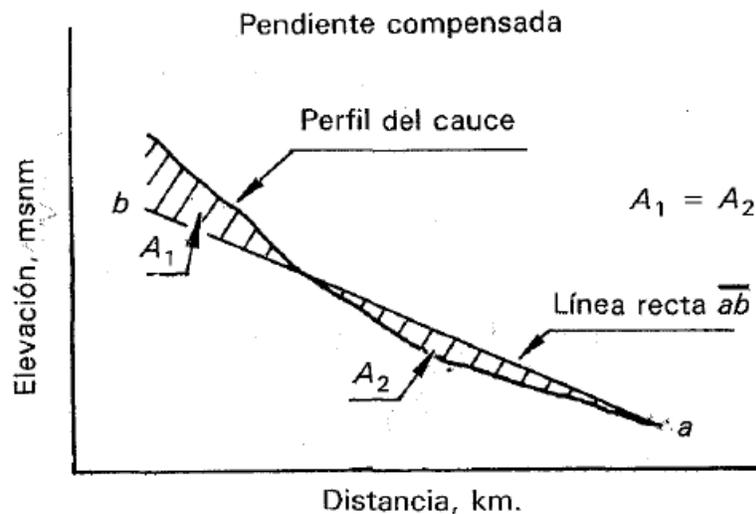


Figura 2.9 Método de la pendiente compensada. (Aparicio Mijares, 1992)

3. Método de Taylor y Schwarz.

Taylor y Schwarz⁹ proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión. (Figura 2.10)

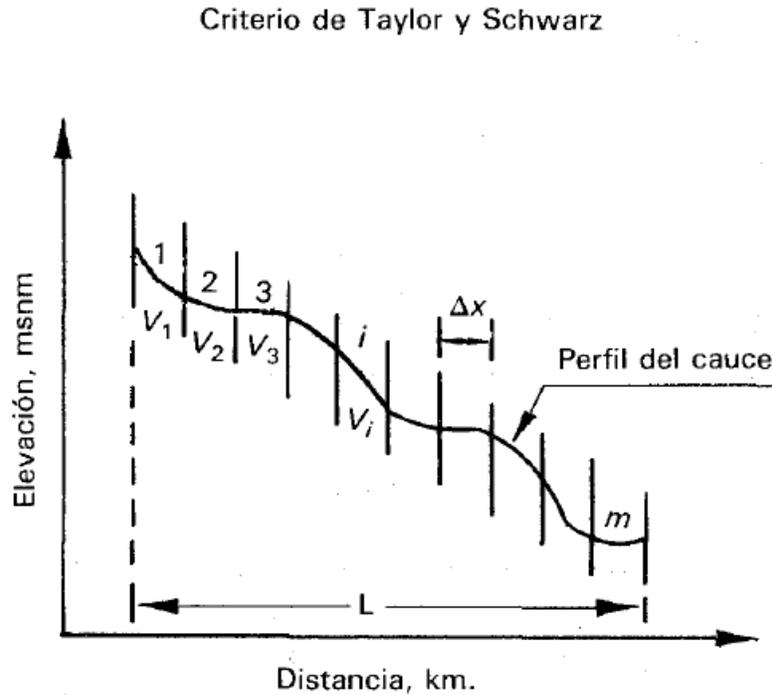


Figura 2.10 Método de Taylor Schwarz. (Aparicio Mijares, 1992)

La velocidad de recorrido del agua en el tramo i puede calcularse como:

$$V_i = k\sqrt{S_i} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde k es un factor que depende de la rugosidad y la forma de la sección transversal y S_i es la pendiente del tramo i . Además, por definición:

$$V_i = \frac{\Delta x}{t_i} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde Δx es la longitud del tramo i (véase Figura 2.10) y t_i es el tiempo de recorrido en ese tramo. De las ecuaciones 2.3 y 2.4 se obtiene:

$$t_i = \frac{\Delta x}{k\sqrt{S_i}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Por otra parte, la velocidad media de recorrido en todo el cauce dividido en m tramos es:

⁹ Taylor, A. B. y Schwarz, H. E. Unit-hydrograph Lag and Peak Flow Related to Drainage Basin Characteristics, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 33, pp. 235-246, abril de 1952.

$$V = \frac{L}{T} = k\sqrt{S} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde L es la longitud total del cauce, T es el tiempo total de recorrido y S es la pendiente media buscada, El tiempo T será naturalmente:

$$T = \sum_{i=1}^m t_i = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta_x}{k\sqrt{S_i}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Y la longitud L :

$$L = \sum_{i=1}^m \Delta_x = m\Delta_x \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Finalmente, usando las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8 y despejando S se obtiene:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Mediante un razonamiento semejante se puede obtener la siguiente fórmula para el caso en que las longitudes de los tramos no sean iguales:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde l_i es la longitud del tramo i .

2.5.8 Clasificación de corrientes.¹⁰

Las corrientes se clasifican de varias maneras, pero las más interesantes en la ingeniería hidrológica son tal vez las siguientes:

Por el tiempo en que transportan agua.

Según esta clasificación las corrientes pueden ser perennes, intermitentes o efímeras.

En una corriente perenne el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas. Estas corrientes transportan agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte, por el agua subterránea, es decir, son efluentes. (Figura2.11)

¹⁰ Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa.

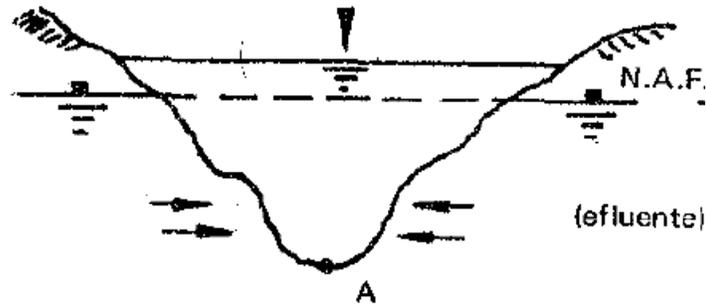


Figura 2.11 Corriente perenne. (Aparicio Mijares, 1992)

Una corriente intermitente transporta agua durante la época de lluvias de cada año, cuando el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto A (Figura 2.12). En época de estiaje el nivel freático queda por abajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presenta alguna tormenta.

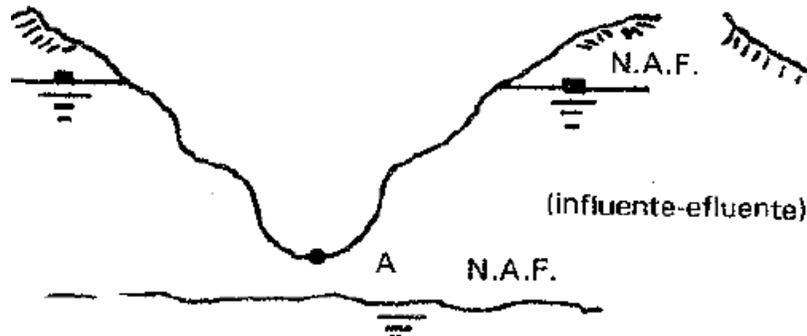


Figura 2.12 Corriente intermitente. (Aparicio Mijares, 1992)

En el caso de las corrientes efímeras o influentes el nivel freático está siempre abajo del punto A (Figura 2.13) y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, y, en este caso, alimentan a los almacenamientos de agua subterránea.

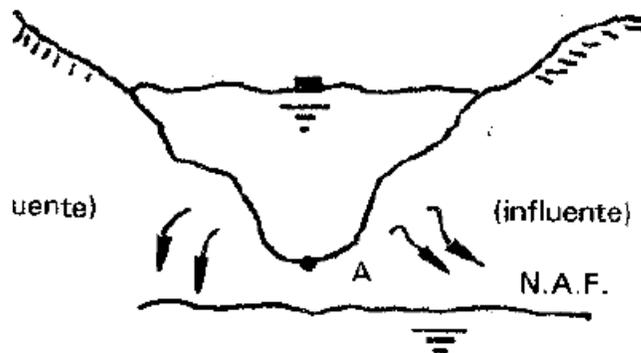


Figura 2.13 Corriente efímera. (Aparicio Mijares, 1992)

Por su posición topográfica o edad geológica.

De acuerdo con esta clasificación los ríos pueden ser de montaña o juveniles, de transición o maduros, o bien de planicie o viejos. (Figura 2.14)

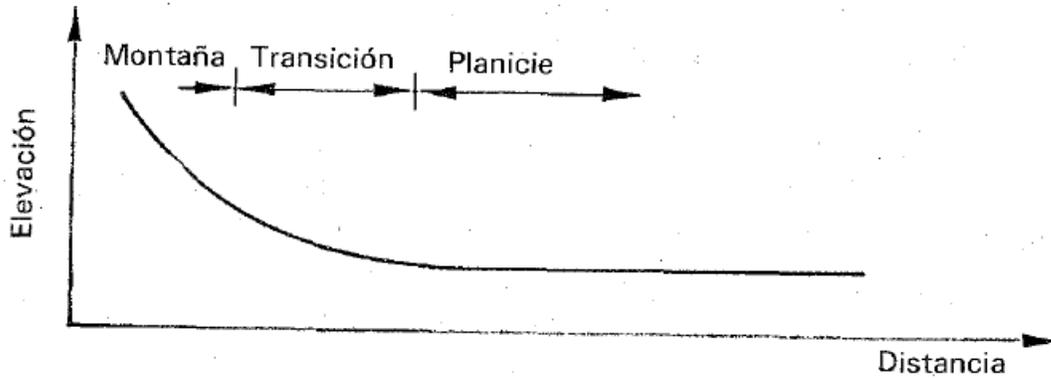


Figura 2.14 Clasificación de corrientes por su posición o edad geológica. (Aparicio Mijares, 1992)

En un mismo cauce se pueden encontrar los tres tipos de ríos. Los ríos de montaña, característicos de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas y, debido a las altas velocidades que alcanza el agua, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos. Los ríos de planicie, por el contrario, presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades del agua y su cauce se forma por arenas y finos. En general, estos ríos se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar. Los ríos de transición están en una situación intermedia entre los dos anteriores: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas y sus cauces están formados básicamente por grava, con algo de cantos rodados y arena.

3 PELIGRO O AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA.

3.1 Introducción

Como ya se mencionó en el capítulo anterior México es un país con bastos recursos hídricos, lo cual es generadora de importantes fenómenos hidrometeorológicos. Esto no solamente genera precipitaciones y escurrimientos en nuestro país. También trae consigo una serie de efectos, causados por el fenómeno de erosión hídrica teniendo como factor detonante las precipitaciones que pueden generar riesgos potenciales.

La primera parte de este capítulo se enfoca a describir el fenómeno de erosión hídrica, así como los principales efectos que provoca este fenómeno y el impacto en diferentes sectores como los de infraestructura, económicos y sociales.

La erosión hídrica se trata de un fenómeno que es relativamente lento, es un fenómeno que evoluciona en la época de lluvia y en función de la cantidad de agua que se precipita. Depende de las condiciones del lugar y lo contenido en él. Con base en esto, se clasificará la erosión y consecuentemente los efectos que se presenten.

La época de lluvias se repite año con año, de diferente manera y con distintas intensidades, por lo tanto, es importante conocer cómo cuantificar lo que se erosiona en un año, lo cual estará en función de la precipitación de dicho año o en su caso como un promedio de las precipitaciones anteriores anuales.

Por lo tanto, la segunda parte del capítulo describirá cuánto material se acumula o se sedimenta cada año y las diferentes metodologías que existen para hacer una estimación de acuerdo a ciertos modelos con sus consideraciones.

Finalmente, conocido el fenómeno y las metodologías que existen para calcular, debemos conocer las herramientas que se utilizan para los modelos que describen la erosión y su cuantificación. Estas herramientas son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramientas muy poderosas y actualmente con diferente software. La importancia de los SIG, entre otras cosas, será conocer sus componentes y las metodologías que utiliza para ocuparlos de manera adecuada.

3.2 Concepto de peligro por erosión hídrica en una cuenca

La erosión en cuencas es causada principalmente por las lluvias y los escurrimientos. Dicha erosión reduce la productividad de las zonas de cultivo y produce pérdida de suelo, el que se considera como un recurso no renovable. Por otro lado, el sedimento producido degrada la calidad del agua, el cual es un buen medio de transporte de contaminantes químicos. Esto sin olvidar que anualmente es necesario dedicar grandes recursos económicos al desazolve de canales, ríos, embalses, estuarios, puertos, etc.¹¹

Erosión de Suelo

Se puede considerar que la pérdida de suelo en una cuenca se presenta en 3 etapas; la primera se refiere a la remoción de las partículas de suelo, posteriormente la segunda etapa es el transporte de dicho suelo y finalmente tenemos una tercera etapa donde el material transportado se deposita (Figura 3.1).

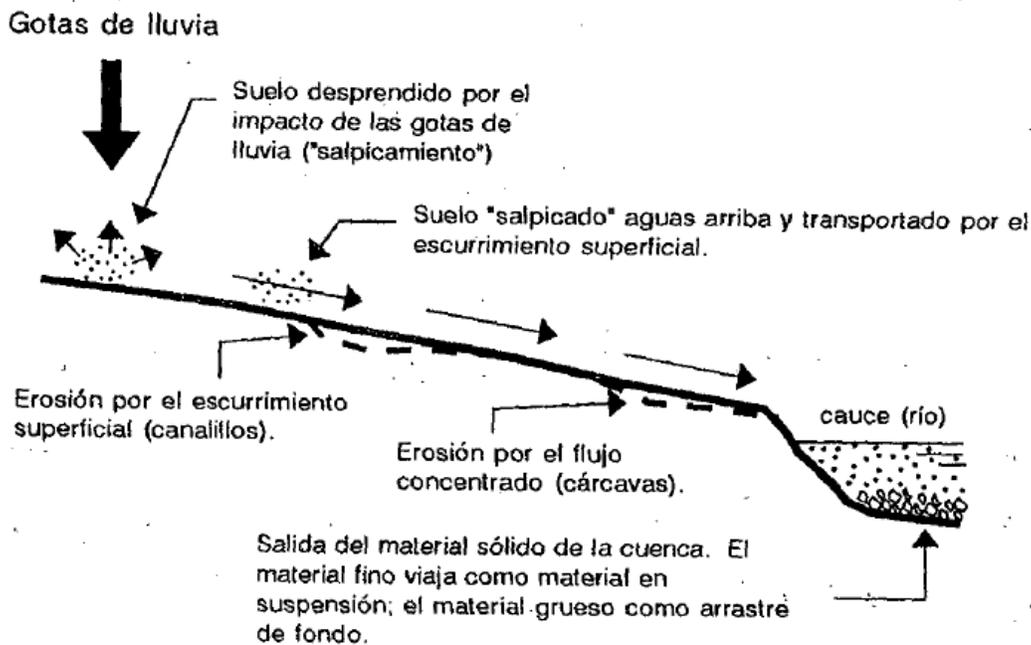


Figura 3.1 Idealización del proceso de erosión en una cuenca. (Sánchez)

¹¹ Sánchez, J. G. Pérdida de suelos en cuencas. Manual de Ingeniería de Ríos. Mexico.

Remoción de Partículas del suelo.

El doctor Jesús Gracia clasifica la erosión de partículas de suelo de acuerdo a la magnitud de dicho fenómeno; es decir, desde que la erosión comienza como una pequeña lamina hasta concentrarse en un canal que seguramente desembocará en algún cauce aportándole sedimentos, esto dependerá de la capacidad erosiva de la corriente y de la resistencia del material del cauce.

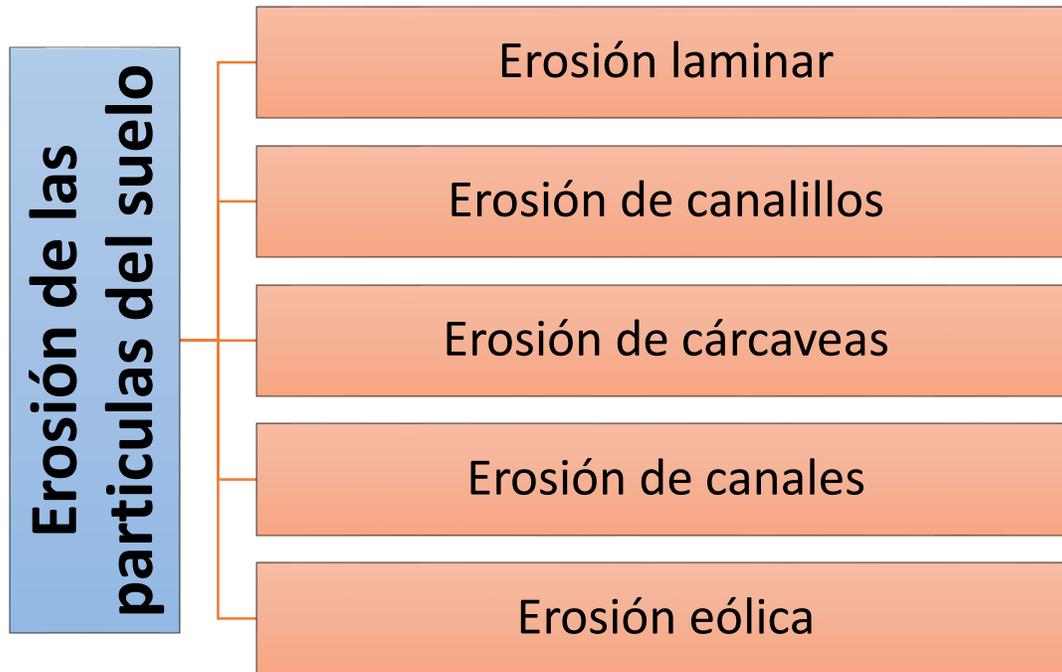


Figura 3.2 Clasificación de la erosión de partículas de suelo. (Elaboración Propia).

La clasificación (Figura 3.2) que sugiere el Dr. Gracia, es la siguiente:¹²

a) Erosión Laminar

Se define como la remoción de una capa de suelo delgada y relativamente uniforme. Se debe al impacto de las gotas de lluvia contra el terreno causando un desprendimiento de partículas del suelo; estas partículas quedan en estado suelto aun cuando se depositen. El desprendimiento de estas partículas es la primera fase de la erosión laminar y está en función directa de la energía cinética de la masa y la velocidad de las gotas de lluvia.

Si la capacidad de infiltración es tal que permita la absorción total del agua de lluvia, las partículas de suelo quedarán depositadas a una distancia que depende de la pendiente del terreno y de la energía cinética de las gotas. Cuando la infiltración es menor que la intensidad de lluvia, el agua se acumula en la superficie del terreno y empieza a escurrir. Esto produce un flujo superficial que arrastrará a las partículas sueltas a esto se le conoce como la segunda fase de la erosión laminar.

Si consideramos que el flujo superficial no puede arrastrar partículas gruesas, sino solo las más finas, cuya cantidad dependerá de las características físico-químicas del suelo y de la magnitud del flujo.

¹² Sánchez, J. G. Pérdida de suelos en cuencas. Manual de Ingeniería de Ríos. Mexico.

De aquí se concluye que la erosión laminar aporta principalmente material fino que será transportado en los ríos como carga de lavado hasta salir de la cuenca o llegar a un embalse.

b) Erosión de Canalillos

Una vez que se inicia el flujo superficial, el escurrimiento puede producir pequeños canalillos de varios milímetros de ancho y profundidad. Estos aportan importantes cantidades de sedimento. Generalmente, estos canalillos cambian de una tormenta a otra, o bien desaparecen con labores agrícolas.

c) Erosión de cárcavas

Cuando los canalillos son de dimensiones tales que no desaparecen con la labranza normal del suelo, se denomina cárcava, estas van desde pequeños agrietamientos de unos cuantos centímetros hasta grandes barrancas que en su salida pueden alcanzar varios metros de ancho y profundidad. La característica distintiva de las cárcavas es su constante crecimiento hacia aguas arriba y su profundización, lo cual hace que se presenten continuos deslizamientos de las paredes de las márgenes y, por consiguiente, una pérdida acelerada de suelo. Este tipo de erosión produce importantes cantidades de material grueso (Figura 3.3).

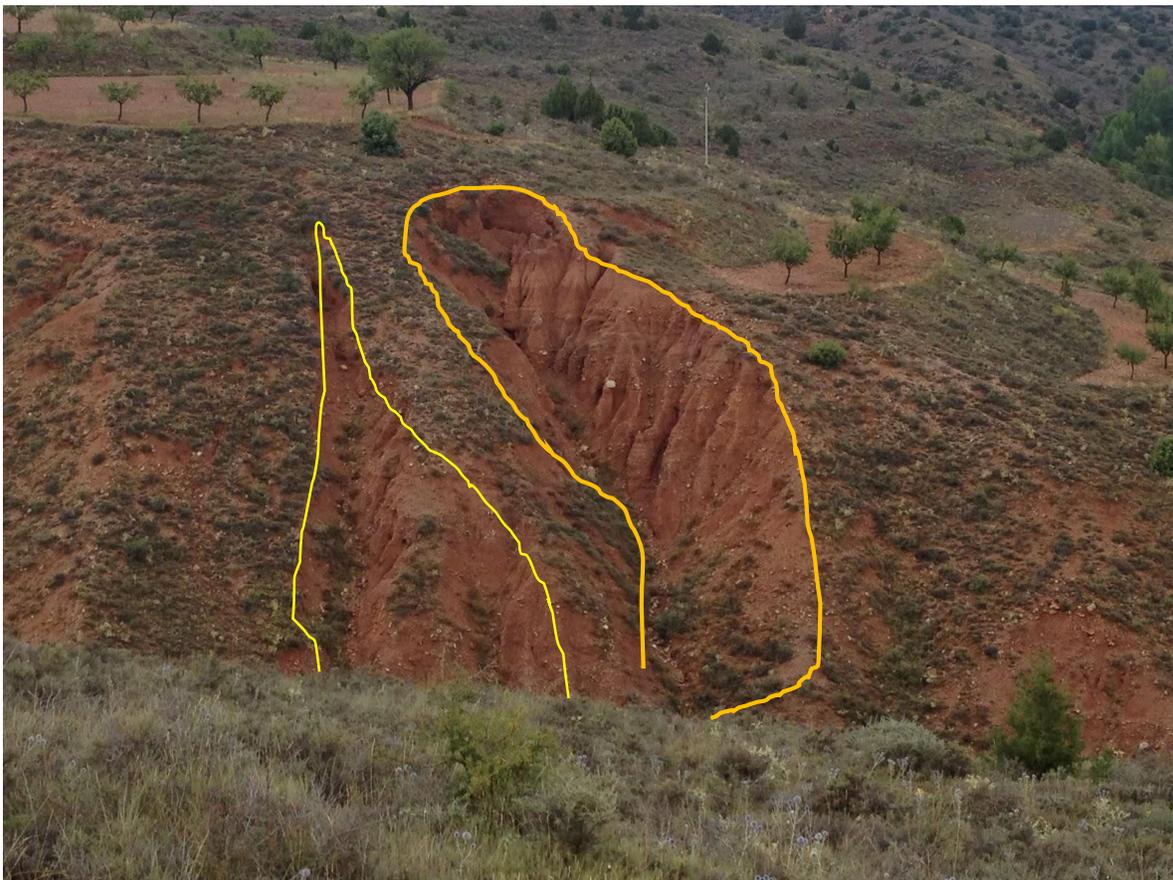


Figura 3.3 Erosión por cárcavas en Gea de Albarracín. (Mongil, 2015)

d) Erosión de canales

Una vez que el flujo se ha concentrado y escurre en cauces o canales bien definidos, los esfuerzos cortantes ejercidos por el agua contra el fondo y las paredes de dichos canales, producen este tipo de erosión. En la erosión de canales, el aporte de sedimento depende de la capacidad erosiva de la corriente y de la resistencia del canal del cauce.

Se menciona la erosión eólica o mejor conocida como erosión por viento puesto que en algunos casos es un factor importante en la pérdida de suelo, sobre todo en zonas semidesérticas, áreas de dunas costeras, regiones montañosas expuestas, zonas semiáridas y regiones húmedas con sequías periódicas.

Transporte del material sólido.

Gracia menciona que existen 2 formas básicas para transportar las partículas de suelo. La primera, es aquella que se presenta cuando las partículas de fondo gruesas que provienen de la erosión de canales, en general esto sucede con el material del fondo ya que este solo recorre pequeñas distancias en cada avenida. En la segunda, se transporta el material fino proveniente tanto de la erosión laminar como de los canales. Este material fino en muchos casos está constituido fundamentalmente por material lavado, que se le conoce como carga y siempre se mueve en suspensión, su concentración está en función del gasto líquido. Este material puede abandonar la cuenca en cada evento lluvia escurrimiento (Figura 3.4).

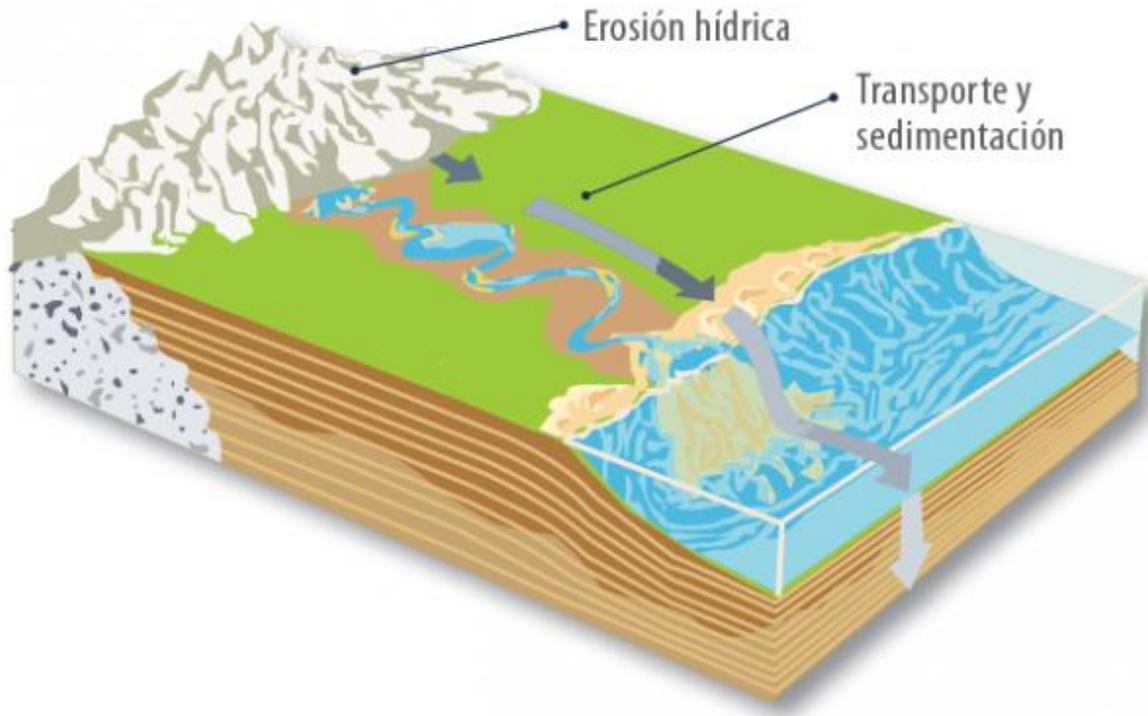


Figura 3.4 Proceso de erosión. (tiposdeerosiones5toc, 2016)

Sedimentación

La sedimentación es el proceso en el cual se depositan los materiales que han sido transportados por efecto de la lluvia. Los sitios de depósitos más comunes son: lagos, embalses de las presas y las desembocaduras de los ríos al mar, mejor conocidos como deltas.

Concepto de Peligro

En este punto se definirá el concepto de peligro de manera general, adecuada a la problemática planteada en la tesis. Esto es:

El peligro se define como un evento raro o extremo en el ambiente natural o humano, que afecta adversamente a la vida humana o sus actividades a tal grado de causar un desastre. Así mismo, se considera como una amenaza dada la probabilidad de ocurrencia de un riesgo frente a la cuál una comunidad es vulnerable.¹³

La erosión hídrica es un problema importante en el mundo, que provoca impactos ambientales y costos económicos muy altos, por los efectos que tiene sobre la producción agrícola, la infraestructura y la calidad del agua que, a su vez, impacta en la población, de igual forma amenaza la seguridad alimentaria; así como, está asociado a la emisión de carbono orgánico del suelo a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO²) y, provocando calentamiento global.

Las consecuencias de la erosión hídrica son:

- a) Degradación de suelos
- b) Azolvamiento de los cuerpos de aguas.
- c) Deslizamiento de laderas

a) Degradación de suelos

Degradación del suelo significa el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo (Figura 3.5) y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva.¹⁴

Según Bertoni y Lombardi Neto (1985) las tierras agrícolas se vuelven gradualmente menos productivas por cuatro razones principales:

1. Degradación de la estructura del suelo
2. Disminución de la materia orgánica
3. Pérdida del suelo
4. Pérdida de nutrientes.

¹³ Wilches-Chaux, 1989

¹⁴ Veiga, L. d. (s.f.). FAO. Obtenido de Organización para la Alimentación y la Agricultura

Estas razones son efectos producidos básicamente por el uso y manejo inadecuado del suelo y por la acción de la erosión acelerada.



Figura 3.5 Pérdida de fertilidad en suelos. (Verde Zona, 2014)

Los cambios en las propiedades del suelo, provocados por la erosión, producen alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva. Estos cambios según Stocking (1984), pueden ser debidos a uno o más factores. El factor o factores que provocan los cambios y así limitan la productividad del suelo son denominados factores limitantes del suelo. Stocking, basado en Buol et al. (1975) y en Sanchez y Cochrane (1980); define los principales factores limitantes del suelo en los sistemas de cultivo en regiones tropicales y los caracteriza cualitativamente en relación a la erosión. De esta manera se puede concluir que la productividad del suelo está relacionada a un gran número de factores limitantes físicos y químicos, que de una manera general componen la fertilidad del suelo. Otros autores (El Swaify y Dangler, 1982; USDA, 1981 y Schertz, 1985) clasifican los factores que causan la reducción de la productividad debido a la erosión del suelo en dos grupos principales:

1. Disminución de los contenidos de materia orgánica y de nutrientes, y
2. Degradación de la estructura del suelo y disminución de la capacidad de retención de agua.

El comportamiento de cada uno de estos factores puede variar principalmente de acuerdo al tipo de suelo. En el caso de suelos tropicales intensamente meteorizados, en los cuales los nutrientes están concentrados en la capa superficial, las pérdidas de nutrientes y de materia orgánica no son estrictamente proporcionales a la profundidad. Schertz (1985) observó disminución en los contenidos de materia orgánica y de fósforo y un aumento de la cantidad de arcilla en la capa superficial del suelo (15 cm) cuando la erosión pasó de leve a severa. Observaron alteraciones significativas de los

contenidos de nutrientes y de aluminio tóxico en los 20 cm superficiales del suelo, después de tres años de erosión diferenciada, con lluvia natural.¹⁵

b) Azolvamiento de los cuerpos de aguas.

El azolvamiento de los recursos hídricos, fluviales lacustres y marítimas, se da principalmente por el fenómeno de la erosión hídrica, directamente asociado a las temporadas de lluvias y que se hace más evidente cuando existen fuertes pendientes y susceptibilidad de los suelos a ser degradados por el impacto que provoca en ellos la gota de lluvia, en las áreas circundantes a las cuencas.

Se puede definir al azolvamiento como: “El fenómeno en el cual se acumulan sedimentos en los lechos de los ríos, presas, depósitos subterráneos, etc. Y que tiene como resultado la transformación del medio ambiente, lo cual acarrea un gran impacto para el ecosistema de esa región”¹⁶

Los sedimentos tienen una gran influencia sobre la factibilidad técnica, económica y sobre la operación de proyectos de recursos hídricos y estructuras hidráulicas. La evaluación se hace difícil porque normalmente existen limitaciones significativas en la información disponible. De hecho, los sedimentos influyen sobre los embalses en varias formas (Figura 3.6).

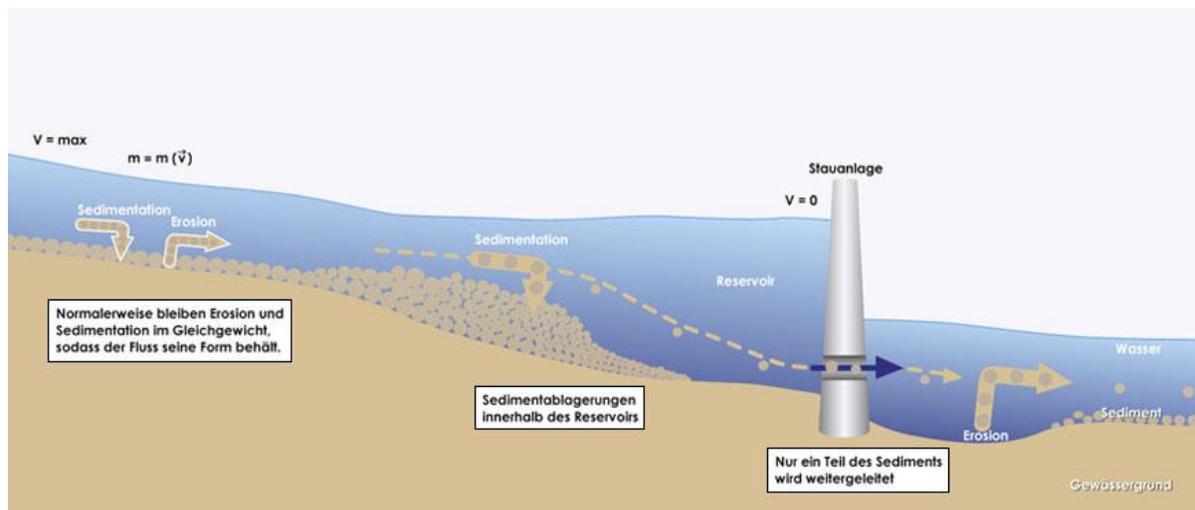


Figura 3.6 Fenómenos de sedimentación - erosión en un embalse. (Sediments, 2018)

La acumulación de sedimentos en los embalses provoca la disminución de la capacidad útil y obstrucción de tomas, estaciones de bombeo, y descargas de fondo, entre otros. Éste es el aspecto más conocido de la acción de los sedimentos en relación con los embalses, que puede resultar muy significativo desde el punto de vista económico, especialmente cuando la operación del proyecto depende en gran medida de la regulación provista por el embalse.

¹⁵ Veiga, L. d. (s.f.). FAO. Obtenido de Organización para la Alimentación y la Agricultura.

¹⁶ Ávila, Patricia. (2018). Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. México

Para la mitigación del proceso erosivo se realizan aportaciones artificiales de sedimento en lugares determinados. Estas aportaciones resultan muy costosas y solo reducen las consecuencias, sin solucionar la causa del problema.

La operación del embalse se enfrenta a un doble reto: lidiar con una acumulación de sedimentos en el embalse y al mismo tiempo con una erosión del río aguas abajo.

Las soluciones tradicionales para recuperación de la capacidad útil son: lavado de embalse, campañas de dragado o excavación. Son medidas temporales ya que difícilmente se logra restablecer el equilibrio natural. Estas medidas convencionales pueden exigir, una interrupción en la generación de energía o el vaciado del embalse, generando pérdidas económicas. Además, la transferencia instantánea de grandes cantidades de sedimentos a través del desagüe de fondo o la extracción de sedimentos fuera del ecosistema acuático suelen ocasionar graves impactos ecológicos.

c) Deslizamiento de laderas

El Centro nacional de prevención de desastres (CENAPRED) define la inestabilidad de una ladera como el movimiento, pendiente abajo, de una porción de los materiales (suelo o roca) que componen la superficie inclinada de una montaña, de una depresión, del flanco de una barranca, etc., a lo largo de una superficie de falla o de deslizamiento (Figura 3.7).

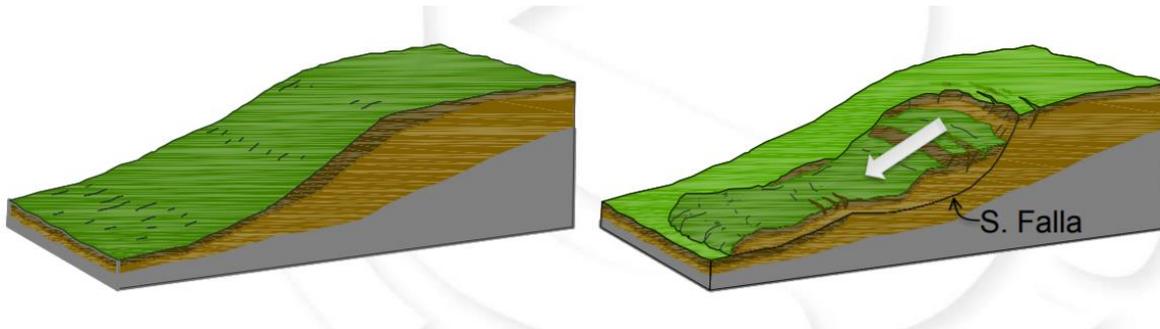


Figura 3.7 Deslizamiento de una ladera. (CENAPRED, 2016)

Ocurren cuando se rompe o pierde el equilibrio de los materiales que componen una ladera y se mueven por acción de la gravedad. La mayoría ocurre en suelos y rocas alteradas suaves y son disparados por diversos factores.

La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo por distintos mecanismos. Estos mecanismos sirven para poder clasificar según la forma en que los materiales son transportados. De tal modo que se agrupan en 3 categorías principales: caídos o derrumbes, flujos y deslizamientos (Figura 3.8). En ocasiones puede haber la combinación de estas.

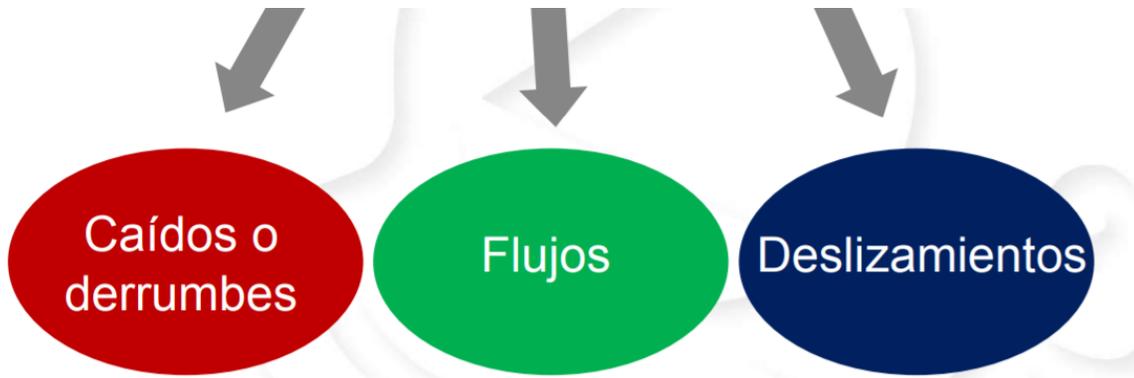


Figura 3.8 Clasificación de según la forma en que se transportan los materiales. (CENAPRED, 2016)

c.1) Caídos o derrumbes

Los caídos o derrumbes el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) los define como movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de roca que se originan en pendientes abruptas y acantilados, por lo que el movimiento es prácticamente en caída libre, rodando y rebotando (Figura 3.9).



Figura 3.9 Caído carretera Chilapa-Hueycantenango, Guerrero. (CENAPRED, 2016)

c.2) Flujos

En el caso de los flujos el CENAPRED los define como movimientos de suelos y/o fragmentos de roca ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla.

Los flujos tienen principalmente 2 variantes, pueden ser muy lentos o muy rápidos, así como con mucha o escasa presencia de agua, es decir muy secos o húmedos. De acuerdo a estas variantes se tiene la siguiente clasificación.

- Flujos de Lodo
- Flujos o avalancha de suelos y rocas
- Lahares

Los flujos de lodo (Figura 3.10) se caracterizan por tener una masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo, de una manera muy rápida, por lo regular su composición es en más del 50% de granos de arena, limo y partículas arcillosas. Respectivamente los flujos o avalanchas de suelos y rocas se identifican por ser movimientos rápidos y se combinan partículas sueltas, fragmentos de roca y vegetación con aire y agua, formando una masa viscosa. Estos movimientos también son conocidos como flujos de escombros. Finalmente los lahares se definen como un flujo de suelos o detritos que se originan en el talud de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, por rotura de presas o desbordamiento de agua represada y/o por la ocurrencia de sismos.



Figura 3.10 Carretera obstruida a causa de un flujo de lodos. (Laura Molina, 2017)

c.3) Deslizamientos

Un deslizamiento está definido por el CENAPRED como el movimiento de una masa de materiales térreos pendiente abajo, delimitada por una o varias superficies, planas o cóncavas, sobre las que se desliza el material inestable y se definen de acuerdo a la forma de la superficie de deslizamiento en rotacionales y traslacionales.

Los deslizamientos en los que la superficie de falla resulta cóncava, es decir, hacia arriba en forma de cuchara, definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelo y/o fragmentos de roca. Por lo general este tipo de movimientos se presentan en los suelos que son arcillosos blandos, aunque también se pueden llegar a presentar en algunas formaciones rocosas blandas (Figura 3.11).



Figura 3.11 Partes que componen un deslizamiento rotacional. (CENAPRED, 2016)

Existe otro tipo de deslizamiento en los que la masa de suelo y fragmentos de roca se desplaza hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie principal más o menos plana, con muy poco o prácticamente nada de movimiento de rotación o volteo. Por lo general este tipo de deslizamientos se presentan en suelos granulares, o bien, están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de cambios de estado de meteorización en las rocas (Figura 3.12).



Figura 3.12 Deslizamiento Traslacional. (Patricia Prieto, 2016)

Los procesos que originan la inestabilidad de las laderas están determinados por dos tipos de factores; externos e internos. Los factores externos incrementan los esfuerzos o acciones que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de las fuerzas motoras o actuantes, mientras que los factores internos disminuyen la concentración de las fuerzas resistentes. La ladera se encontrará en condiciones estables mientras las fuerzas resistentes sean mayores a las fuerzas motoras o actuantes.



Figura 3.13 Deslizamiento que bloqueo el cauce del rio Grijalva. (2007)

Las fuerzas motoras se originan por el peso propio del material que compone el cuerpo de una ladera y por el peso de cualquier tipo de estructura o construcción que exista sobre la misma, un ejemplo común de esto son las casas y las carreteras.

Ahora en el caso de los factores externos, existen varios tipos, entre los principales tenemos procesos que se relacionan con la alteración de forma de la ladera como por ejemplo el efecto que tienen sobre las laderas fenómenos como la erosión, la socavación o la excavación de zanjas artificiales. Existen otro tipo de alteraciones como la carga y descarga de la ladera, el efecto de los sismos, las vibraciones por explosiones y maquinaria pesada, así como los cambios de régimen hidrológico como consecuencia de la forma en que varían la intensidad y la duración de las precipitaciones. Un ejemplo de esto es el deslizamiento que bloqueo el cauce del río Grijalva después de tres días de intensas lluvias (Figura 3.13). Finalmente, como uno de los factores externos más importantes o incluso más detonantes, es la actividad humana, puesto que prácticamente todas sus actividades alteran el equilibrio natural en todo el medio ambiente, generando consecuencias a corto, mediano y largo plazo. También hay que tener en cuenta que la mayoría de estas alteraciones en el medio no tienen una recuperación total, o el querer restaurar el equilibrio natural toma mucho más tiempo, que el que tomó alterarlo.

3.3 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

Introducción

Para resolver un gran número de problemas de cultivos, suelos y manejo de cuencas se requiere hacer estimaciones de la erosión en campos de cultivo o cuencas. Para responder a esta necesidad, se han desarrollado numerosos modelos para predecir la erosión. Algunos de estos modelos son simples ecuaciones que calculan el promedio anual de erosión en la desembocadura de una cuenca. Otros son modelos complejos que simulan la erosión diaria en lugar de la anual, y pueden aplicarse continuamente para calcular la erosión promedio en el largo plazo y las probabilidades de sus distribuciones. Las metodologías más elaboradas permiten subdivisiones de cuencas y encauzamiento de aguas, sedimento, y contaminantes tales como nitrógeno, fósforo y plaguicidas. Finalmente, el suelo puede ser removido por el viento tanto como por el agua, y se han desarrollado modelos para cuantificar los efectos del clima, suelo y manejo sobre la erosión eólica.¹⁷

Los principales factores que influyen en la pérdida de suelo, son los siguientes.

- a) **Hidrología.** La lluvia y el escurrimiento proporcionan la energía básica en el proceso de erosión. Mientras la primera rompe la estructura del suelo, el segundo erosiona y acarrea al material sólido.
- b) **Topografía.** La erosión es función directa de las pendientes y las longitudes recorridas por el escurrimiento superficial. Es decir, a mayores pendientes y longitudes recorridas mayor erosión y viceversa.
- c) **Erosionabilidad del suelo.** Por su naturaleza, algunos suelos son más susceptibles a disgregarse y a ser transportados. La granulometría y la presencia de materia orgánica influyen en la resistencia a la disgregación y el transporte. Las primeras partículas que se mueven son las más finas y luego conforme aumenta la energía del escurrimiento, se forma los canalillos y las cárcavas, se mueven las partículas más grandes.
- d) **Cobertura vegetal.** Este es uno de los factores más importantes en la erosión de los suelos pues condiciona de manera determinante el aporte de sedimento. Además de la vegetación activa que cubre el suelo, se incluyen los residuos de plantas muertas o coberturas de otro tipo empleadas para protección.
- e) **Prácticas de cultivos y de conservación de suelo.** Cuando se ha cambiado la vegetación natural de un suelo y este se usa para labores agrícolas, la erosión del suelo se acelera. Sin embargo, en la medida en que se realicen adecuadamente las labores agrícolas (barbecho, rotación de cultivos, siembra en contorno, etc.) y las prácticas de conservación de suelos (terrazas, vías vegetadas, cultivo en fajas, etc.) se disminuye significativamente el aporte de material sólido.

Conviene hacer notar que el hombre puede influir solamente en los últimos dos factores pues los restantes son característicos de cada sitio en particular.

¹⁷ C.A. Jones, R. G. Predicción de la erosión hídrica y eólica del suelo. Obtenido de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Existen casos especiales donde el aporte de sedimento puede aumentar mucho en el corto plazo como, por ejemplo, en la construcción de carreteras, presas y durante el proceso de urbanización.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés) fue desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA SCS por sus siglas en inglés) con la finalidad de estimar la pérdida de suelo anual, así como el valor promedio de un periodo representativo de años, que se genera en un determinado lugar, a partir de las distintas formas de erosión ante determinadas condiciones de clima, suelo, vegetación, y usos de suelo.

A continuación, se describirá la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Ecuación 3.1), con sus correspondientes factores:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

- A, Representa la pérdida anual de suelo en $Ton/ha \cdot año$
- R, Factor de erosividad por precipitación en $N/ha \cdot año$ o $MJ \cdot mm/ha \cdot año$
- K, Factor de erodabilidad del suelo en $Ton \cdot ha/N \cdot ha$ o $Ton \cdot ha/MJ \cdot mm$
- LS, Factor topográfico longitud-pendiente *adimensional*
- C, Factor de vegetación y cultivo *adimensional*
- P, Factor de prácticas de conservación *adimensional*

A continuación, se describirá como es que se calculan cada factor y las consideraciones que se toman en cuenta para la estimación de la erosión del suelo.

Factor de erosividad por precipitación. (R)

Existen varios caminos para la determinación del factor de erosividad. Aunque el más utilizado es el parámetro EI_{30} desarrollado por Smith y Wischmeier. Para una tormenta dada, este parámetro es igual al producto de la energía cinética de las gotas de lluvia y su intensidad máxima en 30 minutos. Los valores de EI de las tormentas pueden ser sumados para obtener valores anuales o estacionales de la erosividad de un patrón de lluvia.

El valor del factor R es un promedio anual, creado para la predicción de la pérdida de suelo y es obtenido por la sumatoria de los valores EI_{30} en el año de las tormentas consideradas erosivas, es decir, las precipitaciones con láminas de precipitación mayor de 12 mm e intensidades mayores de 25 mm/h. Se saca un promedio de los valores de R de 20 a 25 años. Estos valores varían de acuerdo a las condiciones hidrológicas de cada lugar. El doctor Gracia para considerar las precipitaciones con una duración menor a 30 minutos, calcula el I_{30} igual al doble de la precipitación máxima registrada.

Para determinar el factor R; se utiliza la ecuación 3.2.

$$R = \sum_{j=1}^n (E_j \cdot I_{30j}) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

E_j , Energía cinética total de una precipitación j

I_{30j} , Intensidad máxima de la precipitación en 30 min durante un evento j en mm/h

n , Numero de precipitaciones ocurridas en el año

Para poder calcular el EI_{30} se debe calcular la energía cinética unitaria para cada segmento de lluvia con intensidad constante.

Para precipitaciones con una intensidad mayor a 76 mm/h se considera un valor de energía cinética unitaria de 0.283 y cuando es mayor o igual a 76 mm/h se toma en cuenta la ecuación 3.3.

$$e = \begin{cases} 0.283 & \text{si } I > 76 \text{ mm/h} \\ 0.119 + 0.0873 \cdot \log_{10} I & \text{si } I \leq 76 \text{ mm/h} \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

e , Energía cinética unitaria de una precipitación en $MJ/ha/mm$

I , Intensidad de precipitación en mm/h

La energía unitaria tiene un máximo de 0.283 debido a que a intensidades mayores de 76 mm/h el diámetro de la gota de agua que precipita no incrementa más y la velocidad final es constante.¹⁸

La energía cinética total de un evento j se calcula aplicando la ecuación anterior a segmentos o intervalos de lluvia de intensidad constante y sumando luego los valores de todos los intervalos, es decir, para calcular la energía total de un segmento de lluvia, tenemos la ecuación 3.4:

$$E_s = e \cdot p \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

E_s , Energía cinética del segmento de lluvia en MJ/ha

p , Lamina total de lluvia para el segmento en mm

Para calcular la energía total de la lluvia, tenemos la ecuación 3.5:

$$E = \sum_{k=1}^m (E_s)_k \quad \text{Ecuación 3.5}$$

¹⁸ Barrios, A. (1995) "Erosión y Producción de Sedimentos en Cuencas Hidrográficas" Fac. De Ciencias Forestales - Universidad de los Andes - Mérida, Venezuela.

Donde:

E , Energía cinética total de la lluvia en MJ/ha

m , Número de segmentos en que fue dividida la lluvia.

Ahora tenemos que identificar la máxima lluvia que cae en un periodo de 30 minutos y poder obtener la máxima intensidad de lluvia es decir el I_{30} . Cuando se presentan lluvias con duraciones menores a 30 minutos se tendrá que tomar el valor del I_{30} como el doble de la precipitación máxima registrada, es decir la ecuación 3.6:

$$I_{30} = 2 \cdot P_{Max} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

I_{30} , Máxima intensidad de la precipitación en 30 min mm/h

P_{Max} , Máxima lluvia caída en un intervalo de tiempo de 30 min mm

Finalmente, se calcula el índice EI de la lluvia. (Ecuación 3.7)

$$EI = (E)(I_{30}) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

El factor R se estima para cada año sumando el índice EI de todos los eventos del año, el procedimiento se repite para todos los años disponibles y se obtiene un valor promedio anual, el cual constituye el llamado R de la USLE.¹⁹

La determinación de este factor es difícil en nuestro país debido a la carencia de información relativa a la intensidad en periodos de tiempo tan cortos. Además de que se necesita tener información disponible de al menos 30 años para poder realizar el promedio correspondiente del factor de erosividad anualmente.

Debido a la escasez de información y la certeza de los datos, existe otra metodología para poder calcular el factor de erosividad al cuadrado R^2 (Figura 3.14) a partir de la Precipitación Media Anual (PMA) por lo que se aplicaron las ecuaciones de erosividad asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana (Figura 3.15) determinadas por Cortés.²⁰

¹⁹Barrios, A. (1995) "Erosión y Producción de Sedimentos en Cuencas Hidrográficas " Fac. De Ciencias Forestales - Universidad de los Andes - Mérida, Venezuela

²⁰ BECERRA, M.A. Erosión de suelos. México, D.F.: Universidad Autónoma de Chapingo, 1997.

| Región | Ecuación | Factor de erosividad al cuadrado (R ²) |
|--------|--------------------------------|--|
| 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 | $1.8959 * P + 0.002983 * P^2$ | 0.92 |
| 5 | $1.4880 * P - 0.000188 * P^2$ | 0.94 |
| 6 | $1.6847 * P + 0.001680 * P^2$ | 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 |

Figura 3.14 Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana (Becerra, 1997).

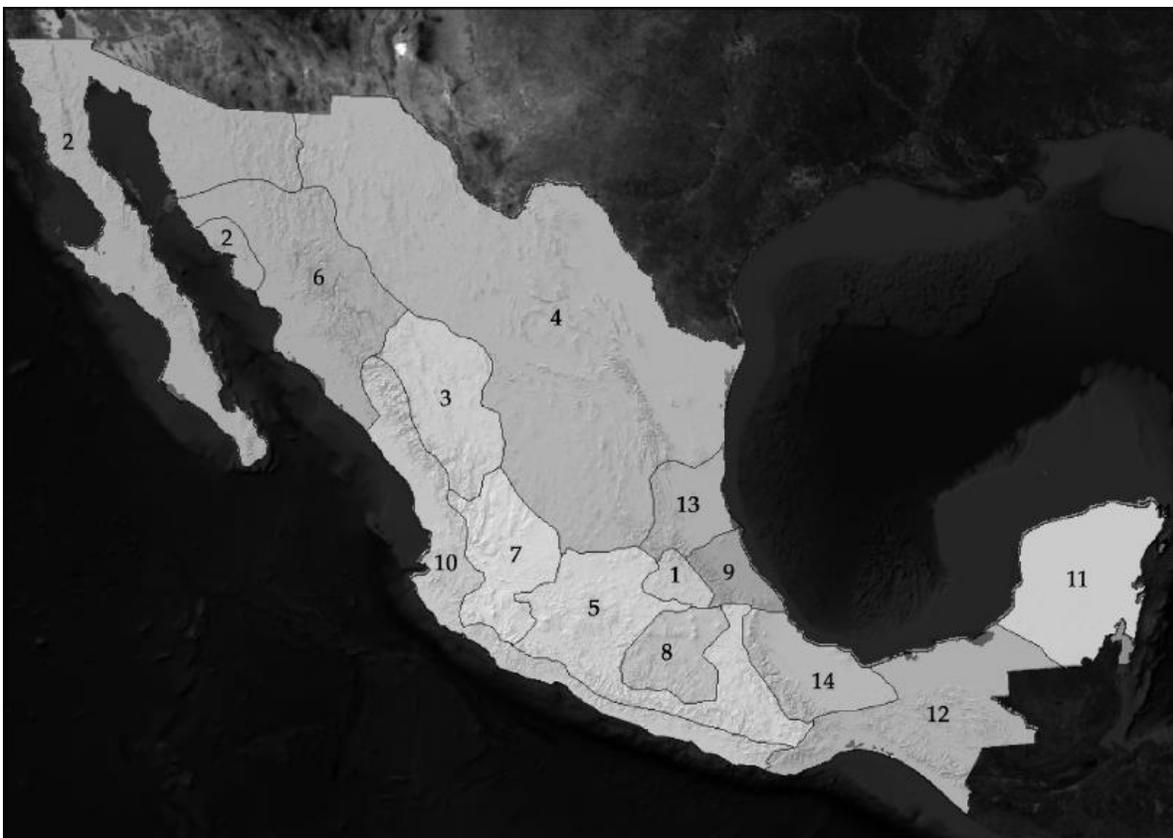


Figura 3.15 Regionalización nacional de factor R (Becerra, 1997).

La estimación del factor consiste en el empleo del arreglo regular de precipitación de Agroasemex con datos diarios de 1979 a 2007 (Agroasemex, 2008), para la estimación de la precipitación media

anual. Dicho arreglo ha sido creado mediante la metodología de interpolación de Cressman. El método se basa en la corrección de un campo preliminar de precipitación modelada que es corregido a partir de los registros de precipitación (Cressman, 1959) presentes en la base de datos de estaciones climáticas superficiales de México CLimate COMputing project. (CLICOM) y la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). El producto final consiste en un arreglo de datos diarios con resolución espacial de 20 km. A diferencia del método de polígonos de Thiessen, no es necesario seleccionar aquellas estaciones que tienen un registro largo para realizar análisis de variabilidad en el tiempo. Cressman permite aprovechar todos los registros encontrados en un día dado, sin importar la existencia de un registro histórico largo en las estaciones incluidas. Además, sus dimensiones son regulares, por lo cual se espera que el método ofrezca una mejor representación de la variabilidad espacial y temporal del campo de precipitación.

Factor de erodabilidad del suelo. (K)

El factor K representa la erosionabilidad del suelo, es decir, muestra su vulnerabilidad a la acción del agua; es una característica inherente a los suelos, que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como también del manejo que de ellos se haga. (Barrios, 1995).

La erodabilidad representa un valor promedio integral anual de la pérdida de suelo en respuesta a procesos de erosión e hidrológicos, entre los que destaca el desprendimiento y transporte por el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial; la depositación localizada debida a la topografía natural e inducida por las operaciones de labranza, y la infiltración del agua en el perfil del suelo.

Algunos suelos erosionan más rápidamente que otros bajo idénticas condiciones. Los suelos altos en limo o arena muy fina se erosionan más rápidamente. La erosión disminuye a medida que el contenido de partículas de arcilla o arena (excluyendo arena muy fina) incrementan. La materia orgánica del suelo mejora la estructura del suelo y disminuye la erosión, pero agregados grandes pueden aun ser transportados por los escurrimientos de alta velocidad. La permeabilidad del perfil es importante debido a su influencia en los escurrimientos.

El método más completo para estimar K es el Nomograma (Figura 3.16) de Wischmeier y Smith, (1978), el cual requiere datos sobre porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, porcentaje de arena, porcentaje de contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

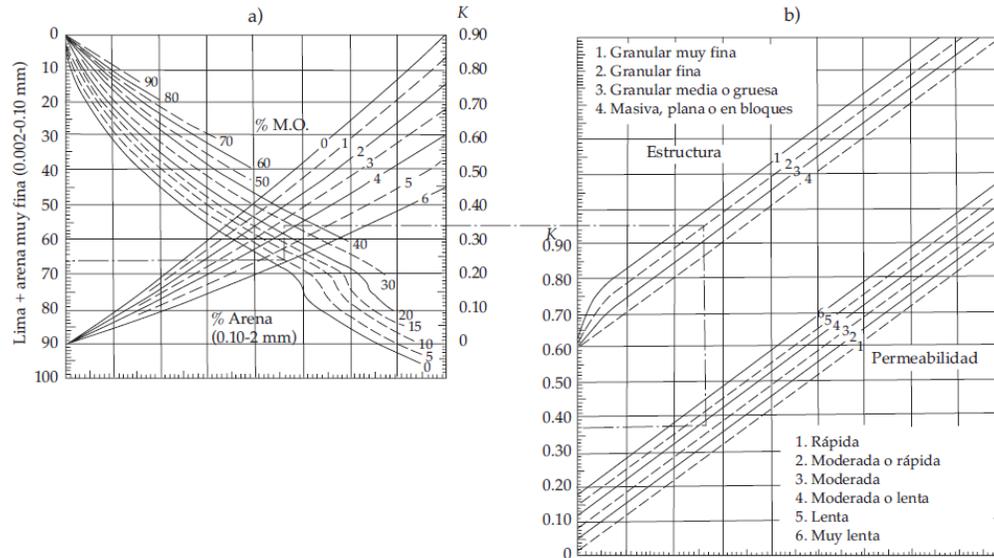


Figura 3.16 Nomograma de Wischmeier y Smith para el cálculo del factor K (Renard, 1997).

El nomograma se basa en la ecuación 3.8e, que fue desarrollada de los datos de campo de las parcelas de erosión que se establecieron en los Estados Unidos.

$$100K = 2.1 \cdot (M^{1.14} / 10,000) \cdot [(12 - a) + 3.25 \cdot (b - 2) + 2.5 \cdot (c - 3)] \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

- M , Limo + arena muy fina %
- a , Materia orgánica %
- b , Clase de estructura
- c , Clase de permeabilidad

Valores de K de suelos gravosos o pedregosos o con un alto contenido de material grueso no erodable se reduce entre 0.05 y 0.15.

Los valores de K no son constantes, en la medida que se avanza la erosión de un determinado suelo, tiende a disminuir su valor, debido a la pérdida de las partículas más erosionables, lo que origina un incremento en la proporción de material no erosionable por lo tanto mayor resistencia a la subsiguiente erosión.

Debido a que no se cuenta con información detallada y completa para el empleo de la metodología tradicional, se aplicó la metodología descrita como la metodología de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (Figura 3.17)

Para la determinación de este factor fue empleada la información edafológica más reciente del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), que contiene información actualizada durante el periodo 2002-2006 (INEGI, 2007). Se emplea la clasificación de suelos del WRB (World Reference Base for Soil Resources), reporte número 84 (FAO, 2006), publicado por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS), del Centro Internacional de Referencia e

Información de Suelos (ISRIC por sus siglas en inglés) y de la FAO, en Roma, Italia, en el año 1999, adaptado por el INEGI, para las condiciones ambientales de México.

| Simbolo | Tex. G | Tex. M | Tex. F | Simbolo | Tex. G | Tex. M | Tex. F | Simbolo | Tex. G | Tex. M | Tex. F |
|------------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| A | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Jd | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Rd | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| Af | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Je | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Rx | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Ag | 0.026 | 0.030 | 0.013 | Jt | 0.053 | 0.079 | 0.026 | S | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Ah | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Jp | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Sg | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Ao | 0.026 | 0.040 | 0.013 | K (h,k,l) | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Sm | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| Ap | 0.053 | 0.079 | 0.026 | L | 0.026 | 0.040 | 0.013 | So | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| B | 0.026 | 0.040 | 0.013 | La | 0.053 | 0.079 | 0.026 | T | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| B(c,d,e,k) | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Lc | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Th | 0.013 | 0.020 | 0.007 |
| Bf | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Lf | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Tm | 0.013 | 0.020 | 0.007 |
| Bg | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Lg | 0.026 | 0.040 | 0.013 | To | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| Bh | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Lk | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Tv | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| Bk | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Lo | 0.026 | 0.040 | 0.013 | U | 0.013 | 0.020 | 0.007 |
| B (v, x) | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Lp | 0.053 | 0.079 | 0.026 | V (c,p) | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| C (h,k,l) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Lv | 0.053 | 0.079 | 0.026 | W | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| D (d,g,e) | 0.053 | 0.079 | 0.026 | M (a,g) | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Wd | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| E | 0.013 | 0.020 | 0.007 | N (d,e,h) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | We | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| F(a,h,p,o) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | O (d,e,x) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Wh | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| G | 0.026 | 0.040 | 0.013 | P | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Wm | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| Gc | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Pf | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Wx | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| G (d,e) | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Pg | 0.053 | 0.079 | 0.026 | X(k,h,l,g) | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| G (h,m) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Ph | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Y(h,k,l,g,t) | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| G (p,x) | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Po | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Z | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Gv | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Pp | 0.053 | 0.079 | 0.026 | Zg | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| H(c,g,h,l) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Q (a,c,f,l) | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Zm | 0.013 | 0.020 | 0.007 |
| I | 0.013 | 0.020 | 0.007 | R | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Zo | 0.026 | 0.040 | 0.013 |
| J | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Re | 0.026 | 0.040 | 0.013 | Zt | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Jc | 0.013 | 0.020 | 0.007 | Rc | 0.013 | 0.020 | 0.007 | | | | |

Fuente: Becerra, 1999.

Leyenda: significado de los símbolos de textura; G = Gruesa, M = Media, F = Fina.

Figura 3.17 Factor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB. (Becerra, 1999)

De acuerdo con la clasificación del tipo de suelo y de su textura superficial (gruesa, media o fina), se le asigna el factor K.

Factor topográfico longitud-pendiente. (LS)

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores: longitud (L) y grado de pendiente (S). La longitud L se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado de que ocurre una sedimentación o bien hasta el punto donde el escurrimiento, una vez concentrado, encuentra un canal de salida bien definido.

En general, el escurrimiento superficial se concentra en longitudes inferiores a 120 m, por lo que en muchas situaciones este valor constituye un umbral límite para los análisis de predicción de la erosión. En algunas ocasiones se usan pendientes hasta de 300 m, pero no se recomienda usar distancias mayores a ésta en USLE. Las longitudes de pendientes estimadas en mapas topográficos son normalmente muy largas, pues dichos mapas no tienen la resolución suficiente para indicar las áreas de flujo concentrado que determinarían las longitudes de pendiente.

Para el cálculo de LS Wischmeier y Smith, (1978), propusieron las ecuaciones 3.9 y 3.12):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

L , Factor de longitud de la pendiente *adimensional*

λ , Longitud de la pendiente en *m*

m , Clase de estructura Coeficiente que depende del grado de pendiente

Para obtener el valor de m (Figura 3.18) se hace a partir de la siguiente tabla y conociendo el grado de pendiente.

| M | Pendiente (θ) |
|-----|------------------------|
| 0.5 | > 5 % |
| 0.4 | 3 – 5 % |
| 0.3 | 1 – 3 % |
| 0.2 | < 1 % |

Figura 3.18 Valores que toman m en función al grado de pendiente. (Wischmeier y Smith, 1978)

Para calcular m se utilizaron las ecuaciones 3.10 y 3.11:

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$\beta = (\text{sen}\theta / 0.0896) / [3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56] \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

θ , Pendiente del terreno

Por otro lado, el factor pendiente (S) se evalúa de acuerdo con la ecuación 3.12:

$$S = \begin{cases} 10.8\text{sen}\theta + 0.03 & \text{si } \theta \leq 9\% \\ 16.8\text{sen}\theta - 0.50 & \text{si } \theta > 9\% \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Otra forma será calculando de forma combinada los factores L y S de la ecuación universal de pérdida de suelo (LS) a partir de la ecuación 3.13.

$$L \cdot S = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m (0.065 + 0.45s + 0.0065s^2) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

El grado de pendiente (s) se obtiene a través de la ecuación 3.14.

$$s = \left(\frac{H_f - H_i}{l} \right) \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde:

- s , Grado de pendiente en %
 H_f , Altura más alta del terreno en m
 H_i , Altura más baja del terreno en m
 l , Longitud media del terreno en m

La expresión original de Wischmeier y Smith, (1978), fue desarrollada experimentalmente con datos de terrenos uniformes, pendientes entre 3 y 18 % y longitudes entre 10 y 100 metros. La aplicación fuera de este rango experimental es de carácter especulativo, tal es el caso de las cuencas hidrográficas en donde las vertientes no son uniformes y frecuentemente tienen 20 %, 30 %, 40 % o más de pendiente. La expresión de McCool et al., (1987), fue realizada teniendo en cuenta lo anterior y por eso es la que se recomienda para cuencas hidrográficas. (Barrios, 1995).

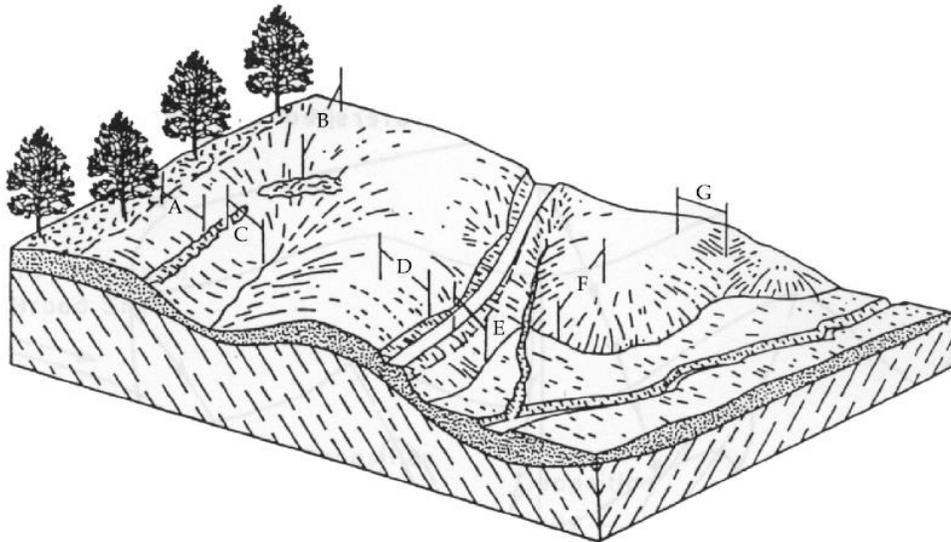


Figura 3.19 Formas típicas de determinar el factor LS. (Renard, 1997).

Las formas típicas (Figura 3.19) para poder determinar el factor LS son las siguientes:

Pendiente A si un suelo de bosque no disturbado en la parte alta no produce escurrimiento superficial, el límite superior de la pendiente comienza en la orilla de éste y se extiende pendiente abajo hasta donde exista una condición de flujo concentrado.

Pendiente B punto de origen del escurrimiento hasta una zona de flujo concentrado.

Pendiente C de un punto a otro punto de concentración.

Pendiente D del punto de origen del escurrimiento de una carretera que concentra el escurrimiento.

Pendiente E de la carretera a una planicie de inundación donde ocurriría el depósito.

Pendiente F en la nariz de un cerro desde el punto de origen del escurrimiento hasta la planicie de inundación.

Pendiente G desde el punto de origen del escurrimiento hasta una ligera depresión donde se concentra el flujo (Renard, 1997).

Factor de vegetación y cultivo. (C)

Este factor indica el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo. Se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área o parcela con una vegetación dada y sistemas de manejo específicos, y la pérdida de suelo en una parcela en barbecho continuo, limpia y arada, en el sentido de la pendiente, a intervalos regulares. Los valores de C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de los escurrimientos superficiales, y viceversa; es decir, a mayor valor de C, menor es la cobertura del suelo, es decir, hay menor protección.

La determinación de C se hace a partir de valores tabulados según se trate de cultivos agrícolas o vegetación forestal. Wischmeier y Smith, (1978), publicaron numerosas tablas del factor C por tipos de cultivos, etapa de desarrollo y sistemas de manejo. Así como también una tabla para vegetación de gramínea-arbustal y otra para bosque. (Barrios, 1995) (Tabla 3.1).

| Valores del factor de cubierta vegetal, C, para matorrales y vegetación permanente (1). | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------|-----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Cubierta de copas Tipo y Altura (2) | % cubierta (3) | Tipo (4) | Cubierta en contacto con el suelo | | | | | |
| | | | Porcentaje suelo cubierto | | | | | |
| | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | +95 |
| No Apreciable | | G | 0.45 | 0.20 | 0.10 | 0.042 | 0.013 | 0.003 |
| | | W | 0.45 | 0.24 | 0.15 | 0.091 | 0.043 | 0.011 |
| Herbáceas altas o matorral bajo, con altura media de caída de la gota de lluvia de 0.5 m. | 25 | G | 0.36 | 0.17 | 0.09 | 0.038 | 0.013 | 0.003 |
| | | W | 0.36 | 0.20 | 0.13 | 0.083 | 0.041 | 0.011 |
| | 50 | G | 0.26 | 0.13 | 0.07 | 0.035 | 0.012 | 0.003 |
| | | W | 0.26 | 0.16 | 0.11 | 0.076 | 0.039 | 0.011 |
| | 75 | G | 0.17 | 0.10 | 0.06 | 0.032 | 0.011 | 0.003 |
| | | W | 0.17 | 0.12 | 0.09 | 0.068 | 0.038 | 0.011 |
| Apreciable cubierta de matorral y arbustos con una altura media de caída de gota de lluvia de 2 m. | 25 | G | 0.40 | 0.18 | 0.09 | 0.040 | 0.013 | 0.003 |
| | | W | 0.40 | 0.22 | 0.14 | 0.087 | 0.042 | 0.011 |
| | 50 | G | 0.34 | 0.16 | 0.08 | 0.038 | 0.012 | 0.003 |
| | | W | 0.34 | 0.19 | 0.13 | 0.082 | 0.041 | 0.011 |
| | 75 | G | 0.28 | 0.14 | 0.08 | 0.036 | 0.012 | 0.003 |
| | | W | 0.28 | 0.17 | 0.12 | 0.078 | 0.040 | 0.011 |
| Árboles, pero sin cubierta apreciable de matorral. Altura media de caída de la gota de lluvia de 4 a 5 m. | 25 | G | 0.42 | 0.19 | 0.10 | 0.041 | 0.013 | 0.003 |
| | | W | 0.42 | 0.23 | 0.14 | 0.089 | 0.042 | 0.011 |
| | 50 | G | 0.39 | 0.18 | 0.09 | 0.040 | 0.013 | 0.003 |
| | | W | 0.39 | 0.21 | 0.14 | 0.087 | 0.042 | 0.011 |
| | 75 | G | 0.46 | 0.17 | 0.09 | 0.039 | 0.012 | 0.003 |
| | | W | 0.46 | 0.20 | 0.13 | 0.084 | 0.041 | 0.011 |

(1) Los valores de C asumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo.
(2) La altura de copas se mide como altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación. El efecto de las copas es inversamente proporcional a dicha altura media de caída de las gotas de lluvia, siendo nulo si esta es mayor de 10m.
(3) Porción de superficie que quedaría oculta por las copas en una proyección vertical de estas.
(4) **G**: Cubierta sobre el suelo de césped o similares, restos vegetales en descomposición o humus de al menos 5 cm de espesor.
W: Cubierta sobre el suelo de herbáceas de hoja ancha, con escasa extensión lateral de su sistema radical, o residuos vegetales sin descomponer.

Tabla 3.1 Valores de para bosques no alterados. (Wischmeier y Smith, 1978)

Existe otra metodología utilizada por Agroasemex en la cual el coeficiente asociado con este factor será asignado de acuerdo con diversas bibliografías (Renard, 1997; Montes, 2002; Becerra 1997, entre otras) y asociado con la información más reciente de INEGI de uso de suelo y vegetación. Dicha carta contiene información geográfica de la condición de la vegetación de la república mexicana, actualizada al 2002-2003, y representa la tercera etapa en el seguimiento multitemporal de los cambios que ha sufrido el paisaje. Cada uno de sus conjuntos de datos digitales contiene información de la cubierta vegetal y uso agrícola, que fue obtenida a partir de la interpretación convencional de imágenes LandSat ETM, con 25 metros de resolución, tomadas a principios de 2002, y con apoyo de espaciomapas 2000, generados a partir de imágenes LandSat a 30 m, y respaldada con trabajos de campo en los años 2002, 2003 y principios de 2004 (INEGI, 2005). Esta cartografía de recursos naturales muestra la ubicación, distribución y extensión de diferentes ecosistemas vegetales y sistemas agrícolas con sus respectivas variantes: tipos de vegetación, tipos de agricultura, e información ecológica relevante. En el siguiente cuadro se presenta la relación del valor C para cada tipo de vegetación y/o uso de suelo. (Tabla 3.2).

| Vegetación y/o uso de suelo | C | Vegetación y/o uso de suelo | C |
|--------------------------------------|------|-------------------------------------|-------|
| Bosque de ayarín | 0.01 | Pastizal gipsofilo | 0.25 |
| Bosque de cedro | 0.01 | Pastizal halofilo | 0.25 |
| Bosque de encino | 0.10 | Pastizal inducido | 0.02 |
| Bosque de encino-pino | 0.01 | Pastizal natural | 0.07 |
| Bosque de galería | 0.10 | 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 | 0.50 |
| Manglar | 0.10 | Selva baja espinosa caducifolia | 0.50 |
| Matorral crasicaule | 0.65 | Selva baja espinosa subperennifolia | 0.50 |
| Matorral de coníferas | 0.20 | Selva mediana caducifolia | 0.45 |
| Matorral desértico microfilo | 0.25 | Selva mediana perennifolia | 0.45 |
| Matorral desértico roetofilo | 0.25 | Selva mediana subcaducifolia | 0.45 |
| Matorral espinoso tamaulipeco | 0.45 | Tular | 0.10 |
| Matorral rosetofilo costero | 0.25 | Vegetación de desiertos arenosos | 0.85 |
| Matorral sarcocaulo | 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 | 1.0 |
| 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 |

Tabla 3.2 Factor C para vegetación y/o uso de suelo. (Agroasemex, S.A., 2011)

Actualmente se considera a la cobertura vegetal (Factor C) como la mejor herramienta para controlar la erosión, ya que brinda protección al suelo contra los agentes erosivos, sin embargo el manejo de la cobertura requiere de la integración de diversas prácticas, entre las cuales destacan la agricultura de conservación, la producción de cultivos alternativos, la reconversión de áreas agrícolas de baja productividad a uso pecuario, el manejo y rehabilitación de pastizales, el establecimiento y manejo de sistemas forestales (Loredo, 2005).

Factor de prácticas de conservación. (P)

El factor P es la relación de pérdida de suelo entre una parcela donde se han aplicado prácticas mecánicas de conservación de suelos (contornos, terrazas, cultivos en fajas, etc) para el control de la erosión, y las pérdidas que se producen en una parcela si tales prácticas no se utilizan y el laboreo se efectúa en el sentido de la pendiente. Cuando las prácticas de conservación no se aplican o son muy pocas el valor de P es igual a 1, de lo contrario el valor se obtiene a partir de la tabla 3.3.

| Pendiente en % | Contorneo | Cultivo en fajas | Terrazas y contorneo |
|----------------|-----------|------------------|----------------------|
| 1.1 – 2 | 0.6 | 0.30 | - |
| 2.1 – 7 | 0.5 | 0.25 | 0.10 |
| 7.1 – 12 | 0.6 | 0.30 | 0.12 |
| 12.1 – 18 | 0.8 | 0.40 | 0.16 |
| 18.1 – 24 | 0.9 | 0.45 | - |

Tabla 3.3 Valores del factor P. (USDA, 1978)

Es importante notar que la eficiencia que se logra con el uso de las prácticas mecánicas es menor que la que se alcanza con el uso de la vegetación y el manejo del cultivo, sin embargo, cuando se combina el uso de la vegetación y las prácticas mecánicas existe un efecto multiplicativo (Morgan, 1997).

3.4 Sistemas de información geográfica (SIG). Software ArcGis

3.4.1 Introducción a los sistemas de información geográfica

El uso de la información geográfica en la toma de decisiones suele pasar desapercibida, pero en realidad se encuentra presente en muchas de nuestras actividades cotidianas. Al seleccionar inconscientemente la ruta para ir al trabajo, la ruta de vacaciones, ir a una reunión de amigos, dirigirse a una tienda usando un teléfono inteligente, se están tomando decisiones que implican el análisis de la información geográfica sin estar conscientes de ello.²¹

Cuando este tipo de análisis de toma de decisiones se lleva a cabo empleando computadoras se suele hacer por medio de lo que se conoce como Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentran asociados a un identificador común de los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.²²

Durante décadas los SIG se han aplicado a problemas de gestión territorial y de recursos naturales, a cuestiones relacionadas con el medioambiente, la logística militar o en contextos directamente vinculados con las ciencias de la Tierra, como la geografía, la geología, etc. Además, recientemente se ha empezado a considerar el uso potencial de los SIG para otros campos y disciplinas relativamente

²¹ Pucha-Cofrep, F. (2017). Fundamentos de SIG.

²² Pucha-Cofrep, F. (2017). Fundamentos de SIG.

inéditos y en particular en la investigación en Ciencias Humanas y Sociales (Del Bosque González et al. 2012).

En este sentido, los SIG no son solo herramientas dentro de ese contexto de gran importancia de la información geográfica, sino en gran medida responsables de que esa situación sea tal, pues su contribución dentro del panorama relativo a la geografía ha sido vital para impulsar esta y hacerla llegar hasta su lugar actual. En una sociedad donde la información y la tecnología son dos de los pilares fundamentales, los SIG son, sin lugar a dudas, la tecnología estandarte para el manejo de información geográfica, y los elementos básicos que canalizan la gestión de todo aquello que, de un modo u otro, presente una componente geográfica susceptible de ser aprovechada.

Así, un SIG es fundamentalmente una herramienta para trabajar con información georreferenciada, una definición en la que pueden entrar un gran número de tecnologías y de otros elementos no tecnológicos.²³

Definición de un SIG

Se entiende por "Sistema de Información" la conjunción de información con herramientas informáticas, es decir, con programas informáticos o software. Si el objeto concreto de un sistema de información (información + software) es la obtención de datos relacionados con el espacio físico, entonces estaremos hablando de un Sistema de Información Geográfica o SIG (GIS en su acrónimo inglés, Geographic Information Systems).²⁴

Tenemos otra definición muy similar a las anteriores puesto que según López Trigal (2015) un SIG es un conjunto de herramientas compuestos por hardware, software, datos y usuarios, que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos y mapas, y representar datos alfanuméricos. De acuerdo a Burrough (1994) un SIG también puede verse como un modelo informatizado de la realidad geográfica para satisfacer unas necesidades de información concretas, esto es, crear, compartir y aplicar información útil basada en datos y en mapas.

ESRI por sus siglas en inglés Environmental Systems Research Institute es una empresa que actualmente desarrolla y comercializa software para Sistemas de Información Geográfica y es una de las compañías líderes en el sector a nivel mundial. Define un SIG como un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas.

ESRI además plantea que un SIG tiene como objetivo crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente.

Así pues, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta

²³ Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica

²⁴ Confederación de Empresarios de Andalucía. (25 de 04 de 2017). Sistemas de Información Geográfica, tipos y aplicaciones empresariales. Obtenido de <http://sig.cea.es/SIG>

sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones.

Componentes de un SIG

Como ya se mencionó los SIG son sistemas complejos que integran una serie de distintos elementos interrelacionados. El estudio de todos y cada uno de estos elementos es el fundamento para el estudio global de los Sistemas de Información Geográfica.

Una forma de entender el SIG es considerarlo formado por una serie de subsistemas, cada uno de ellos encargado de una serie de funciones particulares. Es habitual citar tres subsistemas fundamentales:

- Subsistema de datos
- Subsistema de visualización y creación cartográfica
- Subsistema de análisis.

El primer subsistema se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Por lo tanto, permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ellos. Respectivamente el segundo subsistema crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos. Finalmente, el tercer subsistema contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos. Si podemos incorporar estos 3 subsistemas en cierta medida se puede considerar a un SIG como una herramienta útil y válida con carácter general.

Otra forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos (Figura 3.20) que lo componen. Cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto.

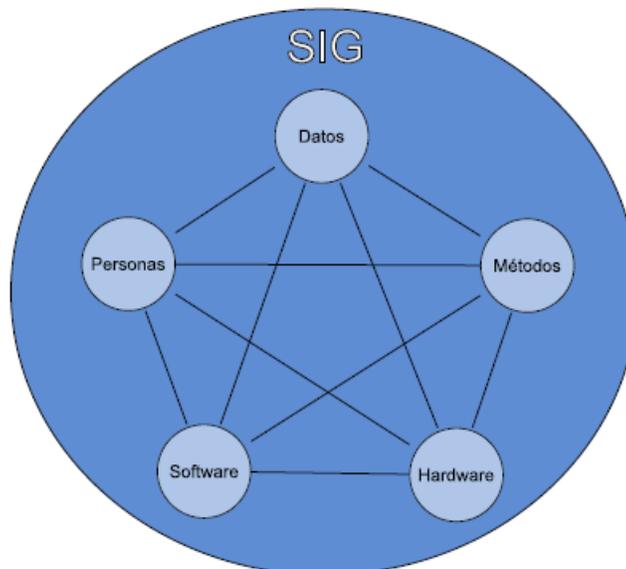


Figura 3.20 Elementos que conforman un SIG. (Olaya, 2014)

Datos. Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica. Sin ellos, no podremos construir productos de información o mapas que nos ayuden a hacer nuestros análisis y tomar las decisiones en nuestra organización. Esos datos podrán venir de diferentes fuentes: sensores remotos, sistemas de posicionamiento global (GPS), fotografías aéreas, archivos formato shapefile, archivos CAD, archivos Excel, etc.

Esta información geográfica será el inicio de partida para empezar a trabajar con los SIG, los cuales nos permitirán analizarla y extraer toda la información posible para plasmarla en un mapa que nos ayude a la interpretación de esa información.

Métodos. Un conjunto de formulaciones y metodologías que se aplican sobre los datos.

Los métodos tienen, en última instancia, la finalidad de establecer la estructura de un SIG y, en concordancia con ello, implementar aplicaciones que sustenten la toma de decisiones.

Software. Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores para el correcto análisis e interpretación de la información geográfica, que tenga la potencia y funcionalidad de trabajar con información de este tipo.

Actualmente existen bastantes softwares SIG en el mercado que nos ponen a disposición herramientas SIG para el tratamiento de la información geográfica.

Hardware. El equipo necesario para ejecutar el software. Dependiendo de las características de esta máquina, obtendremos un mayor o menor rendimiento a la hora de realizar nuestros análisis. Dentro de las características del hardware a tener en cuenta para análisis de información geográfica con software SIG podemos encontrar elementos como el Sistema operativo: Windows, Mac, Linux; la memoria RAM, el disco duro, la estructura del CPU: 64 o 32 bits y la tarjeta gráfica (para visualizaciones 3D).

Personas. Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG. Aquí es donde entran en juego los profesionales SIG. Ya que existen muchas tareas dentro de un análisis SIG, las cuales necesitan de uno o varios profesionales. Dentro de los perfiles SIG podemos encontrar dos perfiles fundamentales:

Técnico/Analista SIG. Profesional que se encarga de realizar análisis geográficos y obtener resultados acorde con la investigación o proyecto que se esté llevando a cabo.

Programador SIG. Desarrollador de partes funcionales de un SIG de escritorio (o de servidor) y /o de aplicativos web para la visualización de mapas.

Además de eso, y dado que los SIG están creciendo considerablemente hoy en día, se pueden encontrar perfiles como Administrador SIG, gerentes de cuenta SIG, o directores SIG. Todo dependerá de las necesidades de los proyectos.²⁵

Funciones y operaciones en un SIG

Los SIG operan como una base de datos geográfica asociada a los objetos existentes en un mapa digital, y dan respuesta a las consultas interactivas de los usuarios analizando y relacionando

²⁵ Geoinnova Formación. (27 de 04 de 2017). SIG Y medio ambiente. Obtenido de Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG)

diferentes tipos de información con una sola localización geográfica. Esto es, conectando mapas con bases de datos. Básicamente, el funcionamiento de un SIG pasa por las siguientes fases:

a) Entrada de datos.

La entrada de datos se refiere a todas las operaciones por medio de las cuales los datos espaciales de mapas, sensores remotos y otras fuentes son convertidos a un formato digital. Entre los diferentes dispositivos comúnmente utilizados para esta operación están los teclados, digitalizadores, barreadores electrónicos, catálogos de centros de trabajo (CCTS), y terminales interactivos o unidades de despliegue visual (VDU). Dados su costo relativamente bajo, eficiencia, y facilidad de operación, la digitización es la mejor opción de ingreso de datos para los fines de planificación del desarrollo.

Se deben ingresar dos tipos diferentes de datos al SIG: referencias geográficas y atributos. Los datos de referencias geográficas son las coordenadas (sea en términos de latitud y longitud o columnas y líneas) que fijan la ubicación de la información que se está ingresando. Los datos de atributos asignan un código numérico a cada casilla o conjunto de coordenadas y a cada variable, sea para representar los valores actuales (p.e., 200 mm de precipitación, 1.250 metros de elevación) o para connotar tipos de datos categóricos (usos del terreno, tipo de vegetación, etc.). La rutina de ingreso de datos requiere una cantidad considerable de tiempo, ya sea el ingreso manual con teclado, digitización, o por barrido electrónico.²⁶

b) Almacenamiento de datos.

Almacenamiento de datos se refiere al modo como los datos espaciales son estructurados y organizados dentro del SIG, de acuerdo a la ubicación, interrelación, y diseño de atributos. Las computadoras permiten que se almacenen gran cantidad de datos, sea en el disco duro de la computadora o en unidades portátiles.

c) Análisis e interpretación de los datos.

El análisis e interpretación de datos se hace para obtener información útil de los datos previamente ingresados al sistema. La manipulación de datos abarca dos tipos de operaciones: operaciones para eliminar errores y actualizar conjuntos de datos actuales y operaciones que hacen uso de técnicas analíticas para dar respuesta a preguntas específicas formuladas por el usuario. El proceso de manipulación puede ser desde una simple sobre posición de dos o más mapas, hasta una extracción compleja de elementos de información dispares, de una gran variedad de fuentes.

d) Salida de datos.

La salida de datos se refiere a la exhibición o presentación de datos empleando formatos comúnmente utilizados incluyendo mapas, gráficos, informes, tablas y cartas, sea en forma impresa o como imagen en pantalla, o como un archivo de textos trasladables a otros programas de cómputo para mayor análisis.

Gestión de la información

Un Sistema de Gestión de Bases de Datos (SGBD1) consiste en una colección de datos interrelacionados y un conjunto de programas para acceder a los mismos. El caso de lo SIG es un

²⁶ Organización de los Estados Americanos. (27 de 04 de 2017). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado.

poco diferente ya que en principio las bases de datos espaciales no son adecuadas para su manejo con SGBD tradicionales.

Sin embargo, a lo largo del desarrollo de las tecnologías ligadas a los SIG desde los setenta hasta la actualidad, una de las tendencias más claras es el papel, cada vez más importante, que tiene el uso de SGBD para la gestión de datos temáticos como apoyo al SIG. En principio se utilizaron para almacenar los atributos temáticos asociados a un conjunto de entidades espaciales almacenadas en formato vectorial, hoy en día se están empezando a utilizar además para el almacenamiento de la información geométrica (conjunto de coordenadas) de las entidades espaciales. Aunque se han hecho algunos intentos para almacenar información en formato ráster en un SGBD, esta opción no resulta eficiente.

Un SGBD permite el almacenamiento, manipulación y consulta de datos pertenecientes a una base de datos organizada en uno o varios ficheros. En el modelo más extendido (base de datos relacional) la base de datos consiste, de cara al usuario, en un conjunto de tablas entre las que se establecen relaciones.²⁷

El programa servidor suele activarse al arrancar la computadora, podría compararse a un bibliotecario que recibe peticiones (consultas) de diferentes programas clientes de base de datos, consulta la base de datos y entrega al cliente el resultado de la consulta realizada. Si dos usuarios solicitan al mismo tiempo una modificación de los datos, el programa servidor se encarga de hacerlas ordenadamente para evitar perder datos (lo que ocurriría si ambos usuarios abrieran y modificaran a la vez un fichero con la base de datos).

²⁷ Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica

3.4.2 Generalidades del Software ArcGIS

Sistemas Ráster

Dentro de los Sistemas de Información Geográfica podemos encontrar dos tipos de archivos cartográficos, los vectoriales y los ráster.

En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información (Figura 3.21), como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.²⁸

Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real:

Los datos temáticos (también conocidos como discretos) representan entidades como datos de la tierra o de uso de la tierra.

Los datos continuos representan fenómenos como la temperatura, la elevación o datos espectrales, entre ellos imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Las imágenes incluyen mapas escaneados o dibujos y fotografías de edificios.

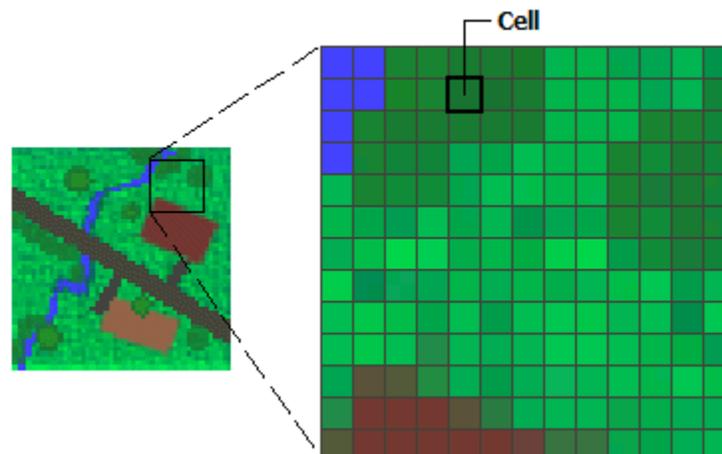


Figura 3.21 Sistema Ráster. (ArcGIS for Desktop, 2017)

Los rásteres temáticos y continuos se pueden visualizar en el mapa en forma de capas de datos junto con otros datos geográficos, pero a menudo se utilizan como datos de origen para el análisis. Los rásteres de imágenes suelen utilizarse como atributos en tablas: pueden visualizarse con datos geográficos y se utilizan para transmitir información adicional acerca de las entidades geográficas de mapas.

Si bien la estructura de datos ráster es simple, es excepcionalmente útil para una amplia variedad de aplicaciones. En un SIG, los usos de los datos ráster se pueden dividir en cuatro categorías principales:²⁹

²⁸ ArcGIS for Desktop. (04 de 27 de 2017). Arc Map. Obtenido de ¿Qué son los datos ráster?

²⁹ ArcGIS for Desktop. (04 de 27 de 2017). Arc Map. Obtenido de ¿Qué son los datos ráster?

a) Rásteres en forma de mapas base

Un uso común de los datos ráster en un SIG es en forma de visualización de fondo para otras capas de entidades (Figura 3.22). Por ejemplo, las orto fotografías que se visualizan debajo de otras capas ofrecen al usuario de mapas la garantía de que las capas de mapa se alinean espacialmente y representan tanto objetos reales como información adicional. Las tres fuentes principales de mapas base ráster son las orto fotografías de fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas escaneados.

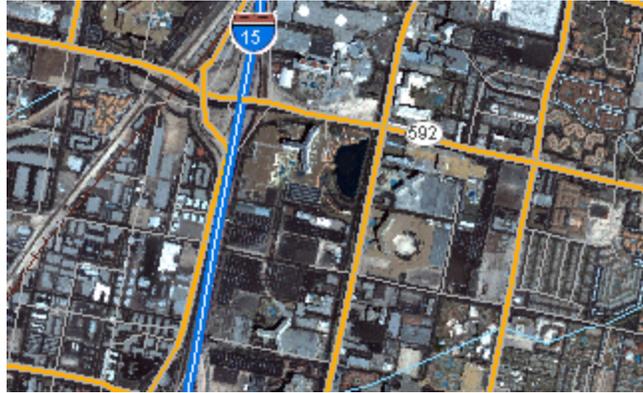


Figura 3.22 Ráster en forma de mapas base. (ArcGIS for Desktop, 2017)

b) Rásteres en forma de mapas de superficie.

Los rásteres son apropiados para representar datos que cambian continuamente en un entorno (superficie). Ofrecen un método efectivo para almacenar la continuidad en forma de superficie. También proporcionan una representación de superficies con espacios regulares. Los valores de elevación que se miden desde la superficie de la Tierra son la aplicación más común de los mapas de superficie (Figura 3.23), pero otros valores, como las precipitaciones, la temperatura, la concentración y la densidad de población, también pueden definir superficies que se pueden analizar espacialmente.

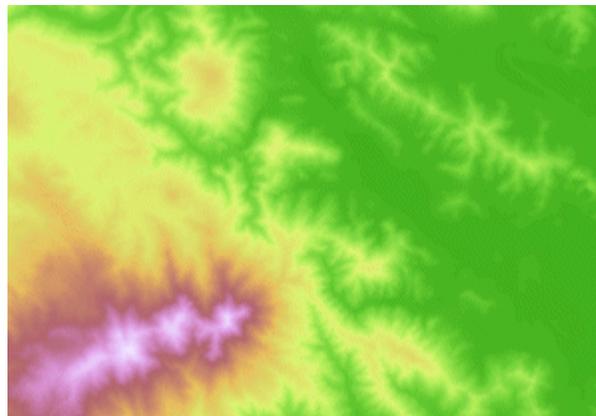


Figura 3.23 Ráster en forma de mapa de superficie que representa elevaciones en un área. (ArcGIS for Desktop, 2017)

c) Rásteres en forma de mapas temáticos

Los rásteres que representan datos temáticos se pueden derivar al analizar otros datos. Una aplicación de análisis común consiste en clasificar una imagen de satélite por categorías de cobertura de suelo. Básicamente, esta actividad agrupa los valores de datos multiespectrales en clases (como tipo de vegetación) y asigna un valor categórico (Figura 3.24). También es posible obtener mapas temáticos

a partir de operaciones de geoprocésamiento que combinen datos de varias fuentes como, por ejemplo, datos vectoriales, ráster y de terreno.

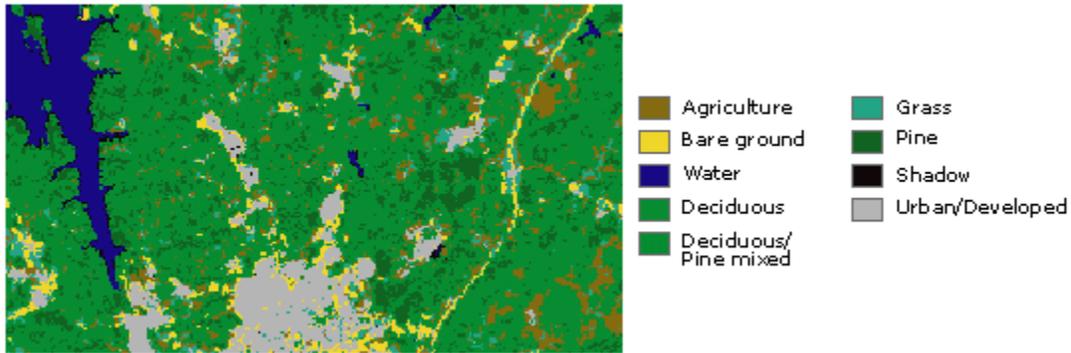


Figura 3.24 Ráster en forma de mapa temático que categoriza la cobertura del suelo. (ArcGIS for Desktop, 2017)

d) Rásteres en forma de atributos de una entidad

Los rásteres utilizados como atributos de una entidad pueden ser fotografías digitales, documentos escaneados o dibujos escaneados relacionados con un objeto o ubicación geográfica. Una capa de parcela podría tener documentos legales escaneados que identifiquen la transacción más reciente de dicha parcela, o una capa que represente las entradas a una cueva que podría incluir imágenes de las entradas reales a las cuevas asociadas a las entidades de puntos.

Sistemas vectoriales

Los archivos vectoriales son aquellos cuya naturaleza es de tipo vectorial. Los elementos geográficos se representan a partir de tres estructuras básicas: puntos, líneas y polígonos. Los archivos ráster se caracterizan por la existencia de una red formada por celdas o cuadrículas, más comúnmente conocidas como píxel, en la que cada cuadrícula o píxel presenta una cualidad o propiedad espacial (color, altitud, etc).

Mientras en el modelo vectorial las líneas y puntos son los elementos principales del sistema, en el modelo ráster, es la celda. La principal diferencia con respecto a un archivo vectorial es que el archivo ráster almacena píxel mientras en el vectorial almacena coordenadas de los vértices de cada elemento geométrico (Figura 3.25).

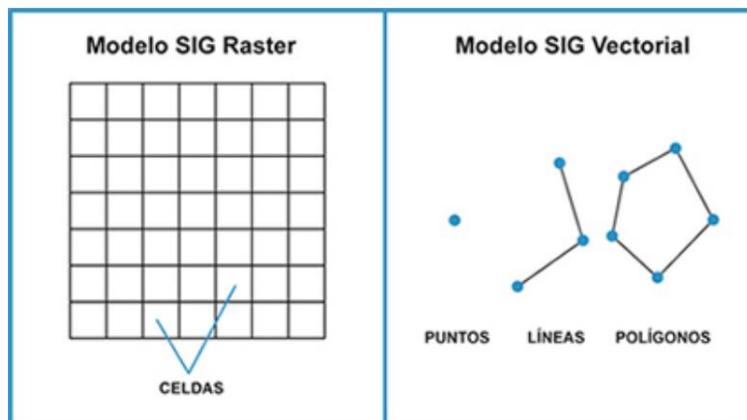


Figura 3.25 Modelo ráster y modelo vectorial. (Confederación de Empresarios de Andalucía, 2017)

La elección de un modelo u otro dependerá de si las propiedades topológicas son importantes para el análisis. Sí es así, el modelo de datos vectorial es la mejor opción, pero su estructura de datos, aunque muy precisa, es mucho más compleja y esto puede ralentizar el proceso. Por ello, si el análisis que nos interesa no requiere acudir a las propiedades topológicas, es mucho más rápido, sencillo y eficaz el uso del formato ráster.

También es más fácil decantarse por una estructura de datos vectorial cuando hay que reflejar más de un atributo en un mismo espacio. Usar un formato ráster nos obligaría a crear una capa distinta para cada atributo.

Software.

Los productos SIG con alto potencial de usuarios y bajos costos son los que se clasifican en la categoría de SIG en Internet. Estimulados por la amplia disponibilidad de acceso a Internet y la creciente demanda del mercado de información geográfica, los desarrolladores de este tipo de SIG han comenzado rápidamente a liberar productos que explotan el poder de Internet. Los fabricantes han decidido explotar las características únicas de la www para desarrollar tecnología SIG integrada por browsers y servidores Web, y utiliza el protocolo de transmisión de hipertexto (http) para comunicarse.

Los SIG con base en Internet tienen el más alto número de usuarios de todas las categorías de sistemas, aunque la mayoría se enfoca en tareas simples de despliegue y consulta de información. No obstante, están sentadas las bases para esperar que las capacidades de los SIG en Internet crecerán significativamente y llegarán a ser el SIG dominante como mecanismo de distribución de aplicaciones.

Ejemplos de productos de SIG para Internet son ESRI ArcIMS, Autodesk MapGuide, Intergraph GeoMedia Web Map y MapInfo Mapxtreme. Los precios varían de \$5,000 hasta \$25,000 dólares, en relación al tamaño de los sistemas, su funcionalidad y facilidades de multiusuario.

Además del software comercial para SIG, y gracias a la creciente popularidad de las aplicaciones basadas en sistemas de información geográfica, se ha propiciado el desarrollo de un enorme número de herramientas de software espacial open source (código abierto) para cubrir prácticamente cualquier necesidad en cuanto al desarrollo de aplicaciones Web espaciales y aplicaciones de escritorio. Se pueden mencionar las siguientes como principales exponentes del movimiento open source en lo que se refiere a software SIG para escritorio: GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), Quantum GIS (Figura 3.26) y gvSIG, que permiten el acceso a información espacial con precisión cartográfica fácil de usar. Para el desarrollo de aplicaciones SIG en web destaca el desarrollo de MapServer, así como de otros servidores de mapas como Mapbender y MapGuide Open Source. El software open source o de código abierto como el mencionado, presenta grandes ventajas en relación con el software comercial, como lo es el fácil acceso a estos sistemas gracias a su libre distribución en Internet y por no necesitar del pago de licencias por su uso, lo que ha permitido el crecimiento en la implementación de este tipo de software tanto en México como en el mundo.³⁰

³⁰ Instituto Mexicano del Transporte. (01 de 03 de 2016). Sistemas de Información Geoespacial.



Figura 3.26 Logo QGIS (Software libre). (QGIS, 2017)

Uno de los software más comercial y utilizado para los proyectos de ingeniería son los desarrollados por ESRI principalmente ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS (Figura 3.27) permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio.



Figura 3.27 Logo ArcGis desarrollado por ESRI. (ArcGIS for Desktop, 2017)

ArcGIS incluye completas aplicaciones SIG profesionales que facilitan diversas tareas de SIG como, por ejemplo, representación cartográfica, compilación de datos, análisis, administración de geo datos e imágenes, y uso compartido de información geográfica.

ArcGIS es la plataforma que utilizan para administrar los proyectos y flujos de trabajo de SIG, así como para crear datos, mapas, modelos y aplicaciones. Además, constituye el punto de partida y la base para la implementación de SIG en las organizaciones y en la Web. Se utiliza para publicar y compartir información geográfica con otras personas.

Los usuarios pueden compartir los paquetes de mapas y otros paquetes de SIG con otros usuarios de Desktop profesionales. También pueden compartir con otras personas a través de dispositivos móviles, la web y sistemas personalizados mediante la publicación de mapas y servicios de información geográfica relacionada a través de ArcGIS for Server y ArcGIS Online.

ArcGIS for Desktop está disponible en tres niveles funcionales:³¹

- a) **ArcGIS for Desktop Basic** se centra en el uso de datos, la representación cartográfica y el análisis completo.
- b) **ArcGIS for Desktop Standard** incorpora edición de geodatabases y creación de datos avanzadas.
- c) **ArcGIS for Desktop Advanced** es un completo escritorio de SIG profesional que incluye completas funciones de SIG y potentes herramientas de geoprocésamiento. Debido a las amplias capacidades de ArcGIS for Desktop Advanced, todos los sitios de SIG deberían disponer de al menos una copia de este producto.

3.4.3 Álgebra de mapas.

El álgebra de mapas es el conjunto de procedimientos y métodos que permiten llevar a cabo dicho análisis y extraer nuevos valores a partir de los contenidos en una o varias capas. Se entiende por álgebra de mapas el conjunto de técnicas y procedimientos que, operando sobre una o varias capas en formato ráster, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de nuevas capas de datos. Aunque nada impide que este proceso se lleve a cabo sobre capas vectoriales, se entiende que el álgebra de mapas hace referencia al análisis desarrollado sobre capas ráster, pues estas, por su estructura regular y sus características inherentes, son mucho más adecuadas para plantear los algoritmos y formulaciones correspondientes (Figura 3.28). Los procedimientos que se aplican sobre información geográfica en formato vectorial son por regla general clasificados dentro de otros bloques de conocimiento, como es por ejemplo el caso de las operaciones geométricas sobre datos vectoriales (incluidos dentro de la geometría computacional).

Conviene aclarar que, en la práctica y el uso diario de los SIG, el término álgebra de mapas es habitualmente usado de forma errónea. Ello es debido a que la gran mayoría de las aplicaciones SIG implementan algún tipo de funcionalidad para la combinación de un número dado de capas ráster, de forma que pueden relacionarse mediante expresiones matemáticas para la obtención de una nueva capa, y esta funcionalidad se designa normalmente como álgebra de mapas o en ocasiones calculadora de mapas.

³¹ ArcGIS for Desktop. (27 de 04 de 2017). Qué es ArcMap. Obtenido de ArcGIS Resources.



Figura 3.28 Ejemplo de álgebra de mapas. (Olaya, 2014)

Como tal, el álgebra de mapas lo forman un conjunto de variables (los mapas), expresiones y funciones, los cuales, a través de una sintaxis adecuada, permiten la obtención de nuevos resultados geográficos. Las funciones que se implementan en las calculadoras de mapas son, como veremos, un subconjunto de las posibles, lo que bien podríamos denominar una aritmética de mapas. El concepto de álgebra de mapas, más extenso que el anterior, constituye sin embargo no una herramienta puntual, sino un completo marco de trabajo para el manejo de capas ráster y, muy especialmente, su análisis encaminado a la obtención de nuevos resultados.

Si analizamos las prácticas geográficas hasta nuestros días, vemos que el álgebra de mapas como proceso de análisis no es algo nuevo. La idea de utilizar mapas existentes para generar otros nuevos o simplemente extraer de ellos resultados cuantitativos es una práctica común desde el mismo momento en que aparece la cartografía moderna. Sin embargo, es con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica y la posibilidad de procesar los datos geográficos en un entorno informatizado cuando se dota de formalismo a estos planteamientos y se define con rigor el conjunto de herramientas de análisis.

La definición actual del álgebra de mapas la debemos a Dana Tomlin, quien estableció la división principal de funciones y dio cuerpo a la disciplina, sentando así las bases para lo que es hoy en día la manera habitual de proceder en el análisis de capas geográficas ráster. Posteriormente, otros autores han desarrollado generalizaciones y extensiones de las ideas de Tomlin, pero son estas las que, desde el punto de vista práctico, cubren la mayor parte de casos posibles y resultan de utilidad directa para el análisis habitual.

Tipos de funciones en el álgebra de mapas.

Las funciones son el elemento principal del álgebra de mapas. Cuatro son los tipos principales de funciones que podemos definir, agrupadas según la forma en que toman la información necesaria para su cálculo de entre la contenida en todas las celdas de las capas de origen.

Local. El valor en cada celda de la capa resultante es función únicamente de los valores en esa misma celda en las capas de partida.

Focal. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor en dicha celda y en las situadas en un entorno definido alrededor de la misma.

Zonal o regional. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor de todas las celdas conectadas a esta que presentan un mismo valor para una de las capas de entrada (pertenecen a la misma clase que esta).

Global. El valor resultante de la función es obtenido a partir de todas las celdas de la capa.

La combinación de distintas funciones y de enfoques variados da lugar a un enorme conjunto de operaciones de análisis basados en el álgebra de mapas así definido.

Este conjunto es el que dota de toda su potencia a los SIG como herramientas de análisis del medio, y permite extraer de los datos geográficos en formato ráster toda la información que realmente contienen.

Funciones Locales

Las funciones locales asignan valores a una celda en base a los valores que esa misma celda presenta para cada una de las capas de entrada, operando con estos de una forma u otra. Es decir, el valor resultante para una localización dada es función exclusivamente de lo que se encuentra en dicha localización (Figura 3.29), no dependiendo en modo alguno de otras localizaciones (otras celdas).

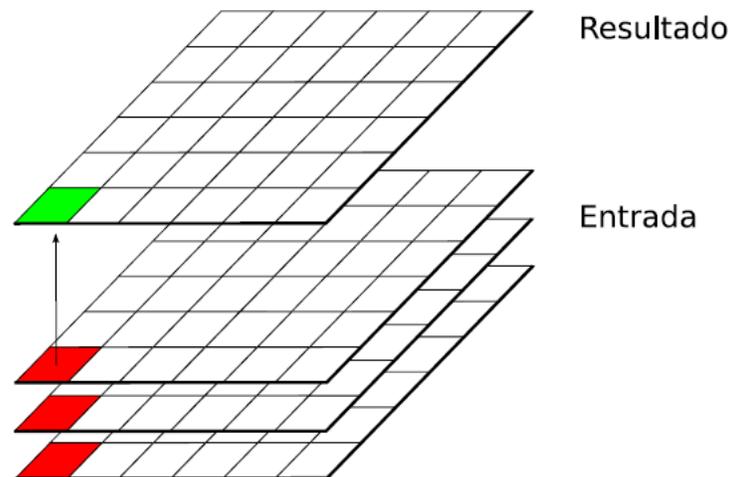


Figura 3.29 En rojo, celdas de partida analizadas. En verde, celda que recoge el resultado. (Olaya, 2014)

Las funciones locales son las que utilizamos cuando empleamos esa anteriormente citada aritmética de mapas. Aunque las funciones también operan con varias capas, la combinación de una serie de ellas suele llevarse a cabo con funciones locales, que calculan los valores para cada punto de acuerdo con los valores de dichas capas en ese punto. Pueden elaborarse funciones más complejas utilizando todos los operadores disponibles.

Una función de tipo local puede ser también aplicada sin necesidad de tener una serie de capas, sino con una única capa de partida. Por ejemplo, un cambio de unidades es una función local, ya que cada uno de los valores expresados en las unidades de destino solo depende del valor expresado en las unidades de origen en cada propia celda. Si una capa conteniendo elevaciones expresadas en metros la multiplicamos por 100, obtenemos una nueva capa con valores de elevación en centímetros, habiendo aplicado una función local para realizar la conversión.

De igual modo, convertir los valores de una capa de pendientes de radianes a grados requiere multiplicar sus valores por $180/\pi$.

Cuando las funciones locales se aplican a varias capas, la forma de combinar estas es muy variable, podemos utilizar algunas otras, y de modos igualmente variados. El conjunto de ellas lo dividimos en los siguientes grupos:

- a) **Operadores aritméticos.** Para formar expresiones con las distintas capas tales como la ecuación USLE que ya conocemos.
- b) **Operadores lógicos.** Pueden tomarse los valores de las capas como valores booleanos (1 o 0, verdadero o falso), o aplicar expresiones lógicas de tipo pertenece al conjunto u operadores de comparación, entre otros.
- c) **Parámetros estadísticos.** Por ejemplo, el valor mayor de entre todas las capas. También pueden recogerse otros como el orden del valor de una capa dentro de la serie ordenada de valores en todas las capas, el código de la capa donde aparece ese valor mayor, o el número de capas con valores iguales al número dado:

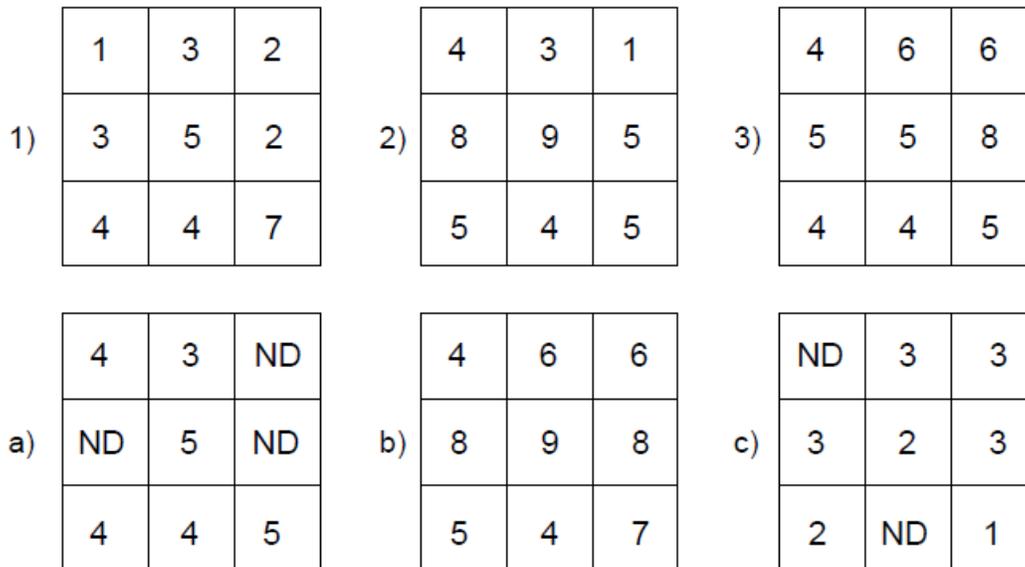


Figura 3.30 Ejemplos sencillos de análisis local estadístico con múltiples capas. (Olaya, 2014).

En la imagen anterior (Figura 3.30) en fila superior, capas de origen y su numeración correspondiente. En la inferior, de izquierda a derecha: valor máximo, valor más frecuente (mayoría), y capa de máximo valor. ND indica celdas sin datos en las cuales no puede establecerse un valor resultante por no estar este bien definido.

Funcione Focales.

Las funciones de análisis focal operan sobre una sola capa de datos, asignando a cada celda un valor que deriva de su valor en la capa de partida, así como de los valores de las situadas en un entorno inmediato de esta. La función focal queda así definida por las dimensiones y forma del entorno a considerar, así como por la función a aplicar sobre los valores recogidos en este.

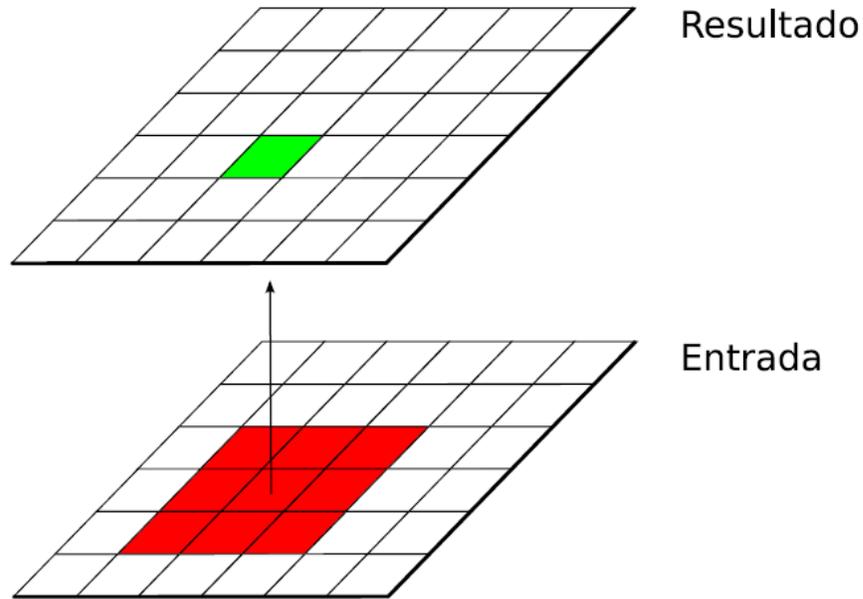


Figura 3.31 En rojo, celdas de partida analizadas. En verde, celda que recoge el resultado. (Olaya, 2014)

A diferencia de las funciones locales, las focales no se aplican sobre varias capas, ya que la información necesaria se extrae de la vecindad de cada celda, dentro de la propia capa de partida.

Las funciones focales (Figura 3.31) más habituales emplean un entorno cuadrado 3×3 centrado en la celda, que se va desplazando por la capa de tal modo que todas las celdas van siendo designadas como celdas centrales, y un nuevo valor es calculado para ellas. Este entorno de celdas a considerar se denomina frecuentemente ventana de análisis. Para definir las operaciones sobre esta ventana, es frecuente introducir una notación como la siguiente con el fin de simplificar las expresiones (Figura 3.32).

| | | |
|-------|-------|-------|
| Z_1 | Z_2 | Z_3 |
| Z_4 | Z_5 | Z_6 |
| Z_7 | Z_8 | Z_9 |

Figura 3.32 Notación para una ventana de análisis en funciones focales. (Olaya, 2014)

Para la imagen anterior Z_5 es la celda central, la cual recibirá el valor resultante de la operación efectuada.

Aunque menos frecuentes, pueden utilizarse ventanas de tamaño mayor, $n \times n$, siendo n un valor impar para que de este modo exista una celda central. De otro modo, la ventana no podría quedar centrada sobre la celda a evaluar, sino desplazada. De igual forma, la ventana no ha de ser necesariamente cuadrada, y otras formas distintas son aplicables (Figura 3.33).

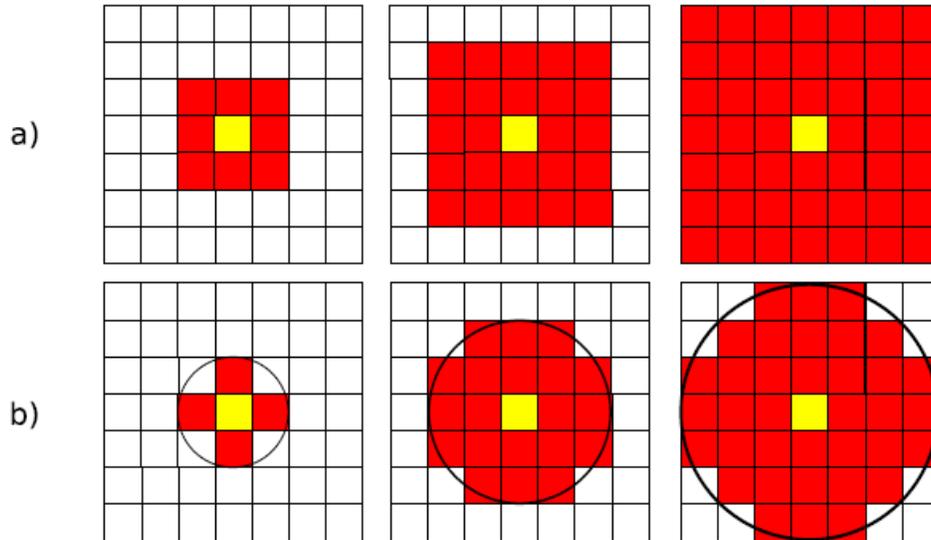


Figura 3.33 Algunos de los tipos de ventana de análisis más comunes en distintos tamaños. a) cuadrada, b) circular. (Olaya, 2014)

Con los valores de las celdas contenidas en la ventana de análisis pueden realizarse operaciones muy diversas, entre las que cabe citar las siguientes:

- a) **Cálculo de descriptores estadísticos.** Los más habituales son la media, la mediana, los valores extremos o el rango de valores. Para el caso de valores discretos, son comunes parámetros como el número de clases (número de celdas con distinto valor) dentro de la ventana de análisis.
- b) **Combinaciones lineales.** Este grupo particular de operaciones se conocen como convoluciones, y son la base para una larga serie de procedimientos muy comunes en el tratamiento de imágenes digitales.
- c) **Operaciones matemáticas de forma general.** No necesariamente combinaciones lineales, aplican operadores más complejos a los valores de la ventana.
- d) **Clasificaciones.** En función de la configuración de los valores dentro de la ventana clasifican la celda en una serie de posibles grupos, de acuerdo con unas reglas definidas. El resultado es una capa de información discreta, frente a las anteriores que producen capas continuas.

Funciones zonales o regionales

Las funciones de análisis zonal asocian a cada celda valores relativos no a dicha celda ni a un entorno fijo de esta, sino a la clase a la que dicha celda pertenece. Se necesita, por tanto, una capa de apoyo que contenga la pertenencia de cada celda a una u otra clase, ya que la utilización de una celda en el análisis no se establece por posición, como en los casos anteriores, sino por valor (Figura 3.34). Esta capa es de tipo discreto y representa una teselación del territorio en un número definido de clases.

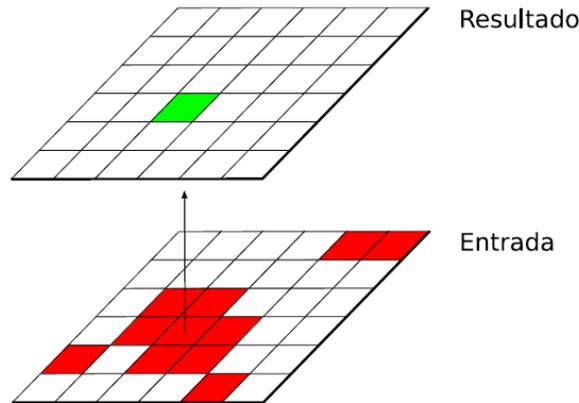


Figura 3.34 En rojo, celdas de partida analizadas. En verde, celda que recoge el resultado. (Olaya, 2014)

Lo habitual es emplear esta capa de clases (Figura 3.35) en conjunción con otra, ya sea de valores continuos o discretos, y extraer de esta segunda los valores a utilizar para definir el valor representativo de cada clase.

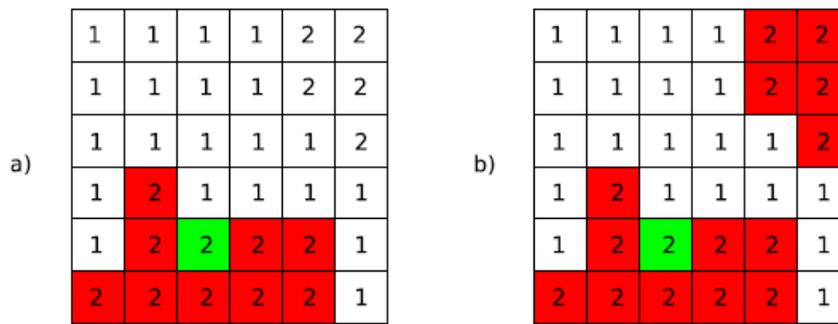


Figura 3.35 Formas de definir las clases para el análisis zonal. a) Asignación por valor con contigüidad, b) asignación únicamente por valor. (Olaya, 2014)

En el caso de las pérdidas por subcuencas, calculábamos con los valores del conjunto de celdas pertenecientes a cada clase su media aritmética, pero pueden aplicarse igualmente diversos descriptores estadísticos o funciones más complejas, al igual que ya vimos en los otros tipos de funciones.

Los valores a asignar a cada clase pueden extraerse también de la propia capa de clases, no siendo necesaria otra capa. En este caso, estos valores resultantes suelen tener relación no con un parámetro adicional, sino con la geometría de cada clase. Por ejemplo, la superficie o el perímetro de cada tesela pueden recogerse como valores asociados a esta.

Este es un tipo análisis muy frecuente en el estudio del paisaje, y el número de parámetros que pueden obtenerse por análisis zonal a partir de una única capa de clases es muy elevado. Junto a parámetros sencillos como la citada superficie o el perímetro, otros parámetros más complejos pueden servir para recoger la configuración estructural de las teselas, su riqueza y variabilidad, la fragmentación, etc.

Funciones globales

Las funciones globales son aquellas que utilizan la totalidad de valores de la capa para la obtención del resultado. Por su forma de operar, no generan exclusivamente nuevas capas como las anteriores funciones, sino tanto valores concretos como objetos geográficos de diversa índole (Figura 3.36).

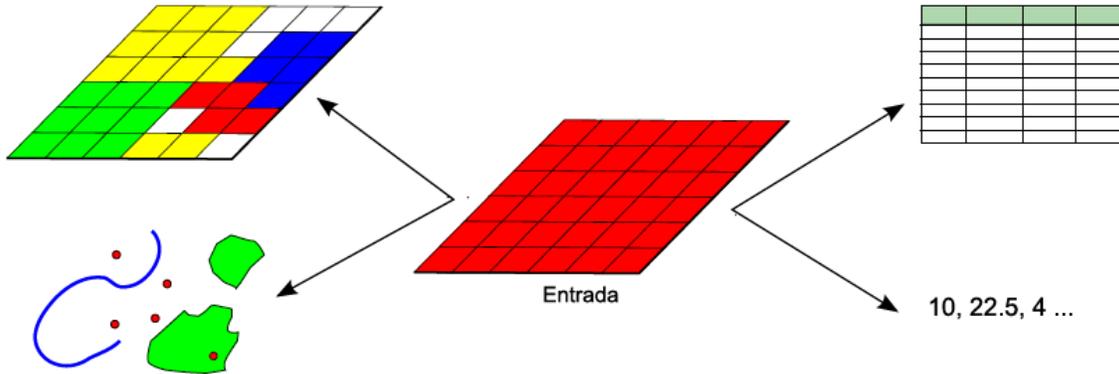


Figura 3.36 Las funciones de análisis global. (Olaya, 2014)

En la imagen anterior las funciones de análisis global analizan el conjunto de valores de una capa para obtener un valor resultante, que puede ser tanto un objeto geográfico (capa ráster o vectorial) como un valor escalar sencillo, una tabla u otro tipo de resultado.

Por ejemplo, el valor máximo y mínimo de la capa que es necesarios para normalizar esta se obtienen mediante una función global. Asimismo, el cálculo de un perfil entre dos puntos o el trazado de una ruta óptima sobre una superficie de costo acumulado son ejemplos de funciones globales que generan un resultado distinto de un mero valor numérico.

4 VULNERABILIDAD Y RIESGO.

La vulnerabilidad y el riesgo son dos conceptos que no son mutuamente excluyentes, es decir ambos conceptos están estrechamente ligados y matemáticamente uno es función del otro.

En este capítulo empezaremos definiendo los conceptos para poder entender la vulnerabilidad de manera general puesto que este es un concepto muy complejo y que pudiera estudiarse mucho más a fondo. Partiendo de esto surge el concepto de vulnerabilidad global del cual aparecen distintas clasificaciones de la vulnerabilidad de acuerdo al enfoque que cada autor le asigna.

Posteriormente, se puntualiza cada una de los elementos que conforman al riesgo, es decir, se definirán conceptos como vulnerabilidad, peligro y exposición. De acuerdo a lo que maneja la guía básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos en su versión del año 2004. Con el propósito de ver qué función tiene cada concepto cuando se pretende calcular el riesgo asociado a un fenómeno natural.

Luego se hará una descripción de los puntos más importantes de la metodología que dicha guía establece para obtener el riesgo. Puesto que se mencionan aspectos importantes como la identificación de los fenómenos naturales que pueden afectar una zona de estudio.

Se presentan pequeños ejemplos respecto a la identificación de sistemas expuestos y su vulnerabilidad, así como la evaluación de los niveles de riesgo ante un fenómeno. También se describen conceptos como los mapas de peligro y de riesgo asociados a un fenómeno natural.

4.1 Conceptos de vulnerabilidad

Para poder entender el término vulnerabilidad empezamos determinando su origen etimológico. En este caso, tenemos que resaltar que dicha palabra proviene del latín pues está conformada por tres partes latinas claramente diferenciadas: el sustantivo *vulnus*, que puede traducirse como “herida”; la partícula *-abilis*, que es equivalente a “que puede”; y finalmente el sufijo *-dad*, que es indicativo de “cualidad”. De ahí que vulnerabilidad pueda determinarse como “la cualidad que tiene alguien para poder ser herido”.³²

La Vulnerabilidad se define como el riesgo que una persona, sistema u objeto puede sufrir frente a los peligros, sean ellos desastres naturales, desigualdades económicas, políticas, sociales o culturales.

Las vulnerabilidades adoptan diferentes formas, dependiendo de la naturaleza del objeto de estudio, sus causas y consecuencias. Puede aplicarse a una persona o un grupo de personas, suele considerarse que los niños, las mujeres y los ancianos son sujetos en situación de vulnerabilidad. Esta concepción está dada por las carencias o diferencias físicas ante los hombres, a quienes se supone naturalmente preparados para enfrentar ciertas amenazas. Un ejemplo típico para explicar el concepto que la sociedad tiene respecto a la vulnerabilidad ocurre cuando un barco se está hundiendo y los primeros en ser rescatados son los mencionados grupos (niños, mujeres y ancianos). Se cree que los hombres tienen mayores posibilidades de resistir y de ayudar al resto de los afectados.

Otra aplicación de vulnerabilidad, está relacionada con los desastres naturales. Una zona vulnerable es aquella que aparece expuesta a un fenómeno con potencialidad destructora, por ejemplo, un pueblo desarrollado a los pies de un volcán activo.

La vulnerabilidad puede analizarse desde diferentes ópticas (física, social, política, tecnológica, ideológica, cultural y educativa, ambiental e institucional), relacionadas entre sí y vinculadas, además, con factores de orden antrópico. Una amenaza es un peligro que causa una emergencia, la vulnerabilidad a esa amenaza ocasiona un desastre.

Tradicionalmente, los términos vulnerabilidad, riesgo, amenaza y catástrofes han sido usados indistintamente, a pesar de que cada uno tiene un significado preciso. La vulnerabilidad se muestra como un concepto múltiple de difícil cálculo y precisión, dado que carece de definiciones técnicas o de verdad absoluta en un diagnóstico. El término vulnerabilidad refiere a una situación aproximada, medida de acuerdo a los contextos territoriales locales. No posee un valor absoluto sino que dependerá de los tipos y valores de las amenazas existentes, de la escala de estudio, de la profundidad y de la orientación metodológica del mismo.³³

La vulnerabilidad establece la intensidad del desastre o el grado de destrucción a partir del grado de exposición, de la protección que tenga, de la reacción inmediata, de la posibilidad de recuperación básica y de la reconstrucción.

Vulnerabilidad Global.

La vulnerabilidad global, concepto utilizado actualmente por la teoría de los riesgos es el producto de la interacción de varios elementos. No responde a un único factor de exposición o de peligro, tampoco a la capacidad de una sociedad o individuo de hacer frente a un evento trágico o de

³² Merino, J. P. (2013). Definicion.de. Obtenido de <https://definicion.de/vulnerabilidad/>

³³ ALONSO CLIMENT, I. (2002). Tercer mundo, desarrollo, desastres y tecnología. Una mirada desde la Geografía. En Serie Geográfica N°10

recuperarse tras la destrucción, tampoco al volumen de los daños ni a la mayor o menor voluntad política o reintegro económico que se realice para mitigar lo sucedido. La vulnerabilidad de un determinado grupo humano se integrará de todos y cada uno de esos factores, constituyendo la pobreza el componente más importante de ella. Si la vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, el resultado de esa interacción es la incapacidad de sus habitantes para responder ante la presencia de un riesgo determinado, facilitando la destrucción. Sería conveniente tratar a la vulnerabilidad global como el resultado integrado de las distintas vulnerabilidades que conforman un ángulo particular para analizar el fenómeno y que están estrechamente vinculadas entre sí. Así, algunas formas de mitigación de un tipo de vulnerabilidad pueden significar el aumento de otra o aparecer nuevos riesgos para ese u otros grupos humanos.³⁴

Entendida de esa manera el término vulnerabilidad se presta para examinar numerosos procesos sociales, de allí que se haga necesario precisar los alcances conceptuales y analíticos de la cuestión. En ese sentido, la noción de vulnerabilidad se encuentra presente en diversos ámbitos con diferente grado de aplicación: en ámbitos sociales, la delimitación precisa resulta compleja, aunque es posible identificar los riesgos en forma uniforme; en lo jurídico, el término se refiere a la falta de cumplimiento de los derechos y libertades; en economía se muestra el carácter vulnerable a través del análisis de la sensibilidad o la dependencia económica. Otros campos que utilizan ampliamente el concepto están dados por estudios de las poblaciones a través de dos concepciones: una referida a las “conductas de riesgo” y otra a las “situaciones de riesgo”, orientadas a las decisiones individuales o a los ambientes donde se desarrollan las actividades humanas.

4.2 Tipos de vulnerabilidad

La vulnerabilidad tiene diferentes formas de clasificarse, cada una depende de la perspectiva con la que se analiza, una de las clasificaciones más utilizadas es la de la vulnerabilidad global que la sustenta Wilches Chau³⁵ en 1989, la cual es la siguiente:

Vulnerabilidad natural.

Los seres humanos necesitan ciertas condiciones ambientales y sociales para poder desarrollarse. La vulnerabilidad natural de los ecosistemas de los distintos países se incrementó diferencialmente, provocando la resistencia de la población a condiciones ambientales severas y a veces haciéndola más vulnerable frente a ellas.

Vulnerabilidad física del suelo.

Se refiere a la localización de la población en zonas de riesgo físico, condición provocada por la pobreza y la falta de oportunidades para una ubicación de menor riesgo (condiciones ambientales y de los ecosistemas, localización de asentamientos humanos en zonas de riesgo).

³⁴ FOSCHIATTI, A. M. (2005). vulnerabilidad demográfica y social. Consideraciones conceptuales. Investigaciones y Ensayos Geográficos. Revista de Geografía. Año IV, N^o4, Universidad Nacional de Formosa, EDUNaF.

³⁵ Wilches-Chaux, Gustavo. (1989) Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis. Servicio Nacional de Aprendizaje, Popayán

Vulnerabilidad económica.

Se observa una relación indirecta entre los ingresos en los niveles nacional, regional, local o poblacional y el impacto de los fenómenos físicos extremos. Es decir, la pobreza aumenta el riesgo de desastre (vulnerabilidad de los sectores más deprimidos, desempleo, insuficiencia de ingresos, explotación, inestabilidad laboral, dificultad de acceso a los servicios de educación, salud, ocio).

Vulnerabilidad social.

Se produce un grado deficiente de organización y cohesión interna de la sociedad bajo riesgo, que limita su capacidad de prevenir, mitigar o responder a situaciones de desastres (tipo de acceso al saneamiento ambiental, nutrición infantil, servicios básicos, que permitan la recuperación de los daños ocurridos).

Vulnerabilidad política.

Concentración de la toma de decisiones, centralismo en la organización gubernamental y la debilidad en la autonomía de los ámbitos regionales, locales y comunitarios, lo que impide afrontar los problemas. (Autonomía en el poder de decisión y de solucionar problemas).

Vulnerabilidad técnica.

Se refiere a las inadecuadas técnicas de construcción de edificios e infraestructura básica utilizadas en áreas de riesgo (incapacidad de control y manejo de las tecnologías frente a los riesgos).

Vulnerabilidad ideológica.

Alude a la forma y concepción del mundo y el medio ambiente donde se habita y con el cual se relaciona y la posibilidad de enfrentar los problemas. La pasividad, fatalismo, presencia de mitos, aumenta la vulnerabilidad de la población.

Vulnerabilidad educativa.

Falta de programas educativos que proporcionen información sobre el medio ambiente, sobre el entorno, los desequilibrios y las formas adecuadas de comportamiento individual o colectivo en caso de amenaza o de situación de desastre (conocimiento de las realidades locales y regionales para hacer frente a los problemas).

Vulnerabilidad cultural.

Se refiere a la forma en que los individuos y la sociedad conforman el conjunto nacional y el papel que juegan los medios de comunicación en la consolidación de estereotipos o en la transmisión de información relacionada con el medio ambiente y los potenciales o reales desastres (influencia de la personalidad de los habitantes que se identifican con un modelo de sociedad, influencias de los medios masivos de comunicación frente a los riesgos).

Vulnerabilidad ecológica.

Está relacionada a la convivencia con el medio ambiente, sin la dominación por destrucción (vulnerabilidad de los ecosistemas frente a los efectos directos o indirectos de la acción humana, y por otra, altos riesgos para las comunidades que los explotan o habitan).

Vulnerabilidad institucional.

Se refiere a la obsolescencia y la rigidez de las instituciones, en las cuales la burocracia, la prevalencia de la decisión política, el dominio de criterios personalistas, impiden respuestas adecuadas y ágiles a la realidad existente y demoran el tratamiento de los riesgos o sus efectos.

La figura 4.1 muestra un esquema con los diferentes tipos de vulnerabilidades que conforman la vulnerabilidad global.

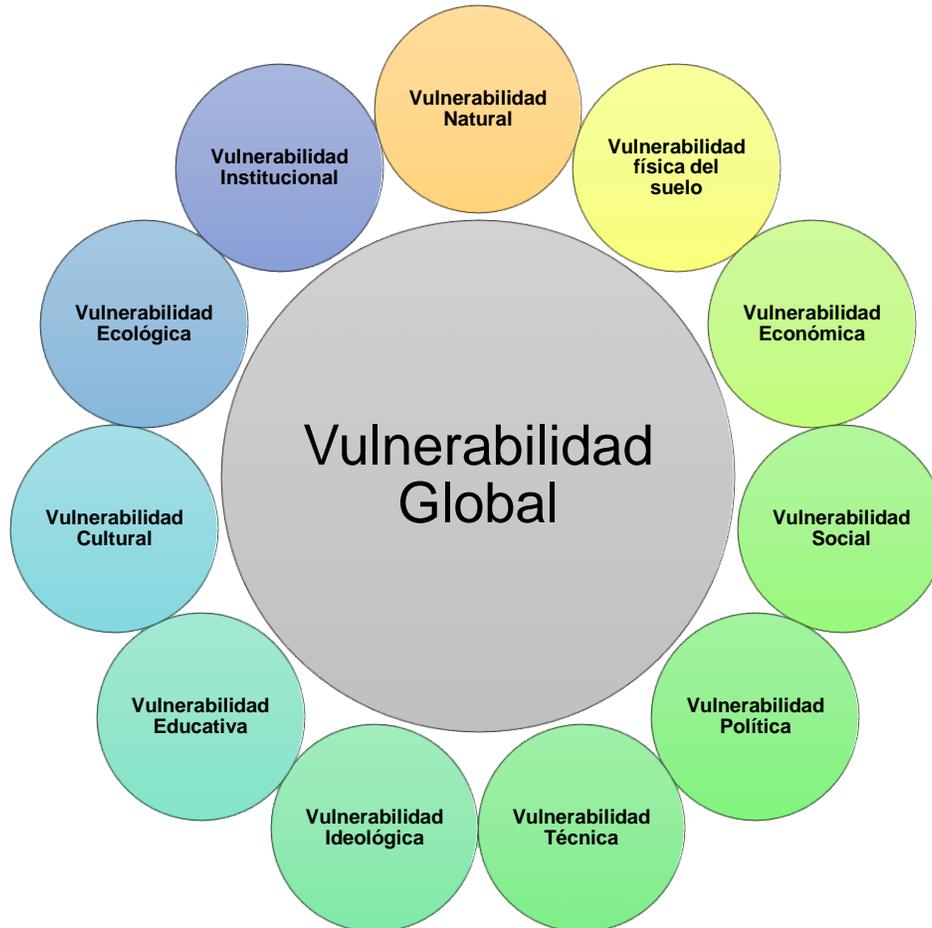


Figura 4.1 Clasificación de la vulnerabilidad Global. (Wilches-Chaux, 1989)

Las distintas combinaciones de estos niveles de vulnerabilidad tienen un claro efecto en términos del impacto en un evento físico. Otras clasificaciones en cuanto a componentes o niveles de la vulnerabilidad han sido propuestas por Cannon en 1991 y Anderson y Woodrow en 1989. Estos complementan y amplían el esquema ofrecido por Wilches Chaux.

Cannon clasifica la vulnerabilidad en tres tipos básicos:

Vulnerabilidad en los sistemas de vida: Se relaciona con la manera en que el sistema particular de vida propio de un individuo o grupo, se hace más o menos resistente al impacto de un riesgo.

Aspectos de autoprotección: Se relaciona con el nivel de preparación y el grado de protección que puede lograr un individuo o grupo humano frente al riesgo.

Aspectos de protección social: Relacionado con el nivel de protección dotado por el Estado u otras instituciones

Mientras que este esquema no resulta tan comprensivo como el de Wilches Chaux, Cannon introduce el importante aspecto de la composición por clase, género y etnias de las poblaciones bajo riesgo, afirmando que los aspectos más importantes de la vulnerabilidad descansan en las características de los individuos y de los grupos derivados de su condición de clase, género o etnicidad. Las diferencias en estos factores socioeconómicos resultan en distintos grados de impacto de una amenaza física, además tiene la virtud de destacar los tipos de actores sociales responsables para las diferentes categorías de vulnerabilidad.

Este acercamiento hacia el análisis de las vulnerabilidades ha sido desarrollado convincentemente de manera más completa por Anderson y Woodrow en 1989 como una herramienta de diagnóstico en el análisis de diversos casos de esquemas de reconstrucción después de un desastre.

Se identifican tres áreas o clases de vulnerabilidades:

Físico - Material

Se refiere a las características de la tierra, el clima y el ambiente, los niveles de salud, las características de la fuerza de trabajo, alimentación, vivienda, etc.

Social - Organizacional.

Que incluye las estructuras políticas formales y los sistemas informales a través de los cuales las personas logran tomar decisiones, establecer liderazgos y organizar actividades sociales y económicas.

Motivacional - Actitudinal.

Relacionado con la forma en que las comunidades se ven a sí mismas y sus capacidades para tratar efectivamente el ambiente físico y sociopolítico.

Estos autores relacionan sus clases o categorías de vulnerabilidad con preocupaciones en cuanto al género, clase, etnicidad y diferencias migratorias y de edad. Destacan también de su esquema para considerar no solamente la vulnerabilidad de las familias o comunidades, regiones o naciones, sino también de sus capacidades, o sea aquellos aspectos físicos, materiales, organizacionales, sociales, actitudinales o motivacionales que constituyen aspectos positivos al considerarse las respuestas o las resistencias frente a agentes potenciales de desastres. El proceso de desarrollo se ve entonces como un proceso través del cual se reducen las vulnerabilidades y se incrementan las capacidades.

4.3 Conceptos de riesgo

El tema del riesgo dentro de la prevención de desastres ha sido tratado y desarrollado por diversas disciplinas que han conceptualizado sus componentes de manera diferente, aunque en la mayoría de los casos de manera similar. Un punto de partida es que los riesgos están ligados a actividades humanas. La existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal, que constituye un

desastre (Figura 4.2). Así, un movimiento del terreno provocado por un sismo no constituye un riesgo por sí mismo. Si se produjese en una zona deshabitada, no afectaría ningún asentamiento humano y por tanto, no produciría un desastre.

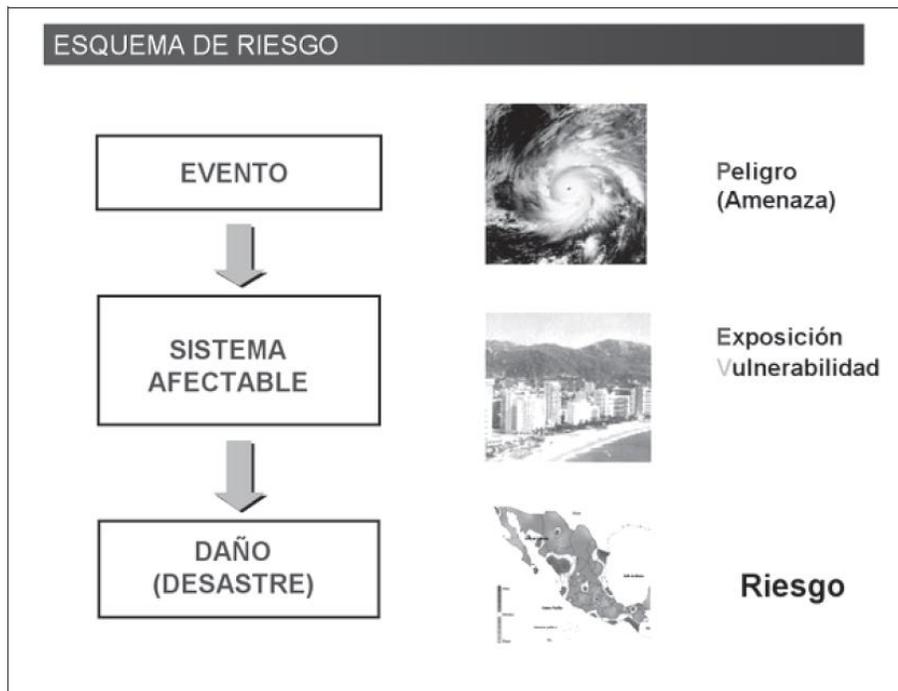


Figura 4.2 Esquema de riesgo. (CENAPRED, 2004)

En términos cualitativos, se entiende por Riesgo la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores.

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. Esta definición se expresa en la siguiente ecuación.

$$R = f(P, V, E) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

- R*, Representa el Riesgo.
- P*, Representa el Peligro
- V*, Representa la vulnerabilidad.
- E*, Representa la exposición.

A continuación se analiza brevemente cada uno de estos conceptos y las características que deben tener en el análisis de riesgo.

Peligro

El Peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. En la mayoría de los fenómenos pueden distinguirse dos medidas, una de magnitud y otra de intensidad. La magnitud es una medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera. La intensidad es una medida de la fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado. Por ello un fenómeno tiene una sola magnitud, pero tantas intensidades como son los sitios en que interese determinar sus efectos. Por ejemplo, en los sismos, la magnitud se define en términos de la energía liberada por el súbito movimiento de las placas tectónicas y se mide en la escala de Richter. La intensidad sísmica refleja, en cambio, el grado de movimiento que experimenta el terreno en un sitio dado, lo que dependerá fundamentalmente de la distancia del sitio al epicentro y de las características del terreno en el sitio. La intensidad se mide a través de la escala de Mercalli. Para algunos fenómenos, la distinción entre magnitud e intensidad no es tan clara, pero en términos generales el peligro está más asociado a la intensidad del fenómeno que a su magnitud, o sea más a las manifestaciones o efectos que el fenómeno puede presentar en el sitio de interés, que a las características básicas del fenómeno mismo. En este sentido, el estudio del peligro lleva a la construcción de escenarios, es decir, a la representación de los efectos del fenómeno en la región de interés.

La forma más común de representar el carácter probabilístico del fenómeno es en términos de un periodo de retorno (o de recurrencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. El concepto de periodo de retorno, en términos probabilísticos, no implica que el proceso sea cíclico, o sea que deba siempre transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. En ocasiones se utiliza también el inverso del periodo de retorno llamada tasa de excedencia, definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad. Para muchos de los fenómenos no es posible representar el peligro en términos de periodos de retorno, porque no ha sido posible contar con la información suficiente para este tipo de representación. En estos casos se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones de uso más común y de más utilidad para las aplicaciones en el tema específico.

Vulnerabilidad

La Vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física del suelo y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse en términos físicos, por ejemplo la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán, a diferencia de la segunda, que puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas. Por ejemplo, una ciudad cuyas edificaciones fueron diseñadas y construidas respetando un reglamento de construcción que tiene requisitos severos para proporcionar seguridad ante efectos sísmicos, es mucho menos vulnerable ante la ocurrencia de un terremoto, que otra en la que sus construcciones no están preparadas para resistir dicho fenómeno. En otro aspecto, una población que cuenta con una organización y preparación para responder de manera adecuada ante la inminencia de una erupción

volcánica o de la llegada de un huracán, por ejemplo mediante sistemas de alerta y planes operativos de evacuación, presenta menor vulnerabilidad que otra que no está preparada de esa forma.

La vulnerabilidad física del suelo se expresa como una probabilidad de daño de un sistema expuesto y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños.

Exposición

La Exposición o Grado de Exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.

El grado de exposición es un parámetro que varía con el tiempo, el cual está íntimamente ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura. En cuanto mayor sea el valor de lo expuesto, mayor será el riesgo que se enfrenta. Si el valor de lo expuesto es nulo, el riesgo también será nulo, independientemente del valor del peligro. La exposición puede disminuir con el alertamiento anticipado de la ocurrencia de un fenómeno, ya sea a través de una evacuación o inclusive evitando el asentamiento en el sitio.

Una vez que se han identificado y cuantificado el peligro, la vulnerabilidad y el grado de exposición para los diferentes fenómenos perturbadores y sus diferentes manifestaciones, es necesario completar el análisis a través de escenarios de riesgo, o sea, representaciones geográficas de las intensidades o de los efectos de eventos extremos. Esto resulta de gran utilidad para el establecimiento y priorización de acciones de mitigación y prevención de desastres. Ejemplos de escenarios de peligro son la representación de los alcances de una inundación con los tirantes máximos de agua que puede tener una zona; distribución de caída de ceniza consecuencia de una erupción volcánica; la intensidad máxima del movimiento del terreno en distintos sitios debido a un sismo. Ejemplos de escenarios de riesgos serían el porcentaje de viviendas de adobe dañadas para un sismo de determinada magnitud y epicentro, el costo de reparación de la infraestructura hotelera por el paso de un huracán, el número de personas que podrían verse afectadas por el deslizamiento de una ladera inestable, etc.

4.4 Metodología para un atlas de riesgo

Partiendo de los conceptos fundamentales de riesgo expresados en la sección anterior, se advierte que la base fundamental para un diagnóstico adecuado de riesgo es el conocimiento científico de los fenómenos (peligros o amenazas) que afectan a una región determinada, además de una estimación de las posibles consecuencias del fenómeno; éstas dependen de las características físicas de la infraestructura existente en la zona, así como de las características socioeconómicas de los asentamientos humanos en el área de análisis.

Así, es posible plantear un procedimiento general para la elaboración de un Atlas de Riesgo el cual puede resumirse en los siguientes pasos:

- Identificación de los fenómenos naturales y antrópicos que pueden afectar una zona en estudio;
- Determinación del peligro asociado a los fenómenos identificados.
- Identificación de los sistemas expuestos y su vulnerabilidad.
- Evaluación de los diferentes niveles de riesgo asociado a cada tipo de fenómeno, tanto natural como antropogénico.
- Integración sistemática de la información sobre los fenómenos naturales y antropogénicos, peligro, vulnerabilidad y riesgo considerando los recursos técnicos y humanos.

Identificación de los fenómenos naturales y antrópicos que pueden afectar una zona en estudio

El riesgo depende de las condiciones específicas de un sitio en estudio, según su ubicación, y de los fenómenos que pueden manifestarse con mayor o menor intensidad. Asimismo, las condiciones de vulnerabilidad de los sistemas expuestos de una región condicionan los niveles de riesgo a que está sometida. Por ello el primer paso para la construcción de un atlas de riesgos es la identificación de los fenómenos que han afectado y por lo tanto podrán afectar un área geográfica. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil reconoce, de acuerdo con su origen, los siguientes agentes perturbadores:

- Fenómenos geológicos
- Fenómenos hidrometeorológicos.
- Fenómenos químicos.
- Fenómenos sanitario-ambientales.
- Socio-organizativos.

Para identificar los fenómenos que afectan una zona en estudio, se debe recurrir a diferentes fuentes de información tales como fuentes bibliográficas, hemerográficas y/o comunicación verbal.

La información anterior debe ser considerada como el punto de partida para la integración de un atlas, y aunque no representa todavía un atlas de riesgos, resulta de gran utilidad para las autoridades de protección civil. La información histórica puede ser representada en mapas temáticos que pueden aprovechar las autoridades de protección civil para tener conocimiento de los sitios que son susceptibles de ser afectados por un fenómeno determinado; asimismo, es la base para estimar la frecuencia con que un fenómeno afecta una zona.

Determinación del peligro asociado a los fenómenos identificados

Una vez identificados los fenómenos que pueden afectar una zona en estudio, se procede a la evaluación del peligro, que consiste en obtener una descripción probabilística de la posible ocurrencia de dichos eventos perturbadores con distintas intensidades. Esto deberá calcularse para cada medida de la intensidad que sea significativa según el tipo de sistema y los modos de falla o daño que se deban incluir en el análisis de riesgo. Dos medidas clásicas asociadas al peligro son el periodo de retorno o bien, la tasa de excedencia. La tasa de excedencia es el número de eventos por unidad de tiempo (generalmente por año) que sobrepasan un cierto nivel de intensidad; el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia y se define como el lapso que, en promedio, hay que esperar para

que ocurra un evento con intensidad superior a una especificada. En lo que se refiere a las medidas de intensidad, éstas son propias de cada fenómeno y están relacionadas con los parámetros con los que se evalúa la vulnerabilidad. Por ejemplo, en el caso del fenómeno sísmico, una medida de intensidad puede ser la aceleración máxima del suelo; para un huracán la velocidad del viento; para la inundación, el tirante acumulado de la precipitación; para una explosión química la energía liberada, etc.

Dependiendo del fenómeno en estudio y la zona en la cual se desea conocer sus efectos, los peligros a los cuales puede estar expuesta la población tendrán un impacto diferente.

Como ejemplo de la evaluación del peligro, en la Figura 4.3 se muestra, para el caso de sismo, la aceleración máxima del terreno correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.



Figura 4.3 Aceleraciones máximas del terreno (en cm/s^2) para un periodo de retorno de 100 años (Gutiérrez C., CENAPRED, 2004)

Identificación de los sistemas expuestos y su vulnerabilidad

Este punto consiste en la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos, los que en la mayoría de los casos, son obras construidas por el hombre; sin embargo, también se cubren los casos de formaciones geológicas naturales, como laderas que pueden deslizarse o mantos de suelo blando que pueden agrietarse y que pueden ocasionar algún tipo de daño.

Para evaluar la vulnerabilidad se pueden utilizar métodos cuantitativos que requieren el empleo de expresiones matemáticas llamadas funciones de vulnerabilidad, que relacionan las consecuencias probables de un fenómeno sobre una construcción, una obra de ingeniería, o un conjunto de bienes o sistemas expuestos con la intensidad del fenómeno que podría generarlas. Así por ejemplo, desde el punto de vista preventivo, en el caso de la vivienda es importante estimar el nivel de daño esperado para un nivel de intensidad dado, de manera que se puedan tomar las medidas preventivas para

disminuir su vulnerabilidad. Si se tratara de una obra civil, como por ejemplo de un hospital, las consecuencias se podrían medir en términos del servicio que dejaría de prestar. En el caso de construcciones destinadas al comercio, las consecuencias tendrían que calcularse, no solamente en términos del daño físico, sino también en términos de las pérdidas indirectas, es decir, aquellas que se derivan del mal funcionamiento de la construcción a consecuencia de los daños físicos. Para generar las funciones de vulnerabilidad correspondientes, se deberá hacer una selección cuidadosa de los parámetros de intensidad generados por un fenómeno, de manera tal que tengan una adecuada correlación con las consecuencias que de ellos se derivan. Asimismo, se debe realizar una clasificación de los sistemas expuestos, por ejemplo, de acuerdo a su sistema estructural un grupo de construcciones puede clasificarse de acuerdo a la tabla 4.1.

| | |
|-----------|--|
| Tipo I. | Casas para habitación unifamiliar, construidas con muros de mampostería simple o reforzada, adobe, madera o sistemas prefabricados. |
| Tipo II. | Edificios para vivienda, oficinas y escuelas, construidos con concreto reforzado, acero, mampostería reforzada o sistemas prefabricados. |
| Tipo III. | Construcciones especiales: teatros y auditorios, iglesias, naves industriales, construcciones antiguas. |
| Tipo IV. | Sistemas de gran extensión o con apoyos múltiples: puentes. |
| Tipo V. | Tuberías superficiales o enterradas. |

Tabla 4.1 Clasificación de construcciones de acuerdo a su sistema estructural. (CENAPRED, I. de I., 2003)

Normalmente, una función de vulnerabilidad tiene la forma mostrada en la Figura.4.4.

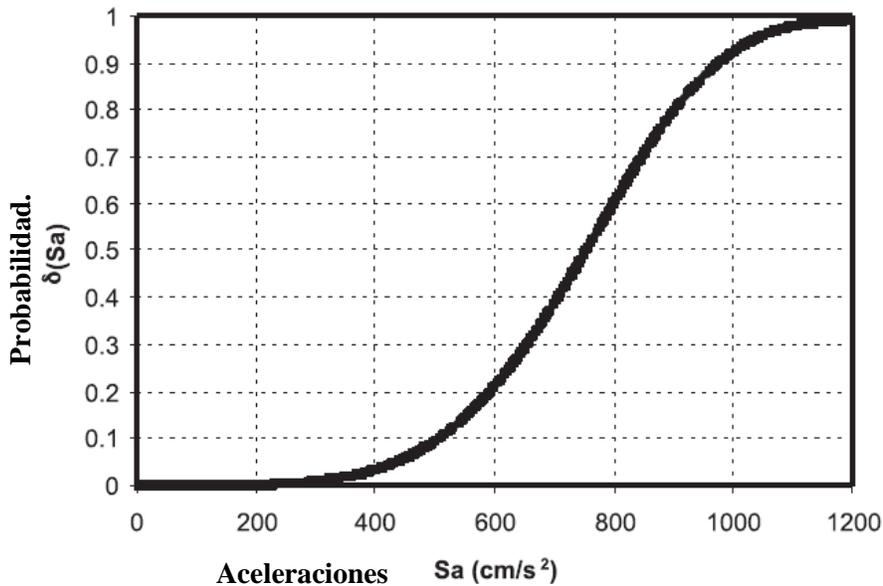


Figura 4.4 Función de daño físico para estructuras de mampostería adecuadamente confinada de tres o cuatro niveles y localizadas en la zona sísmica D del mapa de regionalización sísmica de CFE. (CENAPRED, Instituto de Ingeniería UNAM, 2003)

Esta función relaciona un parámetro de intensidad sísmica (eje horizontal), como la aceleración espectral, con los daños que este parámetro puede ocasionar en viviendas de tres o cuatro pisos construidas con mampostería confinada que se localizan en zona de muy alto peligro sísmico (zona D del mapa de regionalización sísmica de la CFE). En la Figura, cero significa daño nulo y uno significa pérdida total de la construcción.

Evaluación de los diferentes niveles de riesgo asociado al tipo de fenómeno.

En términos generales, el riesgo es una función matemática denominada “convolución” del peligro y la vulnerabilidad. Para fines de protección civil una de las herramientas de mayor utilidad para la toma de decisiones es la construcción de escenarios en los que se detecten las zonas con niveles elevados de riesgo, en términos, por ejemplo, de las pérdidas monetarias derivadas de las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de un fenómeno. Otras medidas de riesgo pueden ser, los metros cuadrados perdidos de construcción, el número de vidas humanas perdidas, etc. Así, por ejemplo, en la Figura 4.5 se encuentra un escenario en el que se muestran las pérdidas, en pesos, debidas a la inundación que se generaría en un poblado asentado en la zona aledaña a un río si se presentara una precipitación con un periodo de retorno de cinco años.

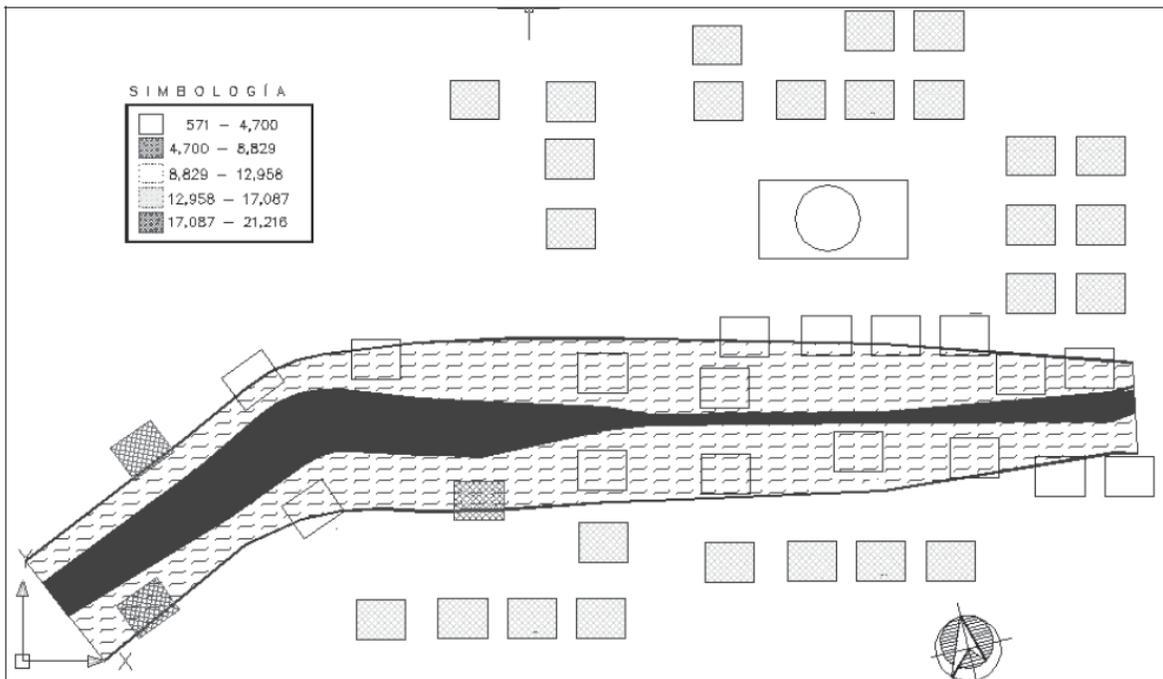


Figura 4.5 Mapa de riesgo por inundación para un periodo de retorno de 5 años (pérdidas calculadas). (CENAPRED, 2004)

Es claro que con la ayuda de este escenario, las autoridades de protección civil podrían detectar las viviendas que deben ser reubicadas, tanto para evitar la pérdida de vidas como de daños materiales.³⁶

³⁶ CENAPRED. (2004). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. México, D.F.

Mapas de Peligro

Son mapas que representan de manera gráfica la distribución de las características de los fenómenos perturbadores con base en conocimientos científicos y en datos estadísticos y probabilísticos. En éstos se contemplan estudios sobre diferentes fenómenos de origen natural o antropogénico, que conducen a la determinación del nivel cuantitativo del peligro o amenazas que existen en un lugar específico (municipio, estado o país). Los estudios de peligro se basan en información sobre el medio físico y pueden realizarse a distintas escalas. Diversos centros de investigación y diversas instituciones han elaborado mapas de peligro a nivel nacional, generalmente a escalas menores. En la Figura 4.6 se presenta el ejemplo de un mapa de zonificación de velocidades de viento, que es de utilidad para realizar el diseño estructural de edificaciones por viento.

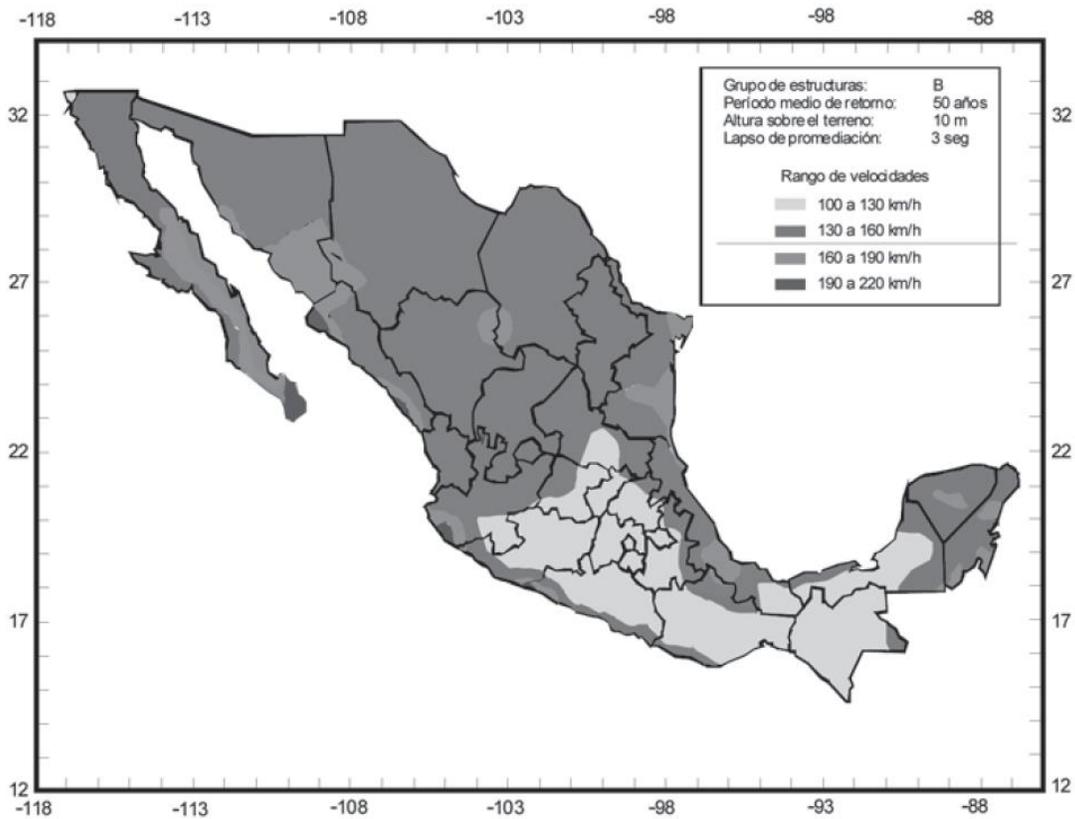


Figura 4.6 Zonificación de velocidades de viento máximas CFE. (CENAPRED, 2004)

La expresión de un peligro representado en un mapa asocia su distribución espacial en el territorio con la probabilidad de su ocurrencia en un lapso de tiempo. En términos generales, este tipo de mapas representan la intensidad del fenómeno de estudio, mediante una clasificación asociada a una escala de colores, con una base cartográfica, que puede ser una carta topográfica, la división estatal o municipal de la zona o inclusive con rasgos de infraestructura como caminos o presas.

A partir de una revisión y análisis del contenido de diversos atlas estatales y municipales de riesgo del país se encontró que, en el mejor de los casos, éstos, son una colección de mapas y cartografía de peligro, los cuales, si bien representan un avance significativo, ya que son la base para la integración de otros elementos que inciden en la distribución espacial y temporal del riesgo de desastre no hacen referencia a las pérdidas o daños esperados por el impacto de fenómenos.

Mapas de Riesgo

Es conveniente aclarar el uso dado a la palabra riesgo, que, en su significado más general según la Real Academia de la Lengua Española significa “aquel evento que implica la proximidad de un daño, desgracia o contratiempo que puede afectar la vida de los hombres”. Este significado tiene diferentes connotaciones, y se aplica a temas tan diversos como la economía, el medio ambiente, la delincuencia, de ahí que su significado se ha extendido a casi la mayoría las actividades humanas, y prevalezca cierta confusión en denominar al peligro como riesgo y viceversa.

Sin embargo, para fines de protección civil, el riesgo de desastres está muy claramente definido, entre otros por las Naciones Unidas, que lo caracteriza como “el grado de pérdida previsto en un sistema determinado, debido a un fenómeno natural definido y en función tanto del peligro natural como de la vulnerabilidad”.

De acuerdo con la definición anterior, mapas de riesgo son aquellos que representan gráficamente en una base cartográfica, la probabilidad de incidencia de un fenómeno o de varios, sus características e intensidades, y de qué manera influyen en los diferentes tipos de ámbitos, sean estos geográficos (localidad o región) geopolíticos (municipio, estado, país), fisiográficos (tipo de suelo, vegetación) o aquellos caracterizados por la actividad humana (población, vivienda, infraestructura y agricultura). Un ejemplo de un mapa de riesgo se presenta en la Figura 4.7, con un escenario hipotético de riesgo sobre la ciudad de Colima, evaluando a la vivienda como el sistema de estudio (sistema afectable), en el mapa se presenta como fondo una malla que representa las aceleraciones del terreno debidas a un sismo, asociado a un periodo de retorno específico, muestra a nivel de predio el índice de riesgo en términos de la probabilidad de daños para diferentes tipos de vivienda.

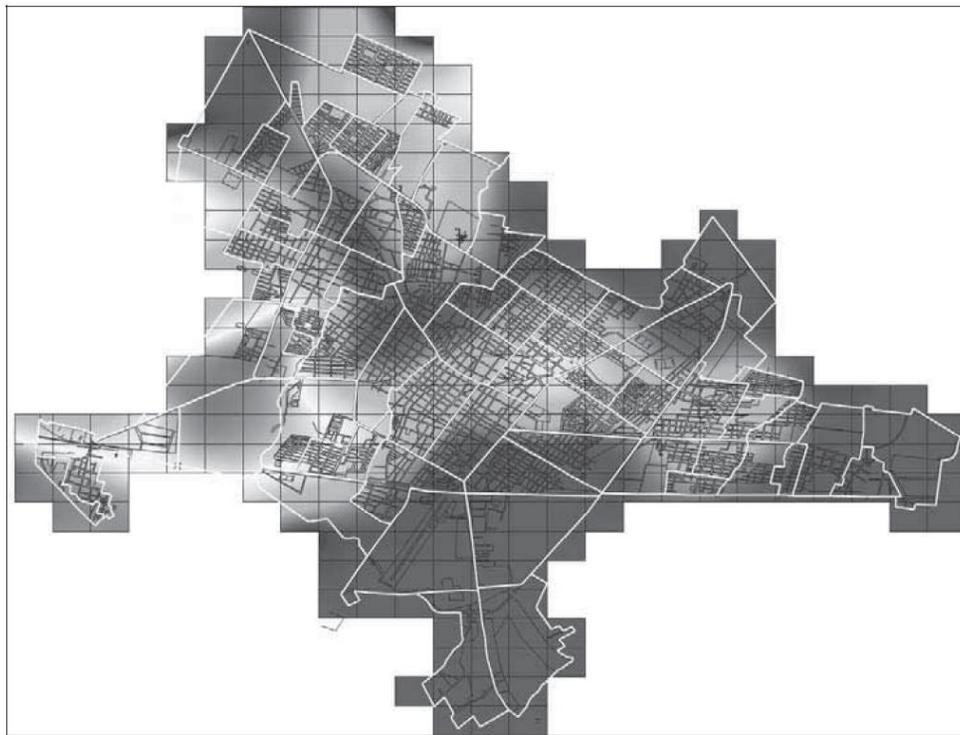


Figura 4.7 Mapa de riesgo de la ciudad de Colima, generado mediante un sistema que permite realizar diferentes análisis sobre peligro, vulnerabilidad y riesgo (Objetos de Riesgo). (CENAPRED, 2004)

Para la estimación del riesgo se necesita determinar las consecuencias potenciales de un fenómeno destructivo. Esto implica, entre otras cosas, conocer las características físicas de la infraestructura existente, así como las condiciones sociales y económicas de la región de estudio, donde el análisis y la clasificación pueden ser complejos, esto se realiza habitualmente para zonas con un área determinada, (zonas definidas donde se establezcan parámetros de control). No obstante, con la incorporación de nuevas tecnologías para el manejo y análisis de la información, se tenderá a integrar estimaciones que podrán abarcar coberturas geográficas más extensas.

Es importante mencionar que para la elaboración de mapas que impliquen la valoración del riesgo, se deberá tener información confiable y homogénea, debido a la complejidad de simular la interacción entre las amenazas, el entorno físico y la vulnerabilidad física del suelo y social. Se pueden lograr aproximaciones con mapas de índices de riesgo, donde sin llegar a cuantificar el costo esperado de un fenómeno se determina a través de un modelo físico-matemático la probabilidad del riesgo, involucrando al peligro, a la vulnerabilidad y al sistema estudiado, mediante simplificaciones que requieren validación y calibración previas. Estos modelos son desarrollados por instituciones de investigación del país, entre las que se encuentra el Instituto de Ingeniería de la UNAM y otros, quienes han desarrollado diversas investigaciones sobre estos temas, sin embargo, la calibración de los mismos se deberá hacer tras evaluar los daños y pérdidas ocasionados por un fenómeno y compararlos con los resultados obtenidos de escenarios previos, de estas comparación, los modelos serán mejorados y se acercarán más a la realidad.

5 CASO DE ESTUDIO.

En este capítulo se evaluará el riesgo en una subcuenca de la República Mexicana, que nace en el estado de Oaxaca y desemboca en el estado de Puebla. Dicha subcuenca pertenece a la región hidrológica número 18 conocida como la región del Balsas.

Se comenzará delimitando la zona de estudio y se describirá algunas particularidades de la subcuenca, como: los estados en los que se localiza, los municipios que abarca, la vegetación en la región y la precipitación mensual media que se registra en la misma.

También se calcularán las principales características fisiográficas de la cuenca como el área, el perímetro, el centroide, la pendiente, la red de drenaje, el cauce principal, la elevación media, así como la curva hipsométrica, con el objetivo de conocer la influencia en el comportamiento de la subcuenca. Estos parámetros se calcularon con apoyo de Software comercial e información disponible de libre acceso, lo que requiere una correcta interpretación de los datos que alimentan al programa, así como sus resultados.

En la tercera parte del capítulo el objetivo es calcular la erosión hídrica, para poder hacerlo se deberá realizar un análisis de la información disponible de precipitación en la zona de estudio, esto porque dicha información es de vital importancia para poder evaluar que metodología se utilizará para calcular el factor más importante de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE), que es el factor de precipitación (R). Posterior a esto se calcularán los factores de erodabilidad del suelo (K), Longitud – Pendiente (LS), Cobertura vegetal (C) y Prácticas de conservación (P).

Para cada factor se generará un mapa y con ayuda de software comercial se aplicará el álgebra de mapas para conocer la erosión hídrica en nuestra subcuenca y llevar a cabo su evolución.

Finalmente, se determinarán las vulnerabilidades físicas de la subcuenca que servirán para la superposición del mapa de amenaza, y con el álgebra de mapas se conocerá el nivel de riesgo en la cuenca.

5.1 Descripción de la zona

De conformidad con el artículo 7 del Reglamento Interior de la Conagua (órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México), publicado el 30 de noviembre de 2006, el director general tiene atribuciones para determinar la circunscripción territorial de los organismos de cuenca.

La Conagua desempeña sus funciones a través de 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las regiones hidrológico-administrativas. Consecuentemente, el país se ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas (Figura. 5.1), formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos. Los límites de las regiones respetan la división política municipal, para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos.³⁷



Figura 5.1 Regiones Hidrológico Administrativas. (Elaboración Propia, 2018)

³⁷ CONAGUA. (2015). Atlas del agua en México 2015. México.

Las 13 regiones hidrológicas administrativas de acuerdo con la Figura 5.1 se presentan en la siguiente Tabla 5.1.

| Clave | RHA | Superficie Continental [km ²] |
|-------------|------------------------------|---|
| I | Península de Baja California | 154 259 |
| II | Noroeste | 196 326 |
| III | Pacífico Norte | 152 007 |
| IV | Balsas | 116 439 |
| V | Pacífico Sur | 82 775 |
| VI | Río Bravo | 390 440 |
| VII | Cuencas Centrales del Norte | 187 621 |
| VIII | Lerma Santiago Pacífico | 192 722 |
| IX | Golfo Norte | 127 064 |
| X | Golfo Centro | 102 354 |
| XI | Frontera Sur | 99 094 |
| XII | Península de Yucatán | 139 827 |
| XIII | Aguas del Valle de México | 18 229 |

Tabla 5.1 Regiones Hidrológico Administrativas. (CONAGUA, 2015)

Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve. Para propósitos de administración de las aguas nacionales, la Conagua ha definido 731 cuencas hidrológicas, cuyas disponibilidades se encuentran publicadas en el Diario Oficial de la Federación. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH), cuya distribución en el país es la que se muestra en la Figura 5.2 resaltando la región del Balsas a la cual pertenece nuestra cuenca en estudio.

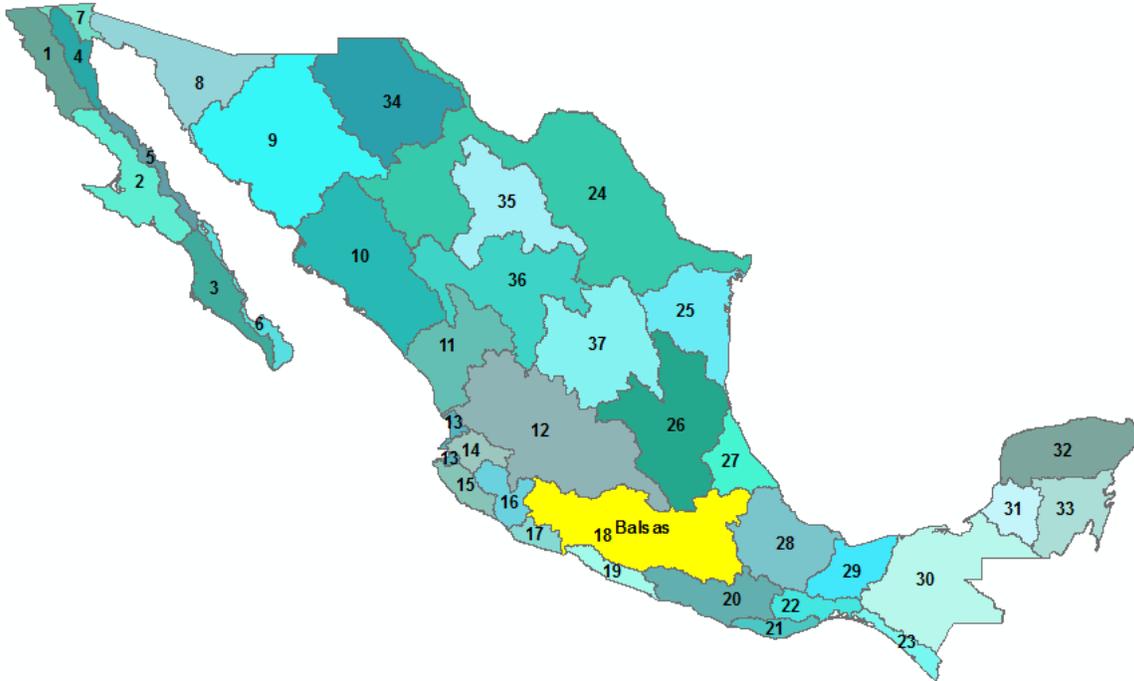


Figura 5.2 Región Hidrológica 18 Balsas (Elaboración Propia, 2018)

Las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México y se emplean para el cálculo del agua renovable. Cuya extensión territorial continental se muestra en la Tabla. 5.2

| Clave | Nombre | Extensión Territorial Continental [km ²] |
|-------|--------------------|--|
| 1 | B.C. Noroeste | 28 492 |
| 2 | B.C. Centro Oeste | 44 314 |
| 3 | B.C. Suroeste | 29 722 |
| 4 | B.C. Noreste | 14 418 |
| 5 | B.C. Centro Este | 13 626 |
| 6 | B.C. Sureste | 11 558 |
| 7 | Rio Colorado | 6 911 |
| 8 | Sonora Norte | 61 429 |
| 9 | Sonora Sur | 139 370 |
| 10 | Sinaloa | 103 483 |
| 11 | Presidio-San Pedro | 51 711 |
| 12 | Lerma Santiago | 132 916 |
| 13 | Huicicila | 5 225 |
| 14 | Rio Ameca | 12 255 |
| 15 | Costa de Jalisco | 12 967 |
| 16 | Armeria-Coahuayana | 17 628 |
| 17 | Costa de Michoacán | 9 205 |
| 18 | Balsas | 118 268 |

| | | |
|----|----------------------------|---------|
| 19 | Costa Grande de Guerrero | 12 132 |
| 20 | Costa Chica de Guerrero | 39 936 |
| 21 | Costa de Oaxaca | 10 514 |
| 22 | Tehuantepec | 16 363 |
| 23 | Costa de Chiapas | 12 293 |
| 24 | Bravo Conchos | 229 740 |
| 25 | San Fernando Soto La Mar. | 54 961 |
| 26 | Panuco | 96 989 |
| 27 | Norte de Veracruz | 26 592 |
| 28 | Papaloapan | 57 335 |
| 29 | Coatzacoalcos | 30 217 |
| 30 | Grijalva-Usumacinta | 102 465 |
| 31 | Yucatán Oeste | 25 443 |
| 32 | Yucatán Norte | 58 135 |
| 33 | Yucatán Este | 38 308 |
| 34 | Cuencas Cerradas del Norte | 90 829 |
| 35 | Mapimí | 62 639 |
| 36 | Nazas Aguanaval | 93 032 |
| 37 | El Salado | 87 801 |

Tabla 5.2 Extensión Territorial de las 37 Regiones Hidrológicas. (CONAGUA, 2015)

La Región Hidrológica número 18 Balsas (Figura 5.3), se localiza al Suroeste de nuestro país, está limitado al Norte por las Regiones Hidrológicas número 12 Lerma-Santiago, número 26 Río Pánuco y número 27 Norte de Veracruz, al Oeste por las Regiones hidrológicas número 16 Armería-Coahuayana y 17 Costa de Michoacán, al Sur por el Océano Pacífico y por las Regiones Hidrológicas número 19 Costa Grande de Guerrero y 20 Costa Chica de Guerrero, y al Este por la Región Hidrológica número 28 Papaloapan.



Figura 5.3 Región Hidrológica 18 Balsas. (Elaboración Propia, 2018)

La Región Hidrológica número 18 Balsas se localiza entre los paralelos 17° 13' y 20° 04' de latitud Norte y los meridianos 97° 25' y 103° 20' de longitud Oeste. Cuenta con una superficie hidrológica de 117,405 kilómetros cuadrados, equivalente al 6% del territorio nacional

La Región Hidrológica número 18 Balsas (Figura 5.4), incluye en su totalidad al Estado de Morelos (100%) y parcialmente a los Estados de Tlaxcala (75%), Puebla (55%), México (36%), Oaxaca (9%), Guerrero (63%), Michoacán (62%) y Jalisco (4%), así como muy pequeñas porciones del Distrito Federal y del Estado de Veracruz; con un total de 422 municipios y una superficie total de 117,305.9 kilómetros cuadrados.



Figura 5.4 Localización de la RH18 Balsas. (Elaboración Propia, 2018)

Para el análisis del escurrimiento en la Región Hidrológica número 18 Balsas, ésta se ha integrado en cuencas hidrológicas, la división se realizó a partir de las condiciones físicas que las definen y de las estructuras de control existentes, ya sean presas o estaciones hidrométricas (Tabla 5.3).

| N | Cuenca | Clave |
|----|------------------------------|-------|
| 1 | Río Tepalcatepec | RH18J |
| 2 | Río Cutzamala | RH18G |
| 3 | Río Tepalcatepec-Infiernillo | RH18I |
| 4 | Río Atoyac | RH18A |
| 5 | Río Tacambaro | RH18H |
| 6 | Río Grande de Amacuzac | RH18F |
| 7 | Río Balsas-Zirándalo | RH18C |
| 8 | Río Balsas-Infiernillo | RH18D |
| 9 | Río Balsas-Mezcala | RH18B |
| 10 | Río Tlapaneco | RH18E |

Tabla 5.3 Cuencas hidrológicas de la RH18. (Elaboración Propia, 2018)

Las cuencas se muestran en la Figura 5.5, resaltando en color amarillo la cuenca hidrológica Río Alto Atoyac (RH18A) donde se encuentra la zona de estudio.



Figura 5.5 Cuencas hidrológicas de la RH18. (Elaboración Propia, 2018)

La cuenca Hidrológica Río Alto Atoyac comprende desde el nacimiento de los escurrimientos del Río Atoyac, hasta la presa Manuel Avila Camacho (Valsequillo).

La cuenca hidrológica Río Alto Atoyac, tiene una superficie de aportación de 4,135.52 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada por las subcuencas. Tabla 5.4

| N | Subcuenca | Clave |
|----|------------------------------------|--------|
| 1 | Río Atoyac – Tehuitzingo | RH18Aa |
| 2 | Río Atoyac – Balcón del diablo | RH18Ab |
| 3 | Presa Miguel Ávila Camacho | RH18Ac |
| 4 | Río Atoyac – San Martín Texmelucan | RH18Ad |
| 5 | Río Nexapa | RH18Ae |
| 6 | Río Mixteco | RH18Af |
| 7 | Río Acatlán | RH18Ag |
| 8 | Lago Totolzingo | RH18Ah |
| 9 | Río Zahuapan | RH18Ai |
| 10 | Río Alceseca | RH18Aj |

Tabla 5.4 Subcuencas hidrológicas de la RH18A. (Elaboración Propia, 2018)

Finalmente, la Figura 5.6, muestra la zona de estudio (subcuenca RH18Fa), “Río Mixteco”, la cual se indica en color amarillo.

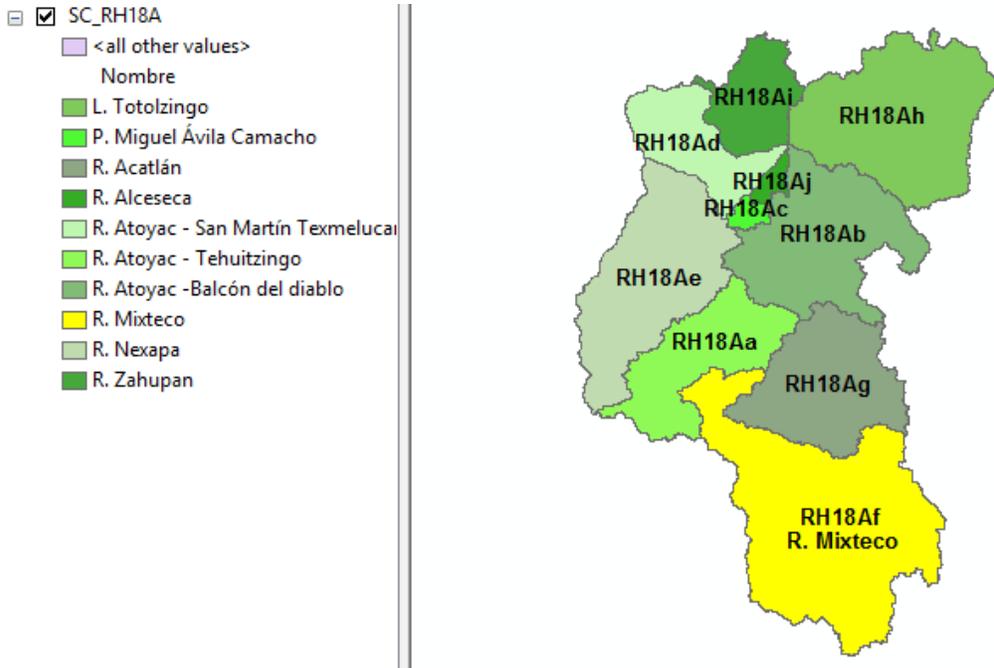


Figura 5.6 Subcuencas hidrológicas de la RH18A. (Elaboración Propia, 2018)

La subcuenca Rh18Af “Río Mixteco” tiene una extensión de 7 727.93 km² entre los estados de Oaxaca y Puebla. La cuenca nace en el estado de Oaxaca donde se encuentra la mayor parte de su territorio con un 87 % del área total que equivale a 6 723.30 km² y finalmente desemboca en el estado de Puebla con un 13 % del área total que equivale a 1 004.63 km² (Figura 5.7)

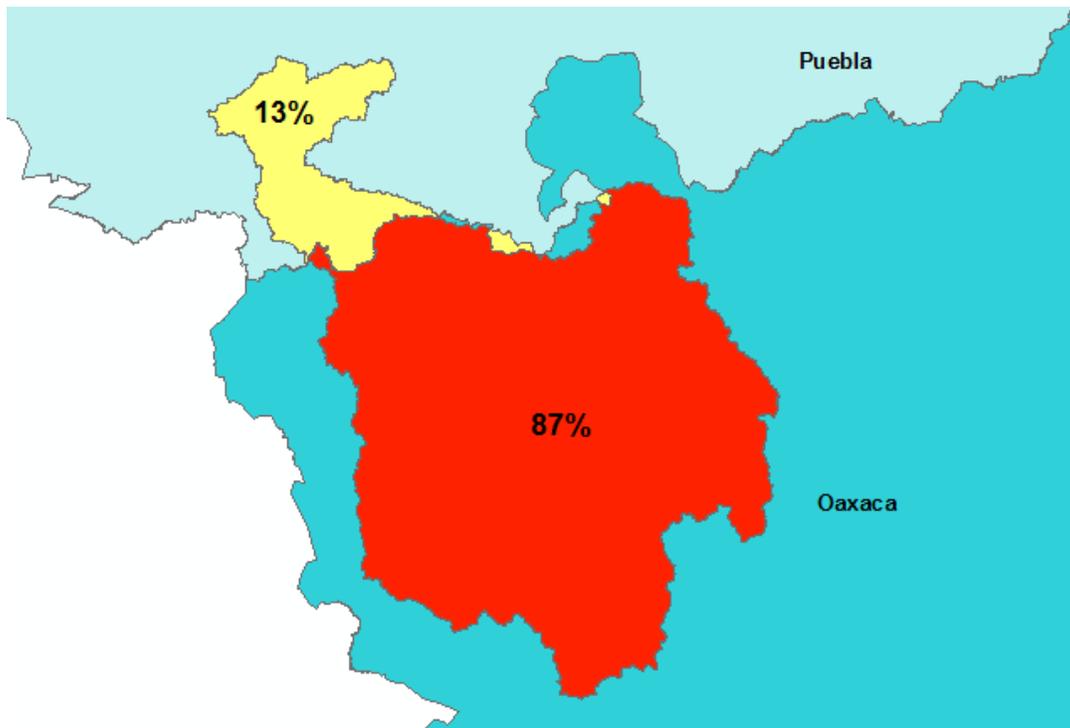


Figura 5.7 Área estatal de la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Los municipios que forman parte de la cuenca, aunque algunos de ellos no los cubra en su totalidad son 108, de los cuales 15 pertenecen al estado de Puebla y 93 al estado de Oaxaca como lo muestran las Tablas 5.5, 5.6 y la Figura 5.8.

Municipios en el estado de Puebla:

| N | Municipios |
|----|--------------------------|
| 1 | Tulcingo |
| 2 | San Pablo Anicano |
| 3 | Guadalupe |
| 4 | Axutla |
| 5 | Tehuizingo |
| 6 | Piactla |
| 7 | Tecomatlán |
| 8 | San Pedro Yeloixtlahuaca |
| 9 | Chiautla |
| 10 | Chila de la Sal |
| 11 | San Miguel Ixtlán |
| 12 | Chila |
| 13 | Chinantla |
| 14 | Ahuehuetitla |
| 15 | Acatlán |

Tabla 5.5 Municipios del estado de Puebla (Elaboración Propia, 2018)

Municipios que forman parte de la cuenca RH18Af

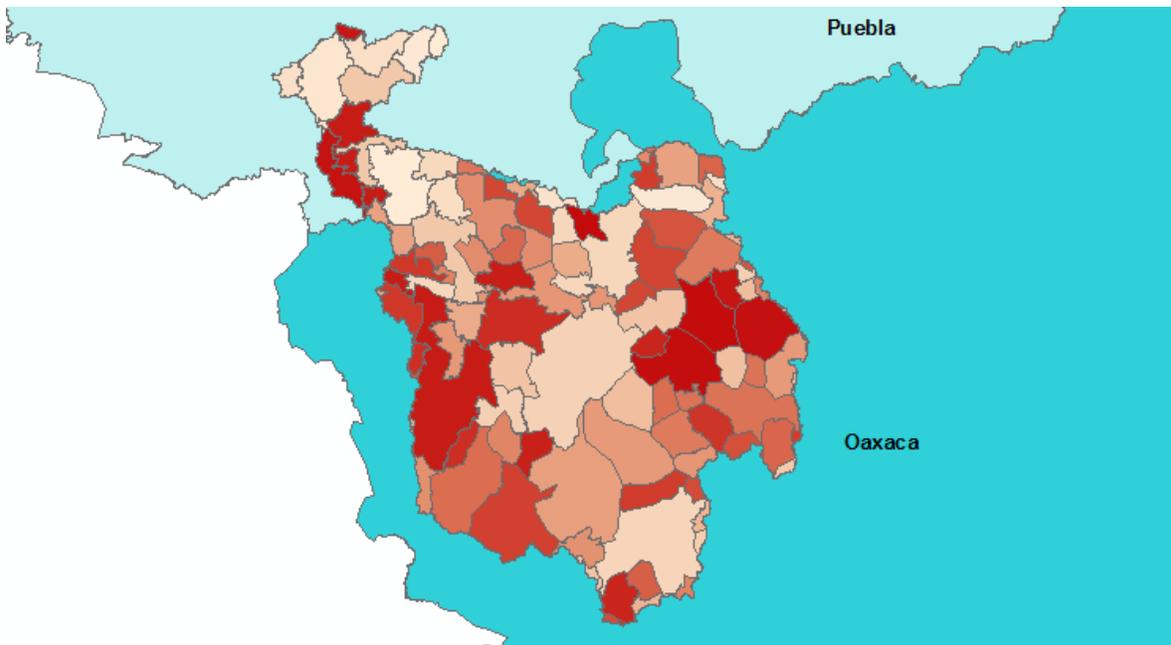


Figura 5.8 División Municipal de la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Municipios en el estado de Oaxaca:

| N | Municipios | N | Municipios | N | Municipios |
|----|-----------------------------------|----|-------------------------------------|----|--|
| 1 | San Pedro Yucunama | 32 | San Esteban Atatlahuca | 63 | San Miguel el Grande |
| 2 | Villa de Tamazulápam del Progreso | 33 | San Agustín Atenango | 64 | Santa Cruz de Bravo |
| 3 | Santo Domingo Tonaltepec | 34 | Santa María Nativitas | 65 | Santa María del Rosario |
| 4 | San Francisco Teopan | 35 | Teotongo | 66 | Santiago del Río |
| 5 | San Francisco Tlapancingo | 36 | San Juan Bautista Suchitepec | 67 | San Miguel Amatitlán |
| 6 | Santa Catarina Tayata | 37 | San Simón Zahuatlán | 68 | San Sebastián Tecomaxtlahuaca |
| 7 | La Trinidad Vista Hermosa | 38 | San Juan Bautista Coixtlahuaca | 69 | Santo Tomás Ocotepec |
| 8 | San Juan Teposcolula | 39 | San Antonino Monte Verde | 70 | Santiago Nejapilla |
| 9 | San Miguel Tulancingo | 40 | San Cristóbal Suchixtlahuaca | 71 | San Antonio Sinicahua |
| 10 | San Juan Cieneguilla | 41 | Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz | 72 | San Miguel Tlacotepec |
| 11 | Santa María Camotlán | 42 | San Martín Itunyoso | 73 | Fresnillo de Trujano |
| 12 | Mariscala de Juárez | 43 | Santiago Tamazola | 74 | San Juan Mixtepec |
| 13 | Santiago Huajolotitlán | 44 | Ixpantepec Nieves | 75 | San Marcos Arteaga |
| 14 | Villa de Chilapa de Díaz | 45 | San Vicente Nuñú | 76 | Santiago Ayuquillilla |
| 15 | San Martín Huamelúlpam | 46 | Santiago Miltepec | 77 | San Jorge Nuchita |
| 16 | San Andrés Dinicuiti | 47 | Guadalupe de Ramírez | 78 | San Jerónimo Silacayoapilla |
| 17 | San José Ayuquila | 48 | San Pedro Topiltepec | 79 | Magdalena Peñasco |
| 18 | Santiago Yolomécatl | 49 | Santiago Cacaloxtepc | 80 | San Pedro Mártir Yucuxaco |
| 19 | Villa Tejúpam de la Unión | 50 | San Antonio Acutla | 81 | Santiago Nuyoó |
| 20 | Santa Magdalena Jicotlán | 51 | San Pedro Nopala | 82 | San Bartolo Soyaltepec |
| 21 | San Nicolás Hidalgo | 52 | Santo Domingo Yodohino | 83 | Heroica Villa Tezoatlán de Segura y Luna, Cuna de la Independencia de Oaxaca |
| 22 | Santa Cruz Tacache de Mina | 53 | Santiago Nundiche | 84 | Asunción Cuyotepeji |
| 23 | San Lorenzo Victoria | 54 | San Pedro y San Pablo Teposcolula | 85 | Santa Cruz Tayata |
| 24 | San Martín Zacatepec | 55 | Santos Reyes Yucuná | 86 | San Juan Ihualtepec |
| 25 | San Pedro y San Pablo Tequixtepec | 56 | San Juan Ñumí | 87 | Santa María Nduayaco |
| 26 | San Cristóbal Amoltepec | 57 | Santa María Yucuhiti | 88 | Santiago Juxtlahuaca |
| 27 | San Andrés Lagunas | 58 | Zapotitlán Palmas | 89 | Concepción Buenavista |
| 28 | Santiago Yucuyachi | 59 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 90 | Santos Reyes Tepejillo |
| 29 | Santo Domingo Yanhuatlán | 60 | Santa Cruz Nundaco | 91 | Silacayoápam |
| 30 | Santa Catarina Zapoquila | 61 | Santo Domingo Tonalá | 92 | Heroica Ciudad de Huajuapán de León |
| 31 | San Sebastián Nicananduta | 62 | San Martín Peras | 93 | Putla Villa de Guerrero |

Tabla 5.6 Municipios del estado de Oaxaca (Elaboración Propia, 2018)

La vegetación es un aspecto importante ya que está relacionada con los usos de suelo. A través del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas hidrográficas (SIATL) se pudo consultar que en la cuenca RH18Af “Río Mixteco” existe la siguiente vegetación: selva caducifolia, bosque de coníferas, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo y vegetación inducida. Además de usos de

suelo como agrícola, pecuaria, forestal, zona urbana, asentamientos humanos y cuerpos de agua como se muestra en la Figura 5.9.

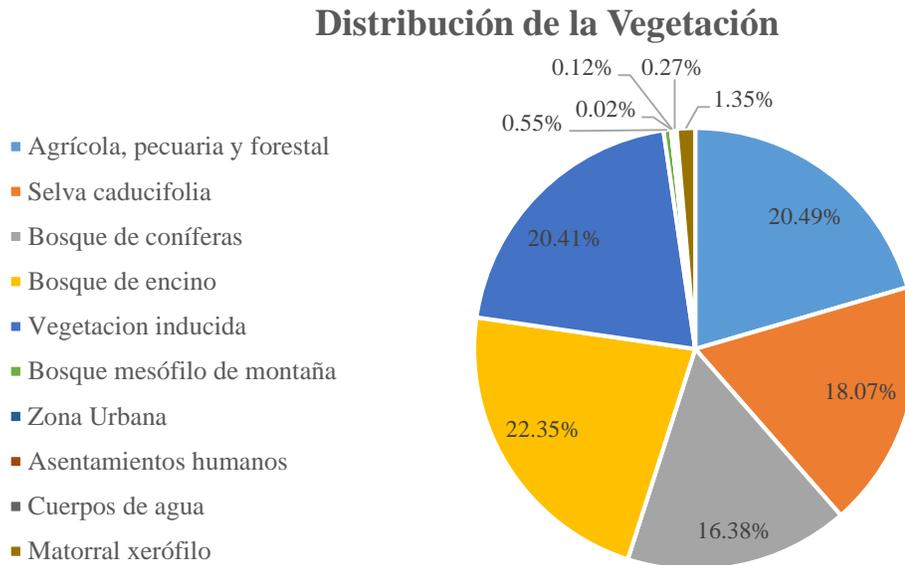


Figura 5.9 Distribución de la vegetación. (SIATL, 2017)

La plataforma SIATL también proporciona las áreas aproximadas de cada uso de suelo en la cuenca, se muestran en la Tabla 5.7.

| Vegetación y uso de suelo | % Área | Área [Km ²] |
|-------------------------------|--------|-------------------------|
| Agrícola, pecuaria y forestal | 20.49% | 1583.31 |
| Selva caducifolia | 18.07% | 1396.81 |
| Bosque de coníferas | 16.38% | 1265.58 |
| Bosque de encino | 22.35% | 1727.03 |
| Vegetación inducida | 20.41% | 1577.31 |
| Bosque mesófilo de montaña | 0.55% | 42.33 |
| Zona Urbana | 0.02% | 1.30 |
| Asentamientos humanos | 0.12% | 9.27 |
| Cuerpos de agua | 0.27% | 20.63 |
| Matorral xerófilo | 1.35% | 104.35 |

Tabla 5.7 Distribución de áreas de la vegetación y uso de suelo. (SIATL, 2017)

En la Región Hidrológica número 18 Balsas, se precipitan en promedio 929 milímetros de lluvia anualmente, misma que se presenta principalmente durante los meses de mayo a octubre, lo que dificulta el aprovechamiento dado el carácter torrencial en la generalidad de los casos y lo abrupto del territorio de la región. En la Figura 5.10, se presenta la distribución mensual de la lluvia

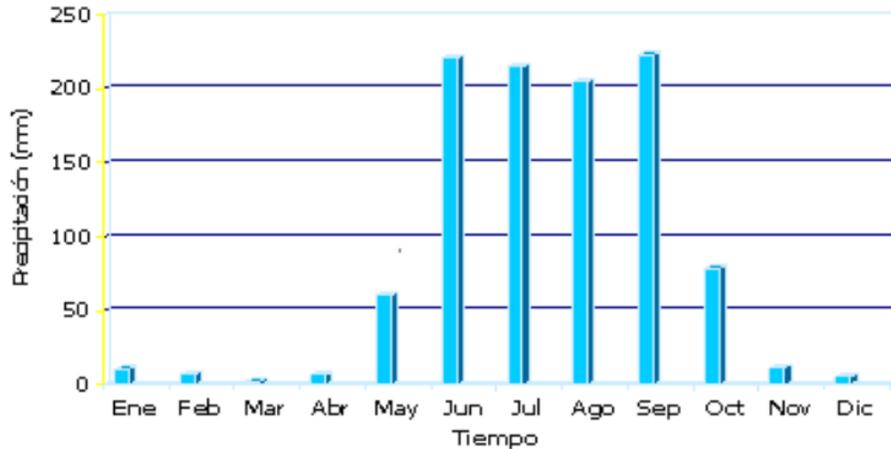


Figura 5.10 Distribución mensual de la lluvia. (CONAGUA, 2010)

Esta distribución de la precipitación en la región hidrológica, es típica de la mayoría de las cuencas en el país. Como se puede observar, la mayor precipitación se presenta en los meses de junio y septiembre, presentándose una baja en el mes de agosto. Durante el mes de marzo, es cuando se presentan las condiciones de sequía más severa en la cuenca, sobre todo porque desde el mes de noviembre se presenta una baja sensible de la precipitación. En la Figura 5.11 se muestran las curvas de igual precipitación (Isoyetas).

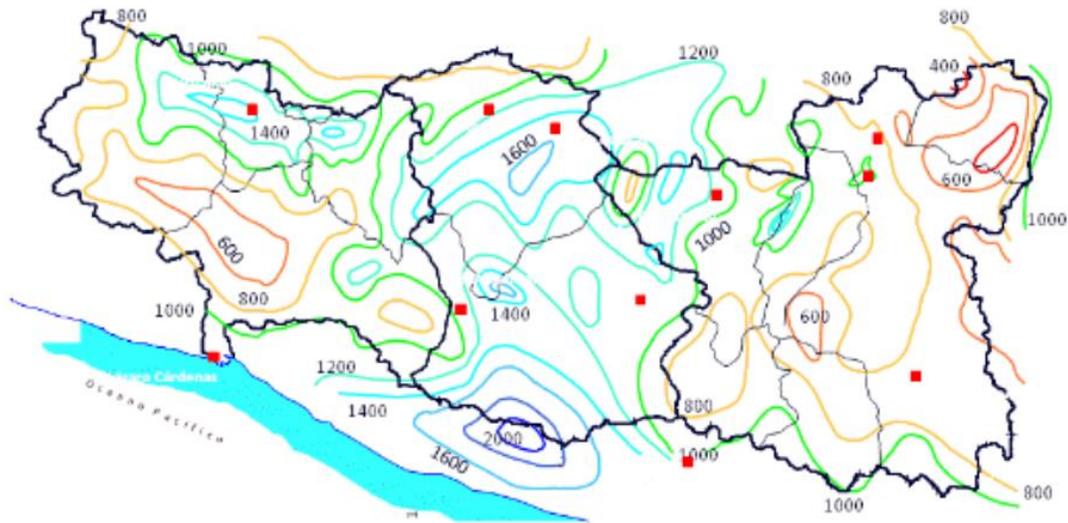


Figura 5.11 Curvas de igual precipitación. (SIATL, 2017)

Como se puede observar, se tienen lluvias extremas de 2,000 milímetros anuales en la montaña de Guerrero y hasta de 400 milímetros en el norte del Estado de Tlaxcala. Cabe resaltar las grandes zonas de precipitaciones de 600 milímetros que se presentan en la región mixteca de los Estados de Oaxaca y Puebla. Este comportamiento de la precipitación, se debe en parte a la presencia de las formaciones montañosas que la delimitan, ya que éstas restringen el paso del aire húmedo proveniente, tanto del Océano Pacífico, como del Golfo de México.

5.2 Características Fisiográficas

Área y Perímetro

Para el cálculo de las características fisiográficas de la cuenca RH18Af “Río Mixteco” se utilizó el software ArcGis, que es una herramienta eficaz para analizar, crear, almacenar, calcular y manipular modelos digitales y mapas, para poderlos integrar en un sistema de información geográfica. También se hizo uso de información digital, como modelos de elevación y datos espaciales obtenidos de INEGI a través del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas hidrográficas (SIATL).

De acuerdo con la plataforma SIATL, la subcuenca RH18Af “Río Mixteco” tiene una extensión de 7 727 km² y un perímetro de 657.98 km (Tabla 5.8).

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|-----------|-----------|-----------------|
| Área | 7 727 | km ² |
| Perímetro | 657.98 | Km |

Tabla 5.8 Área y perímetro de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Para el cálculo de las características fisiográficas es esencial proyectar la superficie de la subcuenca en un sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), la cual corresponde a la zona 14 N puesto que la subcuenca se localiza entre los estados de Oaxaca y Puebla. (Figura 5.12).

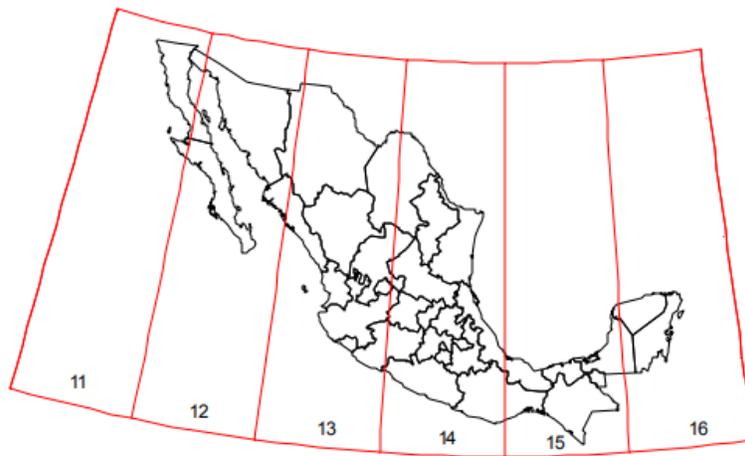


Figura 5.12 Zonas UTM de México. (SEMARNAT, 2011)

Centroide

A continuación, se presenta la ubicación del centroide en coordenadas UTM obtenido mediante ArcGis (Figura 5.13).

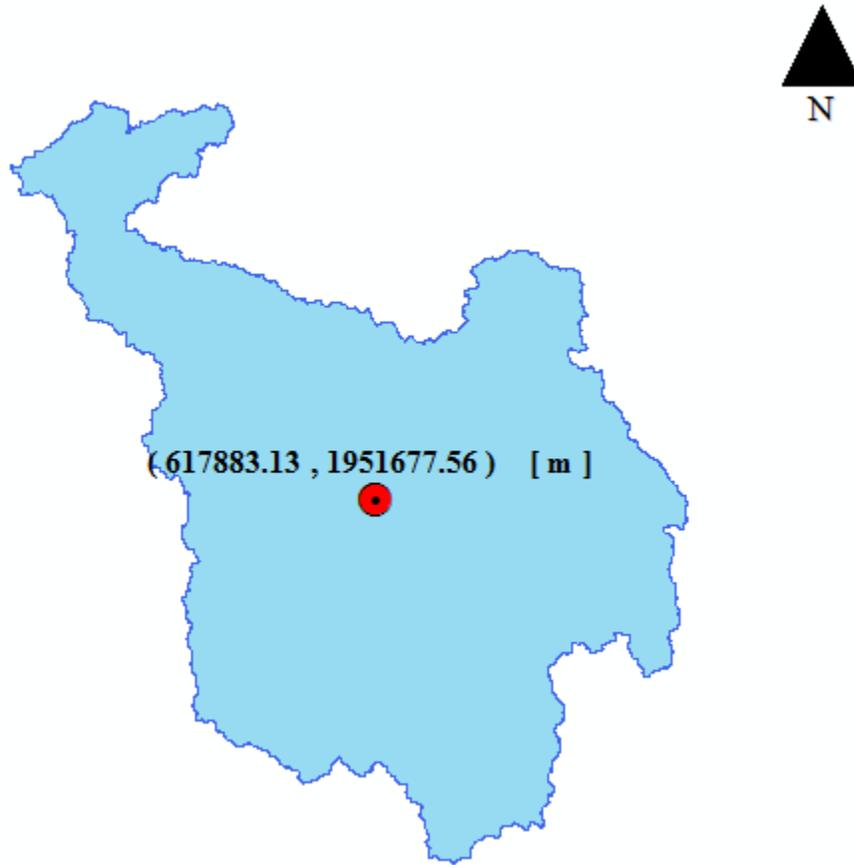


Figura 5.13 Localización del centroide de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Con la localización del centroide se ubicará de manera precisa la zona de estudio. Por lo tanto, la subcuenca RH18Af se localiza en las coordenadas 617 883.13, 1 951 677.56 en sistema UTM. También se podrá expresar en coordenadas geográficas y notación sexagesimal como se muestra en la Tabla. 5.9.

| Sistemas de coordenadas | X | Y |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| UTM | 617 883.13 [m] | 1 951 677.56 [m] |
| Geográficas | 17°38'55.68274" N | 97°53'19.27781" W |

Tabla 5.9 centroide de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Modelo Digital de Elevación. (MDE)

La pendiente media de la cuenca se obtiene con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE) que proporciona el INEGI en distintas resoluciones de imagen. Dicha resolución depende del tamaño de pixel y están disponibles en 15m, 30m, 60m, 90m y 120m, dependiendo de la precisión y el problema que se resolverá, entre más pequeña sea la resolución, implicará mayor cantidad de información y mayor tiempo de procesamiento.

Para la cuenca que estamos estudiando, una resolución de 15 o 30 m es correcta. En particular, en este caso se seleccionará la resolución de 30 m, dado que la superficie de la cuenca es relativamente

grande y requiere equipos con mayor capacidad de procesamiento. Además, un tamaño de pixel de 30 m es suficiente para evaluar el fenómeno de erosión hídrica.

En la Figura 5.14 se presenta el modelo digital de elevación donde se puede apreciar que en la región del sur se encuentran las elevaciones mayores en color verde que pertenecen al estado de Oaxaca y las cotas de menor altura sobre el nivel del mar son de color rojo y pertenecen al estado de Puebla donde drena la cuenca.

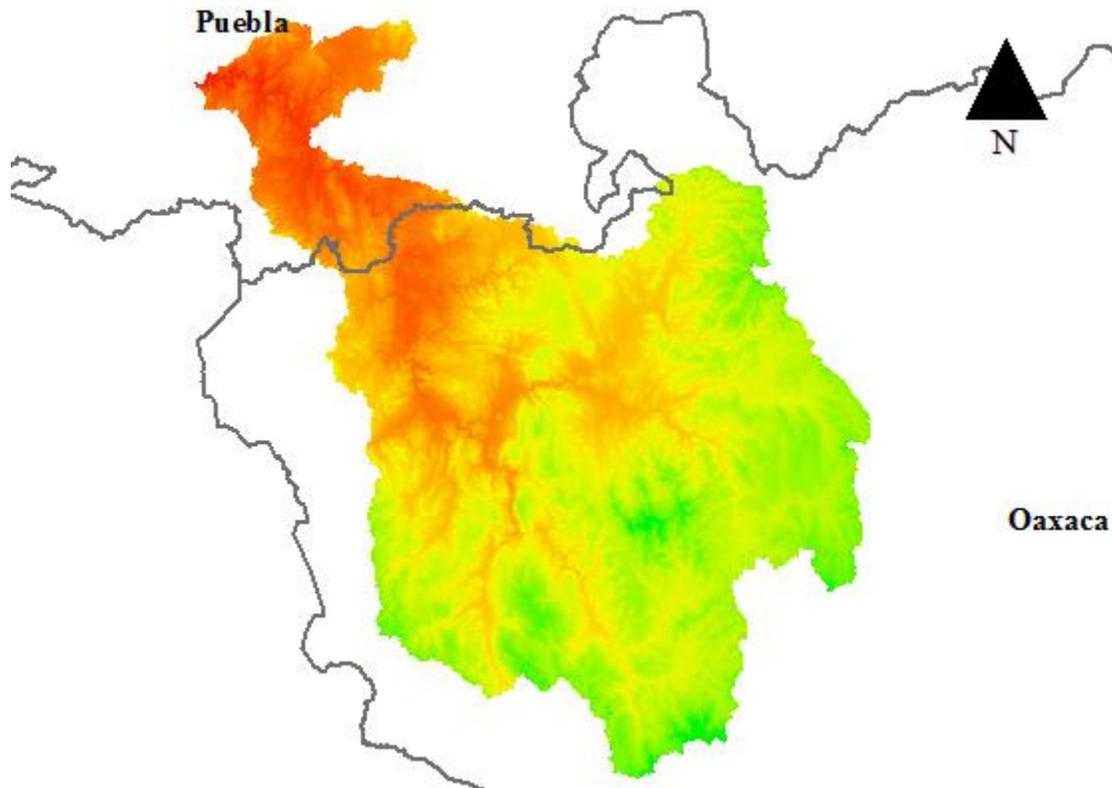


Figura 5.14 Modelo Digital de Elevación de la subcuenca Rh18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Mediante el modelo digital de elevación se obtuvo que la cota mayor es de 3 366 msnm y la cota menor de 687 msnm.

Pendiente media.

La pendiente de una cuenca es una característica fisiográfica importante en las cuencas hidrológicas debido a que controla en buena parte la velocidad con que se da el escurrimiento superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleva el agua de la lluvia concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas.

La pendiente media de la cuenca, se calculó a partir de una reclasificación de la imagen en formato ráster para establecer los rangos de la pendiente. Como se muestra a continuación.

Primero se calculó la pendiente a partir del modelo digital de elevación (Figura 5.15).

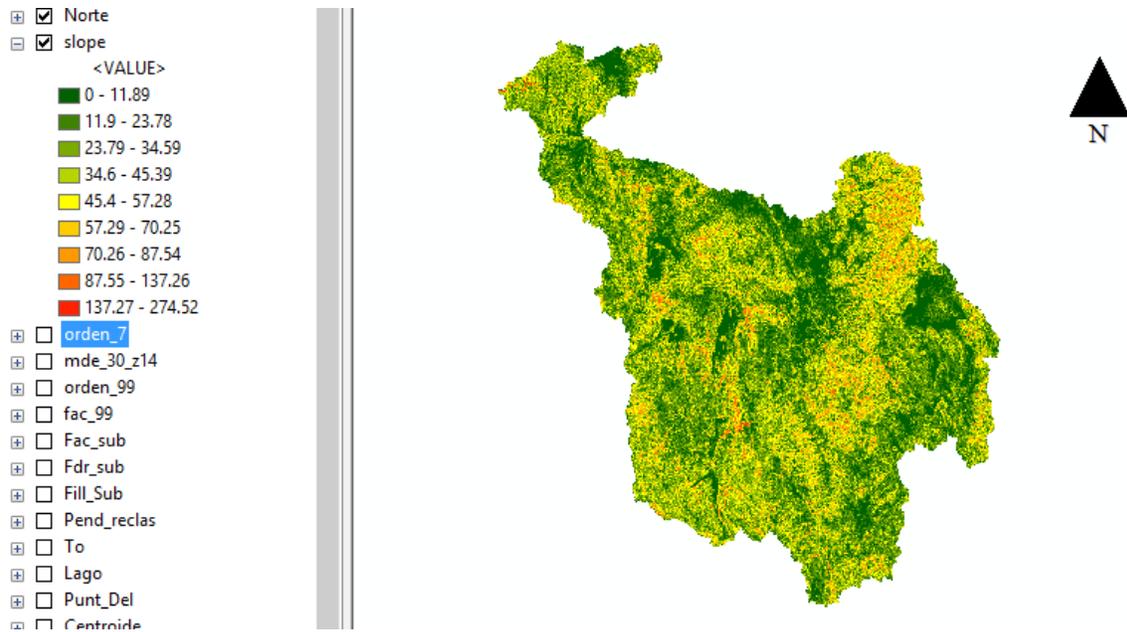


Figura 5.15 Rangos de pendiente de la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Posteriormente se hace una reclasificación, la cual consiste en cambiar o reclasificar los valores de las celdas, puede reclasificarse un valor a la vez o grupos de valores utilizando intervalos de pendiente, generando el archivo ráster de la Figura 5.16.

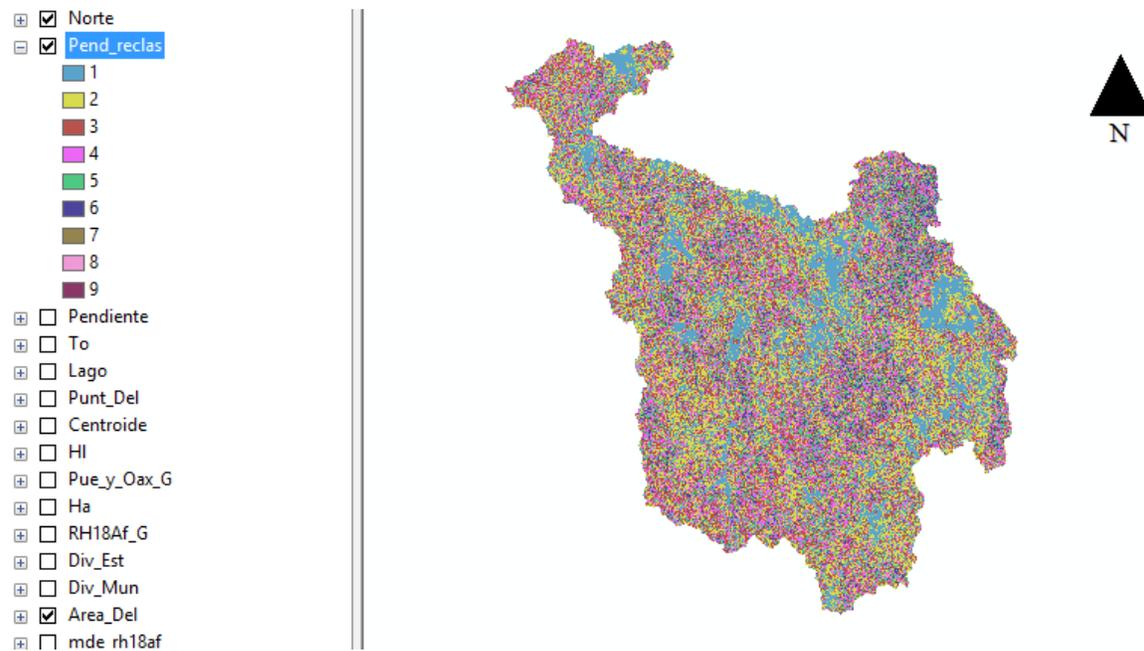


Figura 5.16 Rangos de pendiente reclasificados de la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Para poder interpretar la información que aparece en la imagen ráster obtenida, se utilizará la herramienta “Estadísticas zonales como tabla” (Zonal Statistics as Table), que devuelve el resultado como una tabla en lugar de una imagen ráster de salida.

El valor obtenido fue de 3.188 el cual indica en que clase se encuentra la pendiente media de la subcuenca, por lo tanto, tenemos que en el su valor está en el intervalo de 23.79 % y 34.59 % como lo muestra la Figura 5.17.

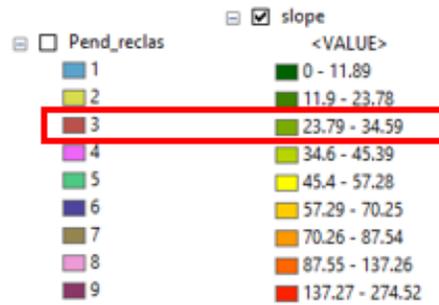


Figura 5.17 Clase se encuentra la pendiente. (Elaboración Propia, 2018)

Para conocer con mayor exactitud la pendiente correspondiente al valor 3.188, se interpolará linealmente, (considerando que el número de intervalos que se seleccionaron en el histograma fue de nueve), por lo que se obtendrá el valor de 25.82 % (Tabla 5.10).

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|------------------------|-----------|----------|
| Pendiente media | 25.82 | % |

Tabla 5.10 Pendiente media de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Red de drenaje.

La red de drenaje de una cuenca es el sistema de cauces por los que escurre el agua de manera temporal o permanente. Para el cálculo de sus parámetros se utilizará los archivos vectoriales proporcionados por la plataforma SIATL que se muestran a en la figura 5.18.

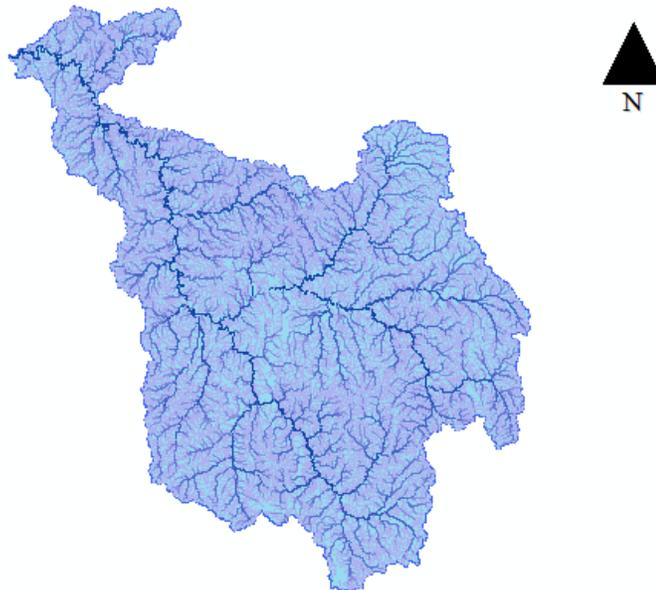


Figura 5.18 Red Hídrica de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Posteriormente, se utilizará la tabla de atributos del archivo vectorial obtenido anteriormente y se calculará la longitud total de la red de flujo.

La longitud total obtenida fue de 14 888.83 [km] y un total de 18 425 tributarios. Con base en estos datos y recordando que el área de la cuenca es de 7 727 [km²] se calculó, el valor de densidad de drenaje y la densidad de corriente.

La densidad de drenaje es una medida del desarrollo de la red de drenaje de una cuenca; parámetro que tiene relación con la naturaleza del material que forma a la cuenca, su cobertura y su relieve.

La densidad de drenaje se obtiene a partir de la edición 5.1.

$$D_d = \frac{L_r}{A} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Sustituyendo los valores:

$$D_d = \frac{14888.83[km]}{7727.93[km^2]}$$

$$D_d = 1.9266[km^{-1}]$$

Si la densidad de drenaje adquiere un valor bajo, entonces la cuenca puede presentar alguna de las condiciones siguientes: está formada por roca muy resistente, cuenta con suelo muy permeable, vegetación densa o suelos planos. Si, por el contrario, la densidad de drenaje es alta, entonces las condiciones pudieran ser: roca poco resistente, suelos impermeables, poca vegetación o bastante relieve.³⁸

Para nuestro caso tenemos una densidad de corriente moderada, es decir la cuenca está formada por roca medianamente resistente, cuenta con suelos permeables e impermeables, tiene zonas con poca vegetación y con vegetación densa, además de tener zonas con relieve.

La densidad de corrientes es otra medida del desarrollo de la red de drenaje de una cuenca. Suele ser utilizada, igual que la densidad de drenaje, para establecer comparaciones entre cuencas.

La densidad de corriente se obtiene a partir de la Ecuación 5.2.

$$D_c = \frac{N_s}{A} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Sustituyendo Valores:

$$D_c = \frac{18425}{7727.93[km^2]}$$

$$D_c = 2.3842[km^{-2}]$$

³⁸ Strahler. (1964). Section 4.II Geology. Part II Quatitative geomorphology of Drainage Basins and. in Handbook of Applied Hydrology: VT. Chow, Mc. Graw Hill, New.

Con base en los valores obtenidos, probablemente la subcuenca tendrá roca poco resistente, suelos impermeables, poca vegetación o bastante relieve.

Según Horton, el orden de una corriente es una medida de la importancia que tiene dicha corriente dentro del sistema de drenaje de una cuenca. O sea, entre mayor orden tenga una corriente, resulta más importante.

Debido a que la información que nos proporciona INEGI con respecto al Modelo Digital de Elevación es; por estado, se unió información de los Estados de Puebla y Oaxaca, para poder generar el MDE de la cuenca, a través de la herramienta “Mosaic To New Raster” de ArcGIS. El raster resultante presentó celdas vacías en la línea de frontera entre los estados de Puebla y Oaxaca como de muestra en la Figura 5.14.

Para iniciar el cálculo del número de orden de la red hídrica, se corrigió la imagen ráster. Dicha corrección consistió en asignarle un valor promedio a las celdas vacías. El valor promedio se obtendría de las celdas que rodearan a dicha celda vacía. El resultado se puede observar en la Figura 5.19.

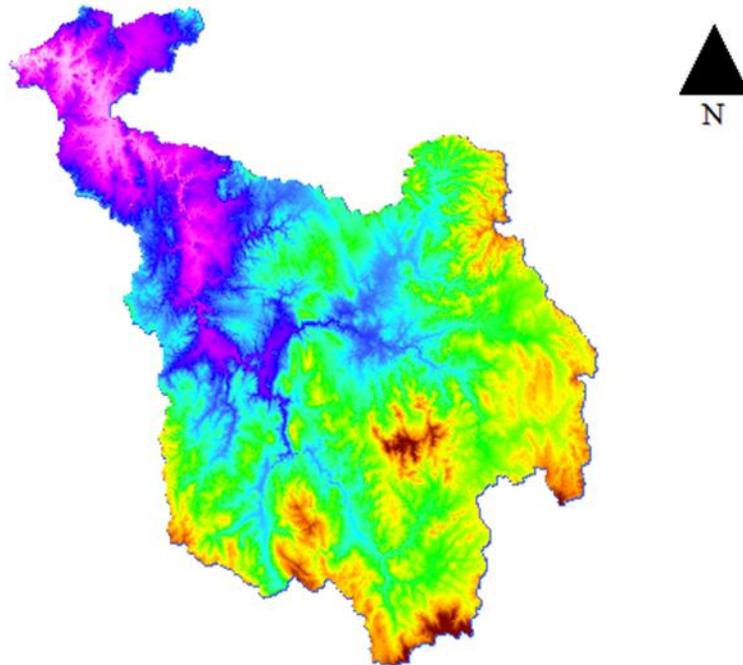


Figura 5.19 Corrección del raster del MDE. (Elaboración Propia, 2018)

Corregido el modelo de elevación de la subcuenca, se deberá conocer la dirección de flujo de nuestra red hídrica como se muestra en la Figura 5.20.

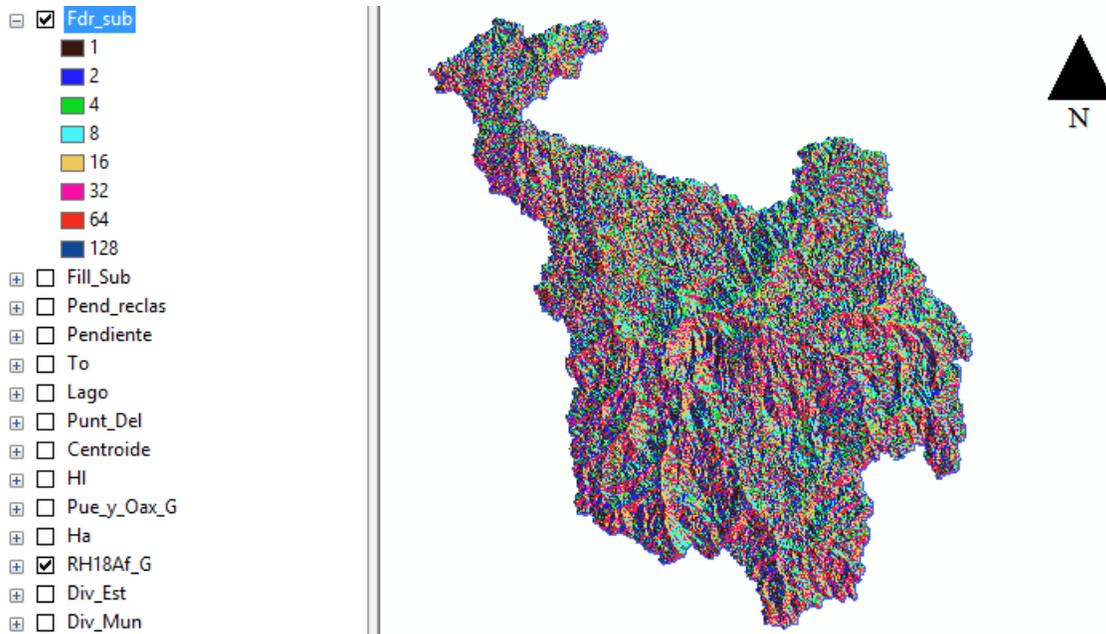


Figura 5.20 Dirección del flujo de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Posteriormente, hay que acumular el flujo en la parte baja de la cuenca (Figura 5.21).

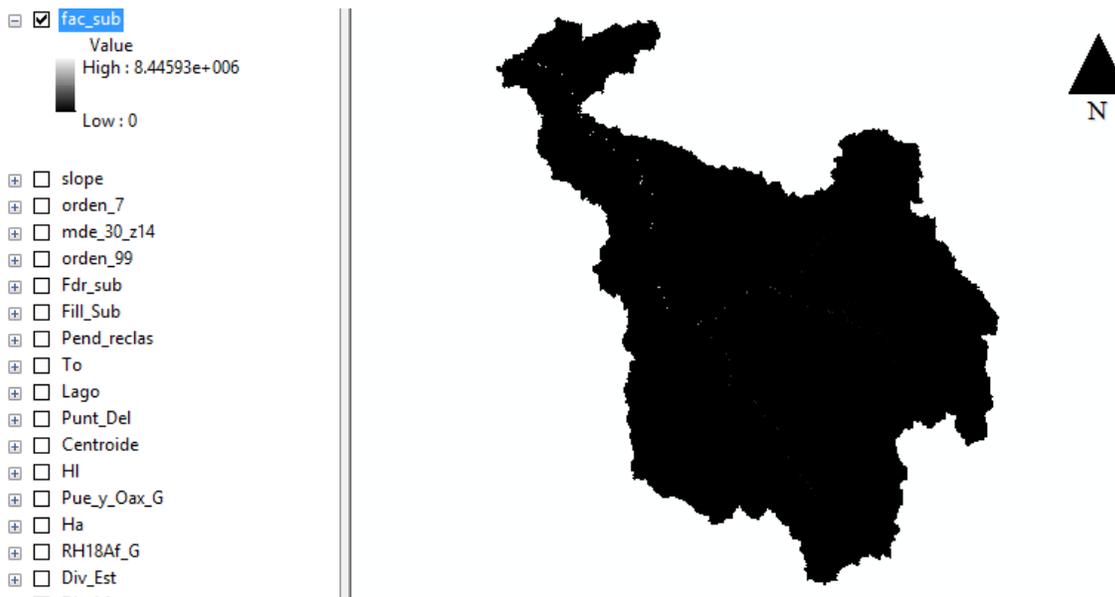


Figura 5.21 Número de celdas que acumulan el flujo en la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Finalmente, para definir el número de orden se hacen las siguientes consideraciones con ayuda de la calculadora raster de ArcGIS:

Se considerará que la imagen con acumulación de flujo (Figura 5.21) será mayor o igual a un número pequeño comparativamente con el número total de píxeles que tenemos en la cuenca, por ejemplo, un número de dos dígitos (número 99). La diferencia entre el número total de píxeles y el número

propuesto será grande y provocará en el procesamiento de imágenes que el resultado del número de orden de la red hídrica sea grande.

Finalmente, para definir el número de orden, tomando en cuenta la consideración anterior, se utilizará la herramienta “Stream order” de ArcGIS como se muestra en la Figura 5.22.

Es importante mencionar que ArcGIS asigna un orden numérico a los segmentos de un ráster que representan las ramas de una red lineal, sin embargo, el software no identifica la clasificación que existe de las corrientes: perennes, intermitentes o efímeras, por lo que lo correcto es realizar una visita de campo que nos permitirá conocer claramente la ramificación de la red de corrientes.

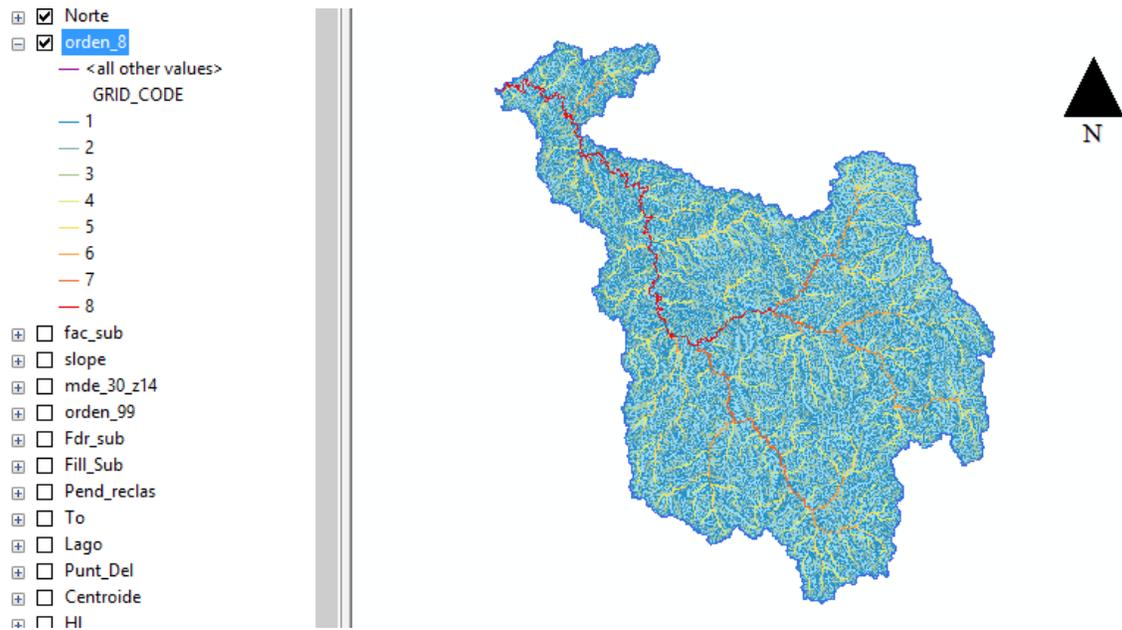


Figura 5.22 Numero de orden de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Finalmente determinamos que el número de orden de la cuenca Rh18Af es 8, en la Tabla 5.11 se muestra un resumen de los parámetros de la red de drenaje.

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|--------------------------------------|-----------|------------------|
| Longitud total de tributarios | 14 888.83 | km |
| Número total de tributarios | 18 425 | - |
| Densidad de Drenaje | 1.9266 | Km ⁻¹ |
| Densidad de corriente | 2.3842 | Km ⁻² |
| Numero de Orden | 8 | - |

Tabla 5.11 Red de drenaje de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Elevación mínima, máxima y media de la cuenca.

Para calcular la elevación mínima, máxima y media de una cuenca utilizando ArcGIS se realiza mediante el modelo de elevación de la cuenca, el archivo vectorial de la cuenca y la instrucción “Estadísticas zonales como tabla” (Zonal Statistics as Table), que devuelve el resultado como una tabla en lugar de una imagen ráster de salida. Los resultados se muestran en la Tabla 5.12.

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|------------------|-----------|----------|
| Elevación mínima | 687 | msnm |
| Elevación máxima | 3363 | msnm |
| Elevación media | 1890.85 | msnm |

Tabla 5.12 Red de drenaje de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Curva hipsométrica

La curva hipsométrica, es la representación mediante una gráfica del relieve de una cuenca. Representa el estudio de la variación de la elevación de los varios terrenos de la cuenca con referencia al nivel medio del mar. Se representa en ordenadas, las elevaciones o altitudes de la cuenca en la abscisa la superficie de la descarga o salida.

Para nuestra subcuenca en estudio mediante ArcGis se clasificó utilizando rangos iguales y un total de 20 intervalos o clases como se muestra en la Figura 5.23.

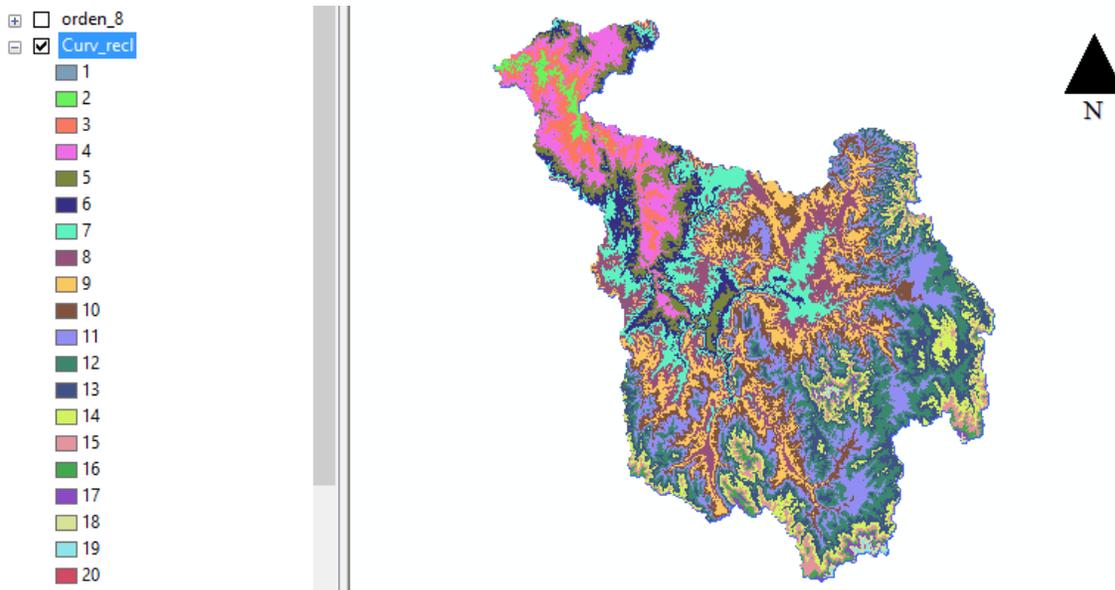


Figura 5.23 Modelo de elevación reclasificado en 20 intervalos. (Elaboración Propia, 2018)

La representación de la figura 5.23 en una gráfica, es la curva hipsométrica (Figura 5.25).

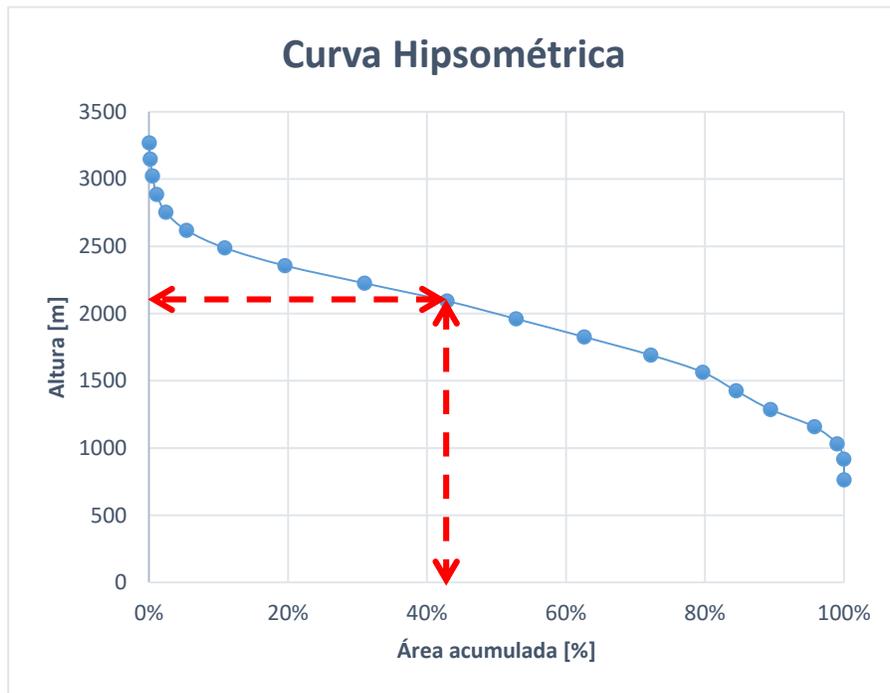


Figura 5.24 Curva Hipsométrica de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

De acuerdo a la clasificación de Strahler que se muestra en la Figura 5.24, la curva hipsométrica de nuestra subcuenca se encuentra en equilibrio o en fase de madurez.

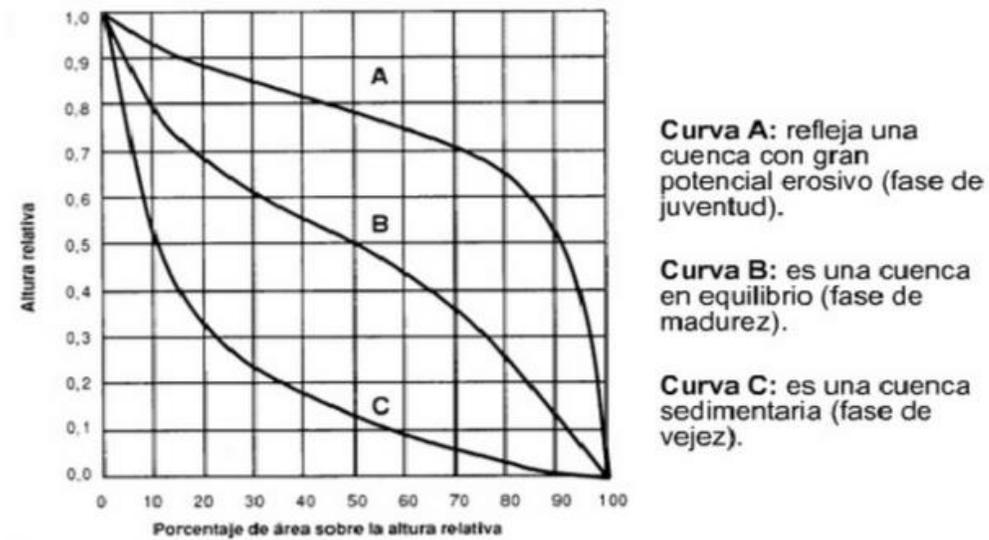


Figura 5.25 Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión. (LLamas, 1993)

Longitud del cauce principal.

La longitud del cauce principal de una cuenca se utiliza para calcular el tiempo de concentración y se define como la longitud de flujo aguas abajo que representa la distancia que una gota de agua viajaría para alcanzar el punto de interés o de salida de la cuenca.

Se utilizó la herramienta “flow Length”, que calcula la distancia aguas arriba o aguas abajo o la distancia ponderada a lo largo de la ruta de flujo para cada celda (Figura 5.26).

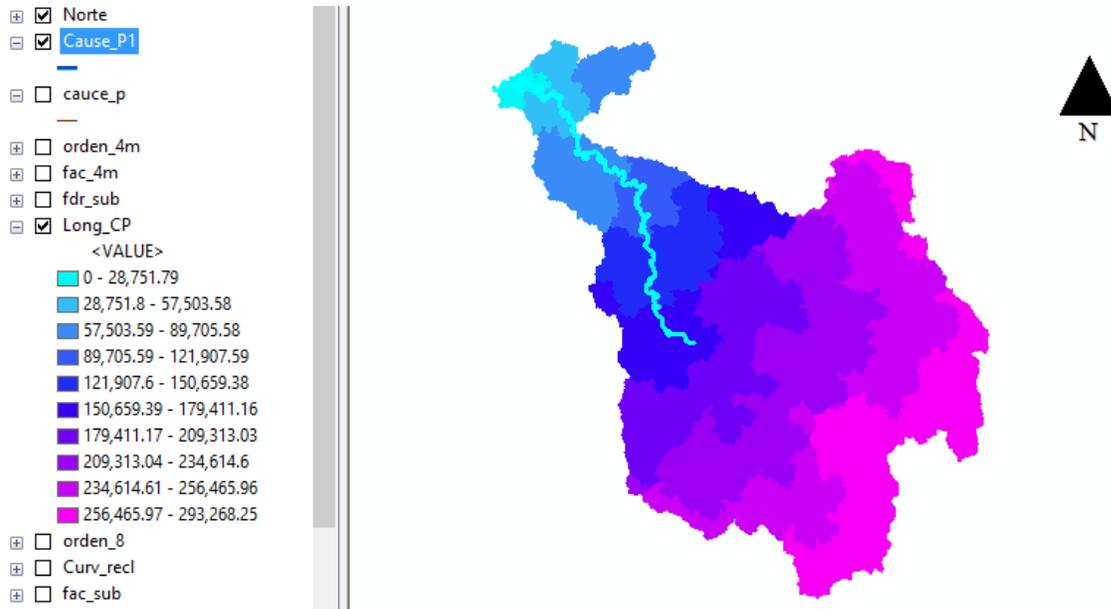


Figura 5.26 Longitud del cauce principal de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Como resultado, obtendremos distancias del cauce principal. Para el caso de nuestra subcuenca en estudio la distancia es de 163.759 km.(Tabla 5.13)

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|------------------------------|-----------|----------|
| Longitud del cauce principal | 163.759 | Km |

Tabla 5.13 Pendiente del cauce principal de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Pendiente del cauce principal.

La pendiente del cauce se puede estimar determinando el desnivel entre el punto más elevado y el más bajo (H) del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce (L), es decir:

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Para poder aplicar la ecuación anterior debemos obtener el cauce principal, mediante ArcGis con el modelo digital de elevación (MDE) de la subcuenca y el archivo vectorial del número de orden (Figura 5.27).

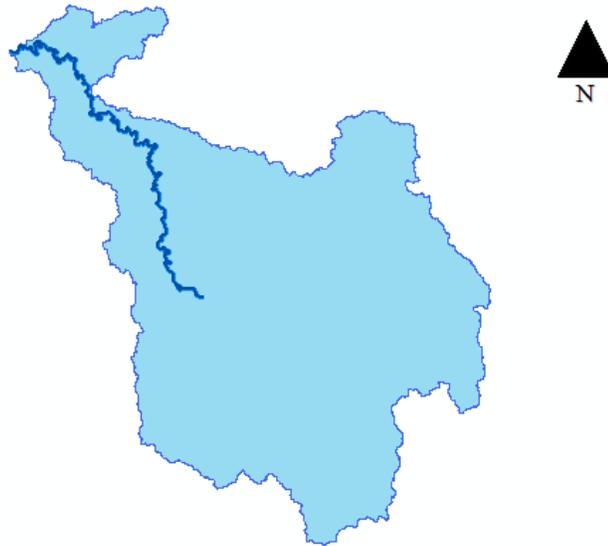


Figura 5.27 Cauce principal de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Posterior a esto se obtuvo el perfil de elevaciones del cauce principal (Figura 5.28).

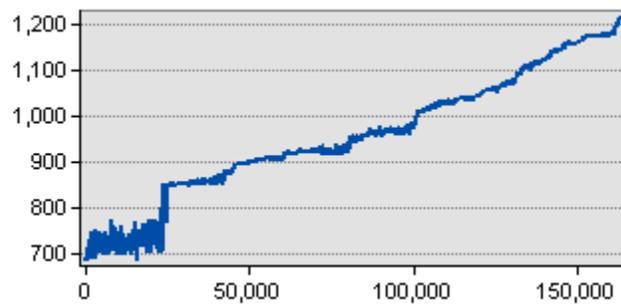


Figura 5.28 Perfil de elevaciones del cauce principal. (Elaboración Propia, 2018)

Para conocer la altura máxima y mínima, se realizó una consulta estadística zonal. Se obtuvo que la mayor elevación del cauce principal es de 1221.6 [msnm] y la mínima de 687 [msnm]. La longitud del cauce principal es de 163 759 [m], con estos datos podemos calcular la pendiente del cauce principal. Sustituyendo los valores en la Ecuación 5.3.

$$S = \frac{(1221.6 - 687)[m]}{163,759[m]}$$

$$S = 0.00326$$

La pendiente para el cauce principal es de 0.00326 m/m.(Tabla 5.14)

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|--------------------------------------|-----------|---------------|
| Pendiente del cauce principal | 0.00326 | $\frac{m}{m}$ |

Tabla 5.14 Pendiente del cauce principal de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Coefficiente de compacidad o de Gravelius.

El Coeficiente de compacidad, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. K_c se define como la Ecuación 5.4.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \tag{Ecuación 5.4}$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 5.4.

$$K_c = 0.28 \frac{657.98[km]}{\sqrt{7727.93[km^2]}}$$

$$K_c = 2.093$$

Existen categorías para la clasificación según el valor de este parámetro y se muestran en la Tabla 5.15.

| Rangos de K_c | Clases de compacidad |
|-----------------|---------------------------------------|
| < 1.25 | Redonda a oval redonda |
| 1.25 a 1.50 | De oval redonda a oval oblonga |
| 1.50 a 1.75 | De oval oblonga a rectangular oblonga |
| >1.75 | A casi rectangular (alargada) |

Tabla 5.15 Clases de valores de compacidad. (Gravelius, 1914)

Por lo tanto, la subcuenca RH18Af tiene una clase de compacidad de rectangular oblonga a casi rectangular. Cuenca alargada. (Tabla 5.16)

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|--|-----------|---------------|
| Coefficiente de compacidad o de Gravelius | 2.093 | $\frac{m}{m}$ |

Tabla 5.16 Coeficiente de compacidad o de Gravelius. (Elaboración Propia, 2018)

Tiempo de concentración.

Se puede definir como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial.

Para el cálculo del tiempo de concentración se emplea el método de Kirpich (Ecuación 5.5).

Kirpich:

$$T_c = 0.06626 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0.385}$$

Ecuación 5.5

La longitud del cauce principal es de 163.729 [km] y la pendiente de 0.00326, tenemos que:

$$T_c = 0.06626 \left(\frac{163.729^2}{0.00326} \right)^{0.385}$$

$$T_c = 30.43[\text{min}]$$

En resumen:

| Parámetro | | Resultado | Unidades |
|--------------------------------|---------|-----------|----------|
| Tiempo de concentración | Kirpich | 30.43 | Min |

Tabla 5.17 Tiempo de concentración. (Elaboración Propia, 2018)

Finalmente tenemos las características fisiográficas principales de nuestra subcuenca Río Mixteco RH18Af. Las cuales se resumen en la Tabla 5.18.

| Parámetro | Resultado | Unidades |
|--|---|-------------------|
| Área | 7 727.93 | km ² |
| Perímetro | 657.98 | km |
| Centroide | X | Y |
| UTM | 617 883.13 [m] | 1 951 677.56 [m] |
| Geográficas | 17°38'55.68274" N | 97°53'19.27781" W |
| Pendiente media | 25.82 | % |
| Longitud total | 14 888.83 | km |
| Número total de tributarios | 18 425 | - |
| Densidad de drenaje | 1.9266 | km ⁻¹ |
| Densidad de corrientes | 2.3842 | km ⁻² |
| Número de orden de la red hídrica | 8 | - |
| Elevación mínima | 687 | msnm |
| Elevación máxima | 3363 | msnm |
| Elevación media | 1890.85 | msnm |
| Curva hipsométrica | Edad geológica madura, subcuenca en equilibrio. | |
| Longitud del cauce principal | 163.759 | km |
| Pendiente del cauce principal | 0.00326 | m/m |
| Coefficiente de compacidad | 2.093 | ---- |
| Tiempo de concentración | Kirpich | 30.43 |
| | | min |

Tabla 5.18 Características fisiográficas de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

5.3 Determinación de la erosión hídrica.

5.3.1 Información de Precipitación.

Para poder determinar la erosión hídrica, se requiere de varios factores, uno de los más importantes es el factor R el cual depende de la precipitación de la zona. Existen varias metodologías para poder calcular este valor. Para poder elegir de manera correcta dicha metodología se analizó la información disponible de lluvia en la zona de estudio con el apoyo del software ArcGis.

Para poder conocer las estaciones que pueden aportar información, mediante ArcGis se delimitó un área cuadrada de 200 km y se hizo coincidir el centroide de dicha área con el centroide de la cuenca RH18Af, con la finalidad de poder delimitar la cuenca como se muestra en la figura 5.29.

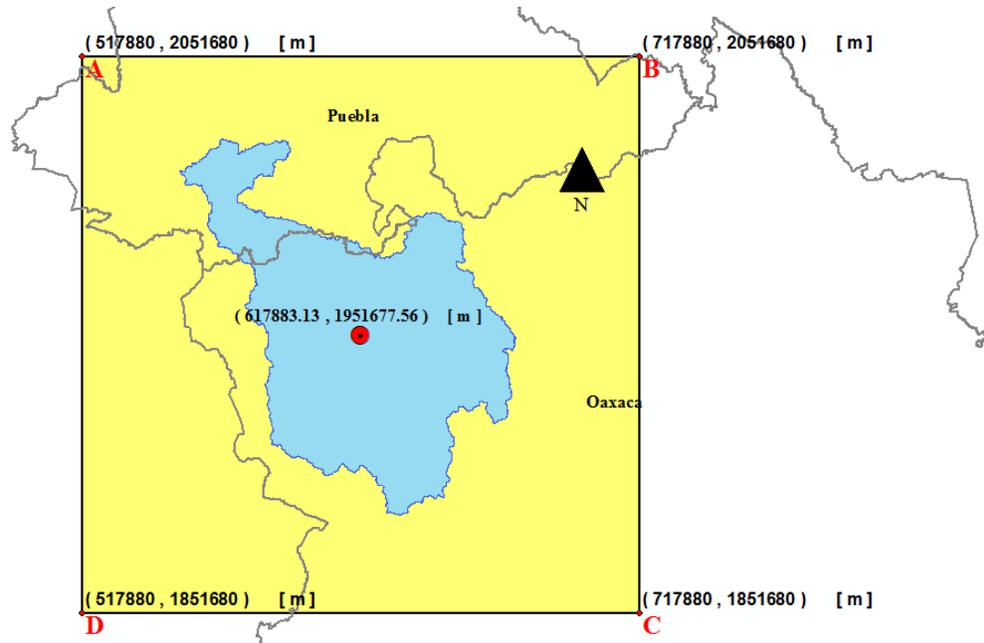


Figura 5.29 Delimitación de la zona estudio de la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Ahora se podrá acotar el área de estudio en coordenadas UTM con la finalidad de tomar dicha superficie como referencia para visualizar la información de precipitación que tenga influencia en la cuenca en estudio. Las coordenadas que delimitan el área de estudio se muestran en la Tabla 5.19.

| Sistemas de coordenadas UTM [m] | | |
|-------------------------------------|---------------|---------------|
| Punto | X | Y |
| A | 517 880 | 2 051 680 |
| B | 717 880 | 2 051 680 |
| C | 717 880 | 1 851 680 |
| D | 517 880 | 1 851 680 |
| Sistemas de coordenadas Geográficas | | |
| Punto | Latitud | Longitud |
| A | 18°33'20.6" N | 98°49'50" W |
| B | 18°33'20.6" N | 96°56'08.8" W |
| C | 16°44'16.4" N | 96°56'08.8" W |
| D | 16°44'16.4" N | 98°49'50" W |

Tabla 5.19 Coordenadas UTM y Geográficas que delimitan nuestra zona de estudio. (Elaboración Propia, 2018)

La información de libre acceso con la que contamos es con las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) y con las Estaciones Sinóptica Meteorológicas (ESIME). Cada dispositivo tiene la metodología para medir la precipitación y los resultados que entrega.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada dispositivo y la información disponible.

Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA).

Es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática.

Una Estación Meteorológica Automática, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas cada 10 minutos. Esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas.

Las variables meteorológicas que se miden son: velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación.

Estaciones Sinóptica Meteorológicas (ESIME).

Una Estación Sinóptica Meteorológica es un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática.

Las Estaciones Sinópticas Meteorológicas se encuentran ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos. La recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas se realizan cada 10 minutos. Esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas.

EMAS y ESIMES entregan información de precipitación en intervalos de 10 minutos, lo cual es ideal para poder calcular el factor R con la metodología del parámetro EI_{30} desarrollado por Smith y Wischmeier, que considera las intensidades de lluvia en rangos de 30 min.

En la Figura 5.30 se muestra la cuenca RH18Af – Río Mixteco con las EMAS y ESIMES que tiene influencia en la cuenca y que se encuentran dentro de la zona de estudio.

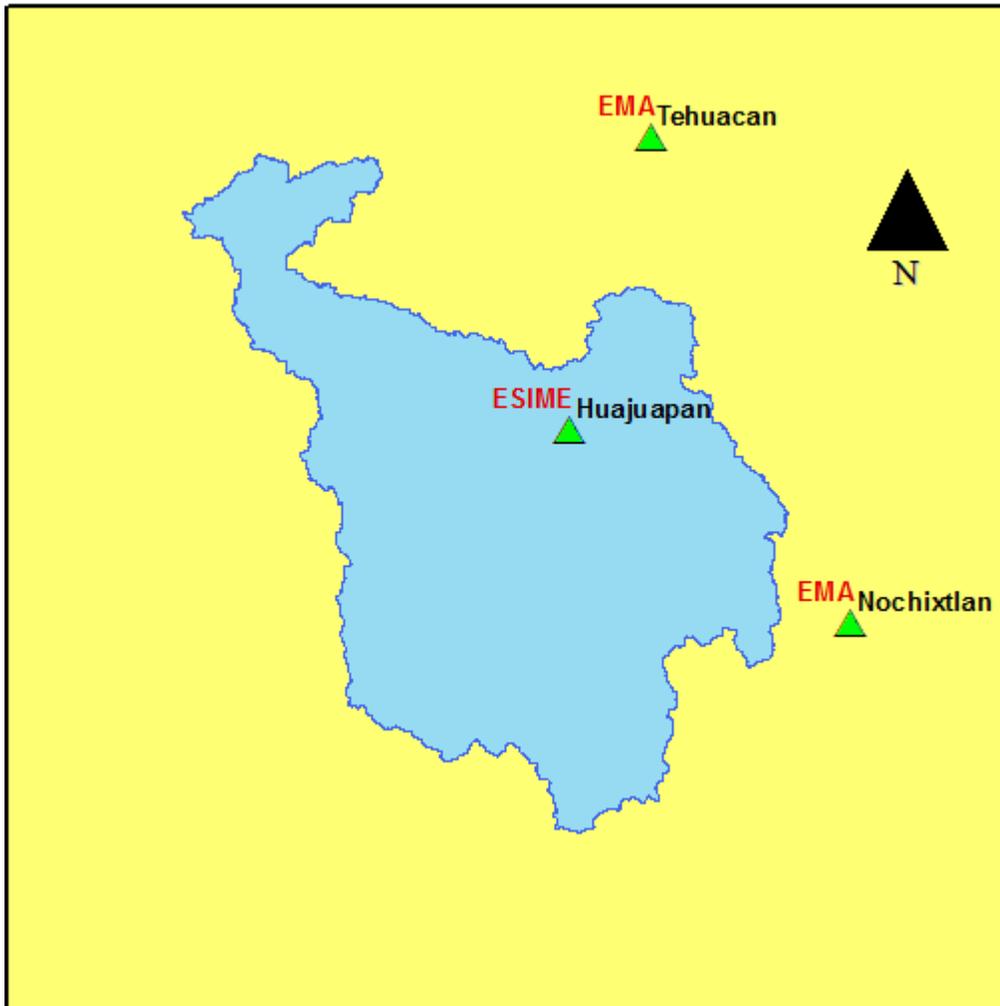


Figura 5.30 EMAS y ESIMES disponibles en la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018).

A través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se solicitó toda la información disponible de las 3 estaciones, de las cuales dos corresponden al estado de Oaxaca (Huajuapán y Nochixtlán) y una al estado de Puebla (Tehuacán). Además, solo una estación se encuentra dentro de la cuenca. Dichas estaciones se localizan en las siguientes coordenadas UTM (Tabla 5.20).

| Estación | Estado | Dispositivo | Coordenadas [m] | |
|----------------------------|--------|-------------|-----------------|-------------|
| | | | X | Y |
| Huajuapán de León | Oaxaca | ESIME | 630 196.6 | 1 967 255.7 |
| Asunción Nochixtlán | Oaxaca | EMA | 685 951.3 | 1 928 713.8 |
| Tehuacán | Puebla | EMA | 646 193.4 | 2 025 468.2 |

Tabla 5.20 Coordenadas UTM de las estaciones EMAS y ESIMES existentes en la cuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018).

Con la información disponible se analizaron los datos para conocer el porcentaje de valores fiables, ya que, por motivos de fallas técnicas, mantenimiento y otros factores hay periodos en los que las estaciones automatizadas dejan de operar y generan huecos de información, los cuales pueden ser

estimados con distintos métodos para calcular datos faltantes, siempre y cuando se disponga con un mínimo del 85% de la información total.

La figura 5.31 muestra el resumen del periodo de 18 años, que comprende los años 2000 al 2017, donde se indican las estaciones que disponen de un porcentaje mayor al 85% de la información total.

| Estación | Año | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
| Huajuapán | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nochistlán | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tehuacán | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 5.31 Cronograma información total de EMAS y ESIAMES. (Elaboración Propia, 2018).

Como se puede observar en la figura 5.31 los años 2014 y 2015 son los únicos años comunes en las estaciones. Por lo tanto, no se puede aplicar la metodología del parámetro EI₃₀ desarrollado por Smith y Wischmeier, debido a que dicho método requiere información de al menos 30 años para realizar el promedio correspondiente del factor R de erosividad anualmente.

Estaciones climatológicas.

Las estaciones climatológicas del SMN están provistas de un psicrómetro, un pluviómetro y un pluviógrafo, para medir las temperaturas máximas, mínimas y a partir de estas obtener la temperatura media diaria. La precipitación se registra acumulada cada 24 horas, ideal para poder calcular el factor R con la teoría de las cascadas aleatorias de Olsson Jonas. Esta teoría ha sido elaborada en orden para disgregar la lluvia espacialmente, pero puede usarse también para disgregarla temporalmente.

Las estaciones climatológicas además de presentar fallas técnicas y mantenimiento, también tienen el problema de que algunas ya no están operando actualmente, lo cual genera problemas de huecos de información.

En Tabla 5.21 se muestra un resumen de la distribución de estaciones climatológicas y su estatus.

| Estado | Operando | Suspendida | Total |
|----------------------------|----------|------------|-------|
| Oaxaca | 18 | 86 | 104 |
| Puebla | 19 | 29 | 48 |
| Guerrero | 18 | 15 | 33 |
| Total de estaciones | | | 185 |

Tabla 5.21 Distribución de las estaciones climatológicas en la cueca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018).

En la Figura 5.32 se muestra las 185 estaciones, en color verde las estaciones que están operando actualmente y en color rojo las que se encuentran suspendidas y por lo tanto ya no registran datos de precipitación.

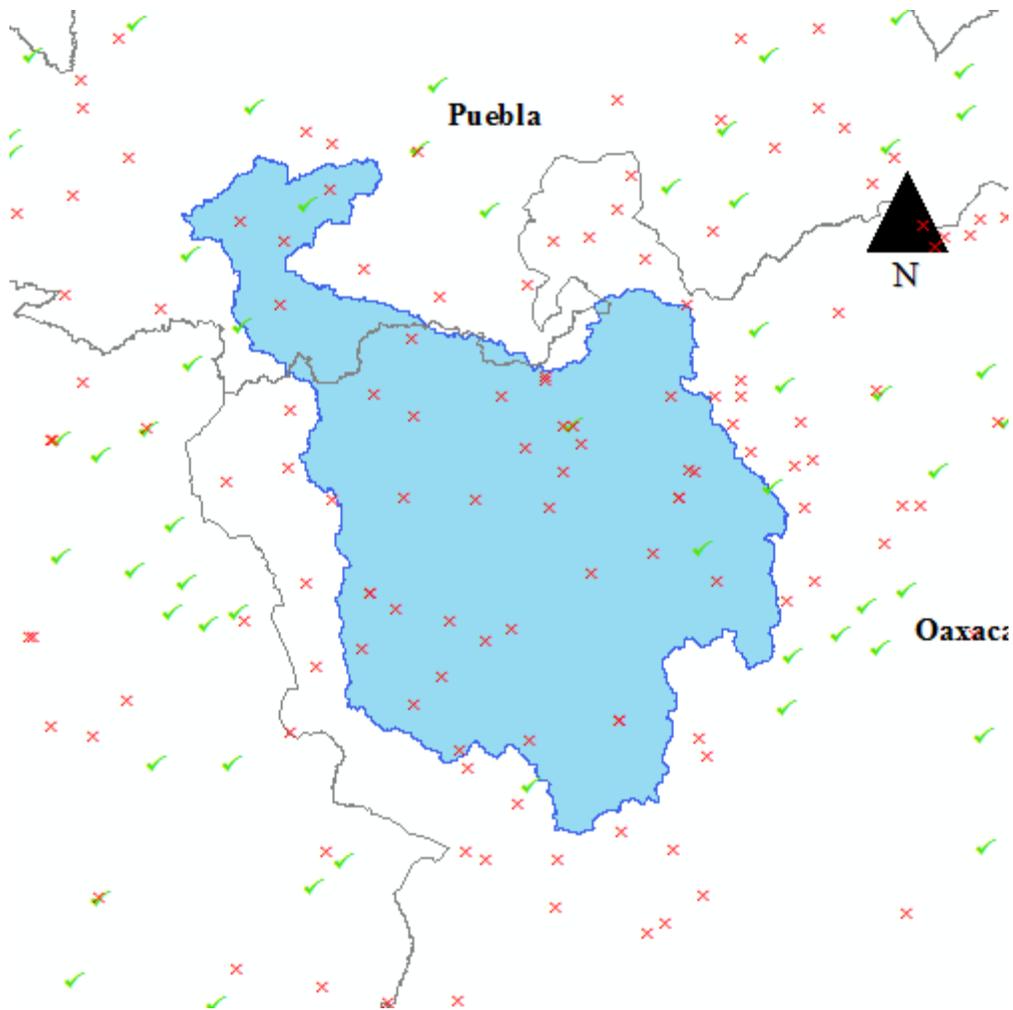


Figura 5.32 Estaciones Climatológicas en la subcuenca RH18Af. (Elaboración Propia, 2018)

Se analizaron todas las estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio delimitadas, se consideraron estaciones de 3 estados. Oaxaca con 104, Puebla 48 y Guerrero 33. Con un total de 185 estaciones de las cuales 44 se encuentran dentro de la cuenca y 141 se encuentran fuera de la cuenca.

Se realizó un análisis de manera similar al de las EMAS y ESIMES mediante un cronograma con las 185 estaciones para poder visualizar la información disponible.

El primer cronograma de la Figura 5.33 considera estaciones operando y suspendidas.

En el segundo cronograma de la Figura 5.34 solo se consideró a las estaciones operando.

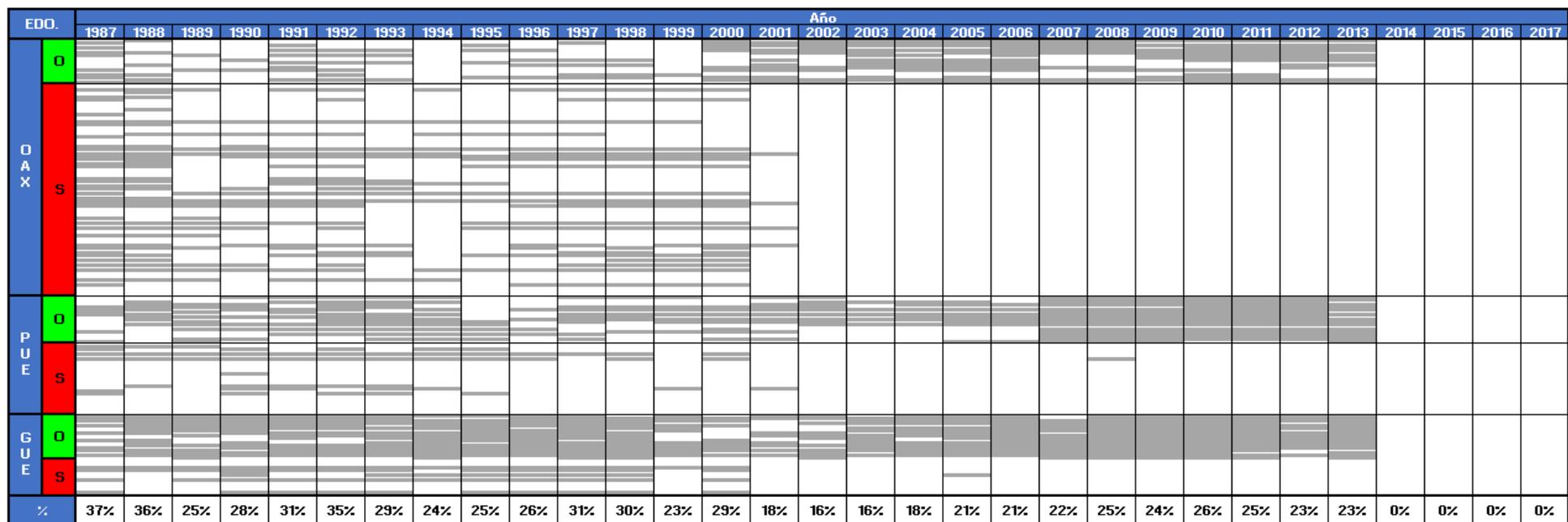


Figura 5.33 Cronograma 1. (Elaboración propia, 2018)

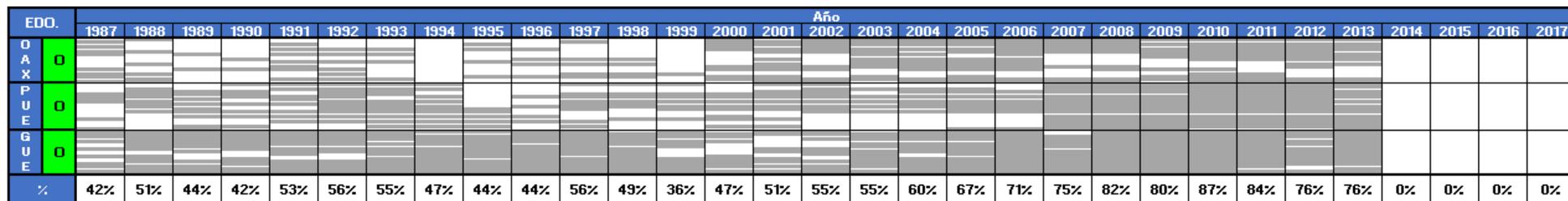


Figura 5.34 Cronograma 2. (Elaboración propia, 2018)

Como podemos observar la Figura 5.33 la información tiene demasiados huecos, el año con mayor porcentaje de datos disponibles es 1987 con un 37 % de información. El porcentaje es muy pequeño para poder aplicar cualquier metodología para completar datos faltantes.

En la Figura 5.34 solo se consideran las estaciones operando, aunque los porcentajes de información están por debajo del 85% para completar datos, excepto el año 2010 que tiene un 87% de información.

Para calcular el factor R ya sea por el método EI₃₀ desarrollado por Smith y Wischmeier o el método de la teoría de las cascadas aleatorias de Olsson Jonas, es necesario contar con al menos 30 años de información disponible, ya sea horaria para el primer método o diaria para el segundo método respectivamente. La carencia de información no permite calcular el factor R con ninguna de las 2 metodologías expuestas anteriormente.

5.3.2 Factor de erosividad de la lluvia (R).

Existe una metodología propuesta por Agroasemex que a partir de la Precipitación Media Anual (PMA) se aplican las ecuaciones de erosividad (Figura 5.35) asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana que se muestran en la Figura 5.36.

| Región | Ecuación | R ² |
|--------|--------------------------------|----------------|
| 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 | $3.4980 * P - 0.000188 * P^2$ | 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 |

Figura 5.35 Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana (Becerra, 1997).

La estimación con el método de Agroasemex del presente factor consiste en el empleo del arreglo regular de precipitación con datos diarios de 1979 a 2007, para la estimación de la PMA. Dicho arreglo ha sido creado mediante la metodología de interpolación de Cressman.

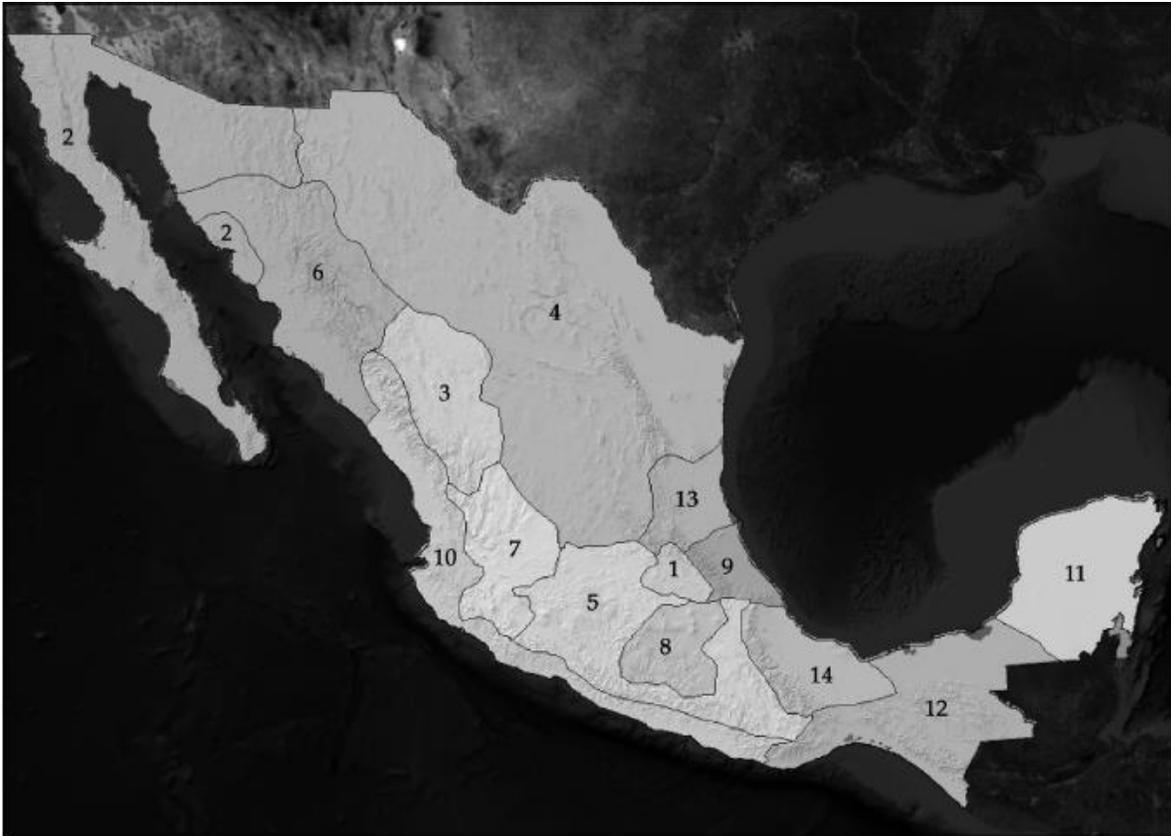


Figura 5.36 Regionalización nacional de factor R (Becerra, 1997).

El método se basa en la corrección de un campo preliminar de precipitación modelada que es corregido a partir de los registros de precipitación presentes en la base de CLICOM y GASIR. El producto final consiste en un arreglo de datos diarios con resolución espacial de 20 km. Debido a que sus dimensiones son regulares, se espera que el método ofrezca una mejor representación de la variabilidad espacial y temporal del campo de precipitación.

Con el apoyo de la herramienta ArcGis se realizó superposición de imágenes con el propósito de conocer la ubicación aproximada que tiene nuestra sub cuenca y ver que regiones del factor R abarca la zona de estudio para saber que ecuaciones de regionalización se van a utilizar para obtener el Factor de erosividad de la lluvia.

La zona de estudio intersecta con 4 regiones diferentes del factor R (Figura 5.36), las regionalizaciones 8 y 5 en su mayor extensión. Las regionalizaciones 10 y 14 en menor superficie. Hay que aclarar que la subcuenca RH18Af – Río Mixteco abarca un área mucho más pequeña, pero se consideró toda la zona de estudio que se delimito al principio del capítulo. Esto con la intención de realizar interpolaciones y el álgebra de mapas para calcular la erosión con mayor calidad de resultados.

En la Figura 5.37 se muestra las 4 regionalizaciones del factor R, que intersectan con la zona de estudio.

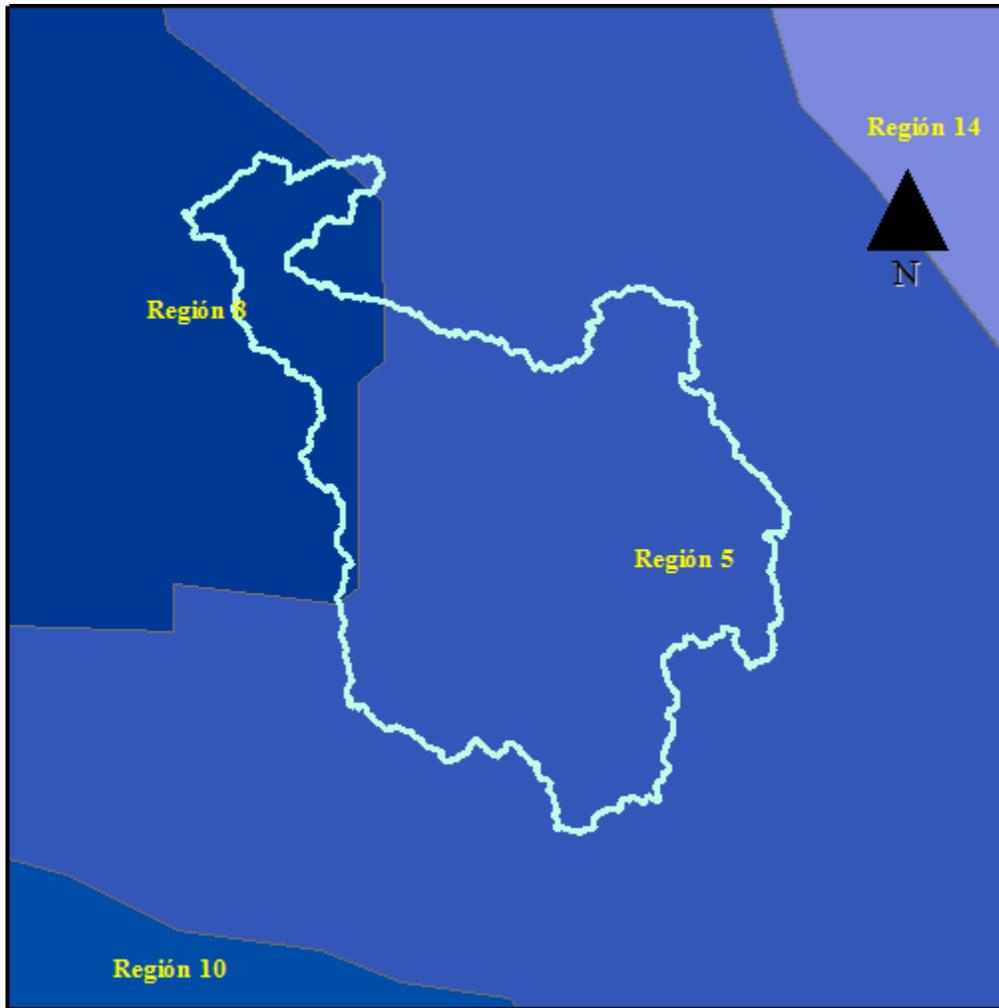


Figura 5.37 Regionalizaciones del factor R en nuestra zona de estudio. (Elaboración propia, 2018)

Como se mencionó anteriormente la zona de estudio se encuentra entre cuatro regionalizaciones del factor R. Por lo tanto, las ecuaciones a ocupar para el cálculo del factor R, son las que se muestran en la Tabla 5.22.

| Región | Ecuación | R ² |
|--------|-------------------------------|----------------|
| 5 | $3.4880 * P - 0.000188 * P^2$ | 0.94 |
| 8 | $1.9967 * P + 0.003270 * P^2$ | 0.98 |
| 10 | $6.8938 * P + 0.000442 * P^2$ | 0.95 |
| 14 | $1.5005 * P + 0.002640 * P^2$ | 0.95 |

Tabla 5.22 Ecuaciones regionalizadas en nuestra zona de estudio. (Elaboración Propia, 2018).

Una vez conocidas las Regionalizaciones en la zona de estudio y las ecuaciones a ocupar debemos aplicar la metodología que requiere de la Precipitación Media Anual (PMA).

Mediante datos vectoriales de PMA de la República Mexicana, obtenidos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). Se delimitaron las áreas de precipitación media anual que tienen influencia en la zona de estudio.

La Figura 5.38 muestra la precipitación media anual expresada en rangos de isoyetas, para la zona de estudio.

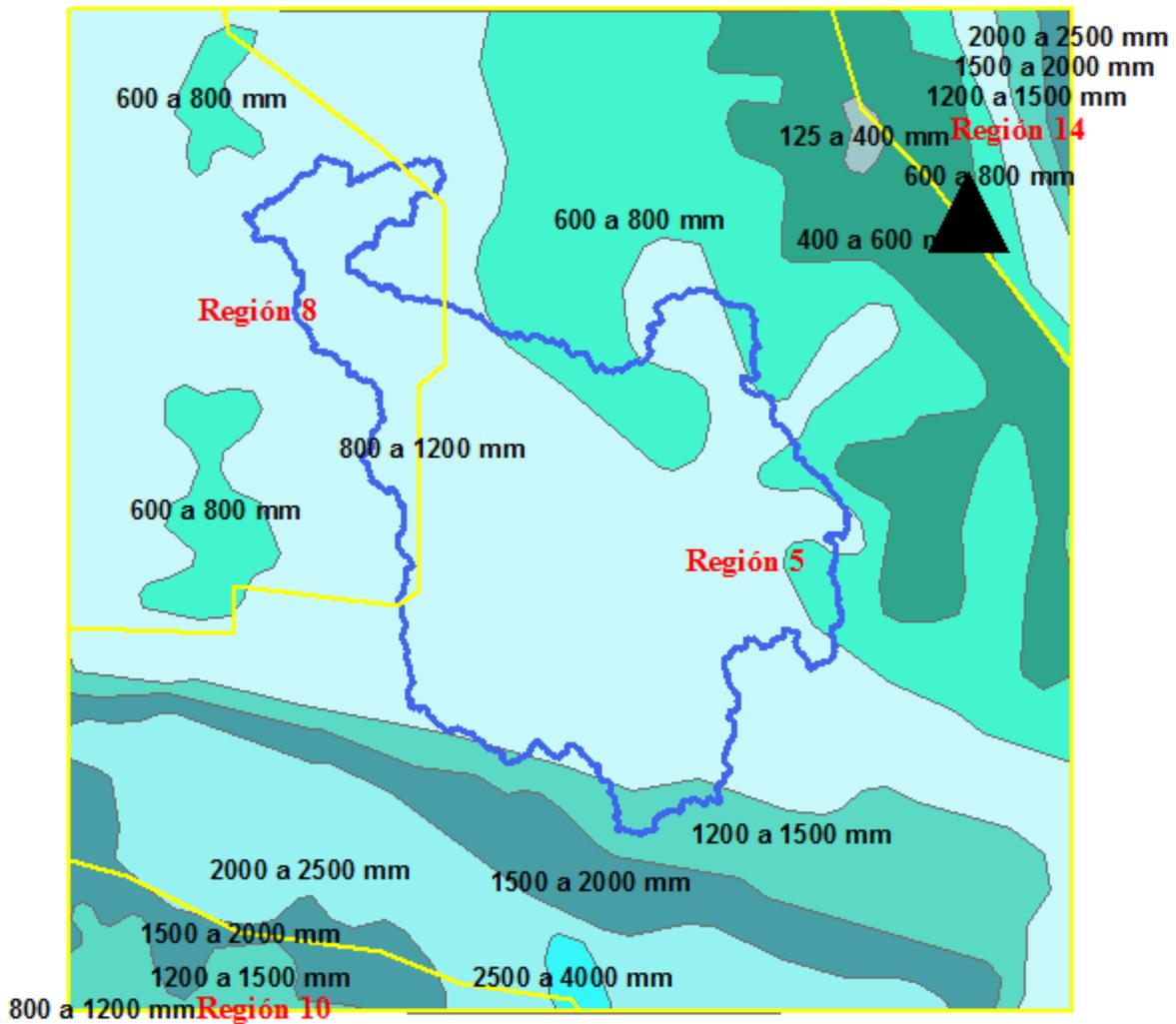


Figura 5.38 Precipitación Media Anual (PMA) de nuestra zona de estudio. (Elaboración Propia, 2018).

Uno de los métodos para calcular el factor R, será utilizando las ecuaciones de regionalización con el valor promedio del rango de precipitación, en el caso que nos ocupa, el resultado esperado será un valor muy uniforme en un gran número de celdas de la imagen en cuestión. Dicho resultado no representa la realidad de la zona, por lo tanto, para obtener una mejor representación de la variabilidad espacial y temporal se aplicó una interpolación utilizando ArcGis de la siguiente manera.

Para dividir el área e identificar las ecuaciones de regionalización se utilizó la herramienta fusión de ArcGis interseca áreas de precipitación media anual las áreas de regionalización. Dicha operación generó un total de 35 polígonos en la zona de estudio. Cada uno con su correspondiente ecuación de regionalización y su rango de precipitación.

Posterior a esto, se obtuvo la PMA y el factor R buscado para los 35 polígonos. (Figura 5.39)

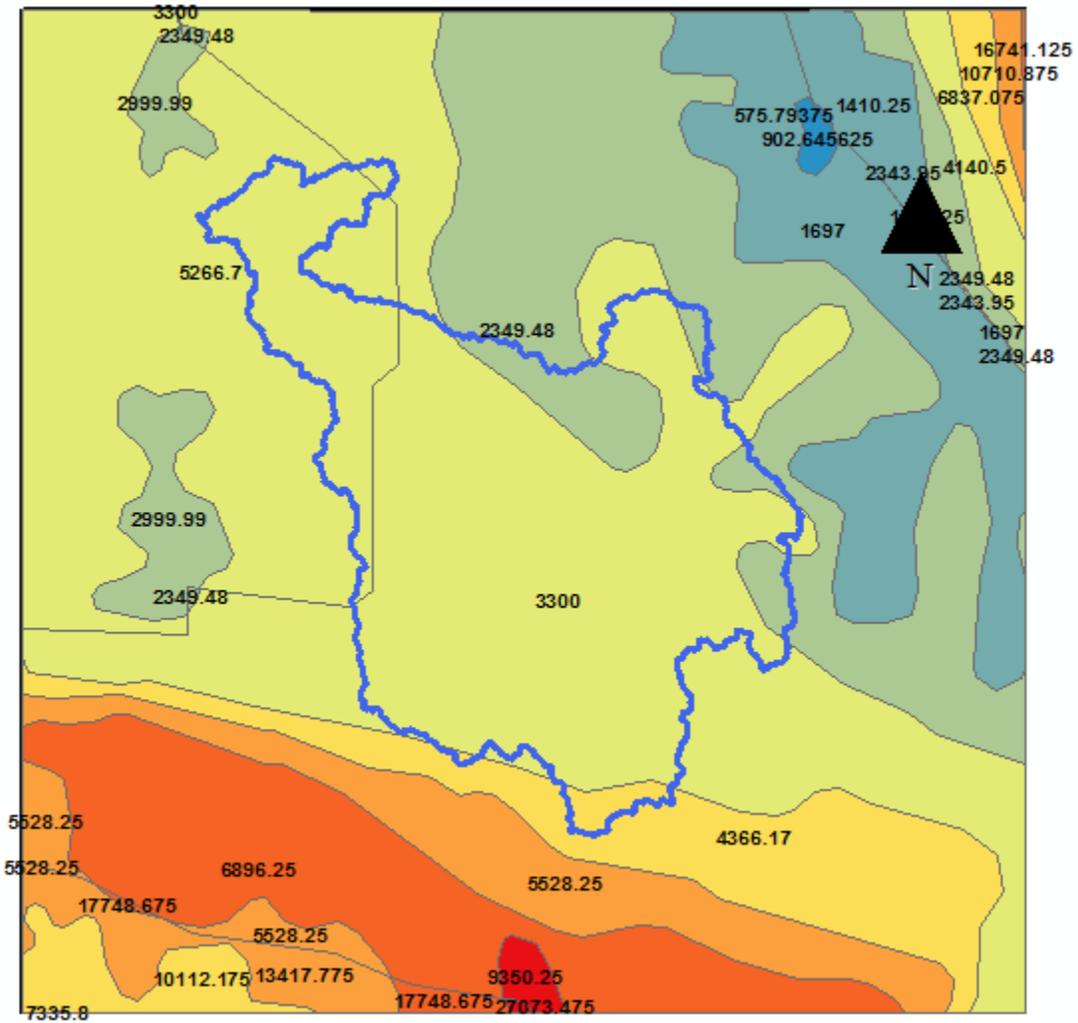


Figura 5.39 Valor de R correspondiente a cada área. (Elaboración Propia, 2018).

Para puntualizar la información, se calculó el centroide de cada uno de los 35 polígonos y se le asoció el valor de R correspondiente. como se muestra en la Figura 5.40.

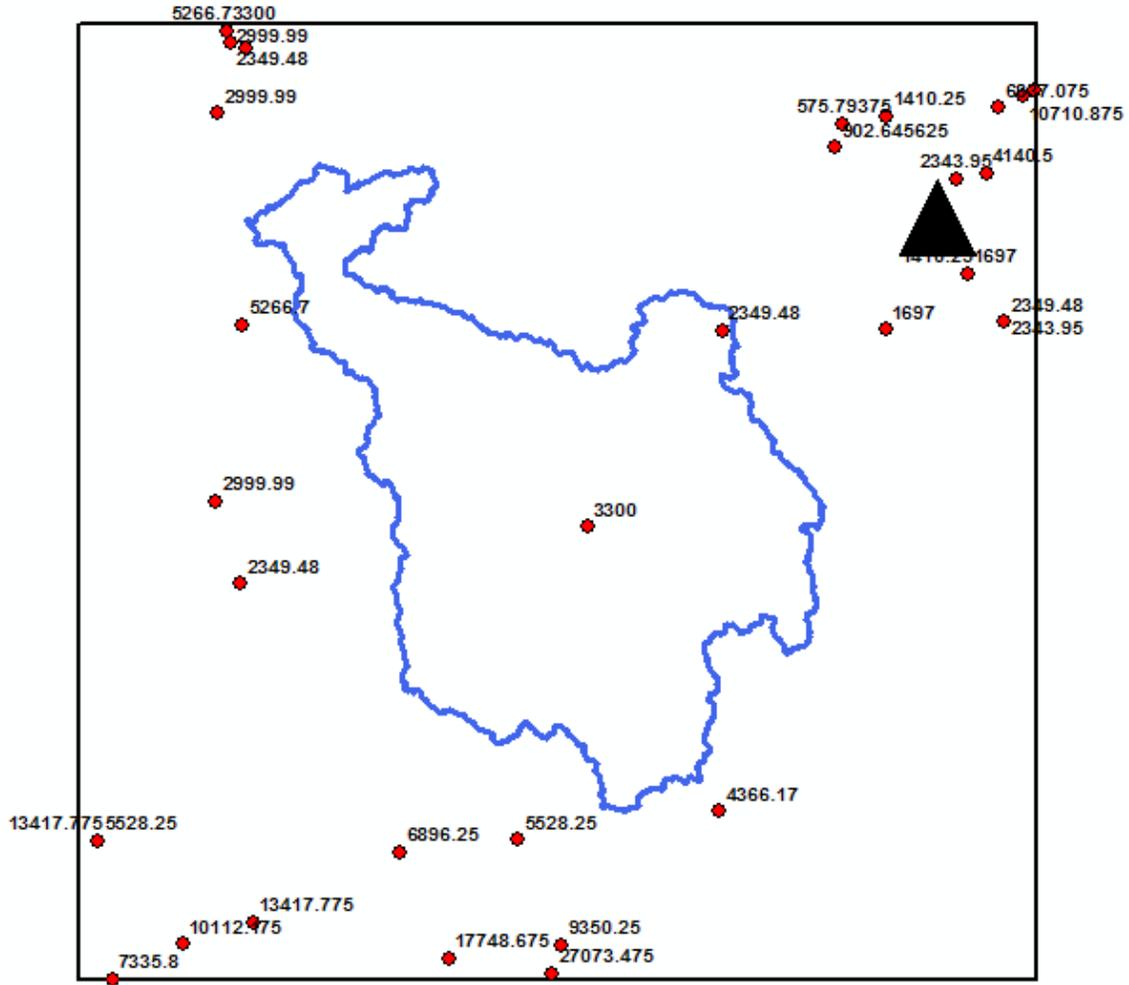


Figura 5.40 Valor de R correspondiente a al centroide de cada área. (Elaboración Propia, 2018).

Una vez puntualizada la información se realiza la interpolación. Para este caso se utilizó La interpolación Kriging, que es una interpolación geoestadística que está basada en modelos estadísticos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Una vez realizada la interpolación para la zona de estudio se extrajo la superficie de la subcuenca Rh18Af – Río Mixteco. Los diferentes valores de R obtenidos para la subcuenca se muestran en la Figura 5.41

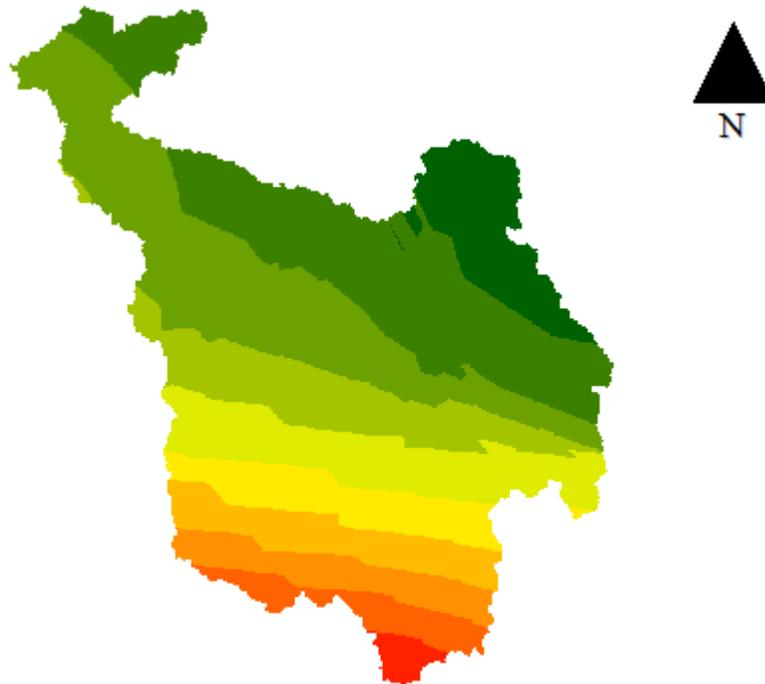


Figura 5.41 Factor R para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Se clasifico el valor de R en 10 intervalos de clase, los cuales se muestran en la Figura 5.42.

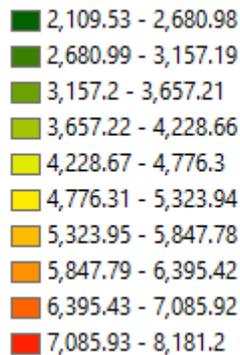


Figura 5.42 Clases del valor de R de la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Como se puede observar los valores de R varían entre 2,109.53 y 8,182.2; Las unidades del factor R son: $[MJ \cdot mm/ha \cdot año]$.

5.3.3 Factor de erodabilidad del suelo (K)

El factor K indica el grado de susceptibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión. La erodabilidad del suelo es una propiedad compleja y se concibe como la facilidad con la cual es desprendido y transportado el suelo.

Desde un punto de vista más cuantitativo, la erodabilidad representa un valor promedio integral anual de la pérdida de suelo en respuesta a procesos de erosión e hidrológicos.

Tradicionalmente, la metodología usada para la determinación de dicho factor es el nomograma de Wischmeier y Smith, el cual toma en cuenta ciertas propiedades del suelo, como contenido de materia orgánica, contenido de arenas, contenido de limos, estructura y permeabilidad, entre otras.

Para obtener dicho factor se empleó el método que utilizó AGROASEMEX, que corresponde a la metodología de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).

La información requerida para aplicar la metodología son archivos vectoriales de edafología de la República Mexicana la cual se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Esta información se representa en áreas y a cada polígono se le asigna una clave a la clasificación conocida como World Reference Base for Soil Resources (WRB). Dicha clasificación propone 32 grupos de suelo definidos por la FAO.

La clasificación WRB según la FAO se agrupa de acuerdo a sus características, lo muestra la tabla 5.23.

| Grupo de Suelo | Características |
|---|---|
| Histosoles. | Suelos con capas orgánicas gruesas. |
| Antrosoles, Tecnosoles. | Suelos con fuerte influencia humana. |
| Criosoles, Leptosoles, Solonetz, Vertisoles, Solonchacks | Suelos con enraizamiento limitado. Están o han estado fuertemente influenciados por el agua. |
| Gleysoles, Andosoles, Podzoles, Plintosoles, Nitisoles, Ferralsoles, Planosoles, Stagnosoles | Suelos regulados por la química de Fe/Al. |
| Chernozems, Kastanozems, Phaeozems, Umbrisoles. | Acumulación pronunciada de materia orgánica en el suelo mineral superficial |
| Durisoles, Gipsisoles, Calcisoles. | Suelos de regiones áridas con acumulación de yeso, sílice y carbonato de calcio, respectivamente. |
| Retisoles, Acrisoles, Lixisoles, Alisoles, Luvisoles. | Suelos enriquecidos en arcillas en la parte sub-superficial. |
| Cambisoles, Arenosoles, Fluvisoles, Regosoles. | Suelos relativamente jóvenes con muy poco o ningún desarrollo de perfil. |

Tabla 5.23 Grupo de suelos del sistema de clasificación WRB. (FAO, 2014).

La tabla 5.23 muestra la descripción de los grupos de suelo de manera muy general, Sin embargo, en el anexo A los 32 grupos tienen su definición de manera más detallada tales como características físicas, composición química y textura, generando claves mediante el grupo y sus calificadores.

De acuerdo al INEGI, México tiene 26 de los 32 grupos de suelo de la clasificación WRB. La figura 5.43 muestra diferentes tipos de suelo que son preponderantes a nivel nacional.



Figura 5.43 Principales grupos de suelos de México. (ISRIC, 2015)

Para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, se tienen, varias combinaciones de suelos de acuerdo a la clasificación WRB. Se distribuyen en 144 polígonos o áreas. Los cuales se muestran en la Figura 5.44.

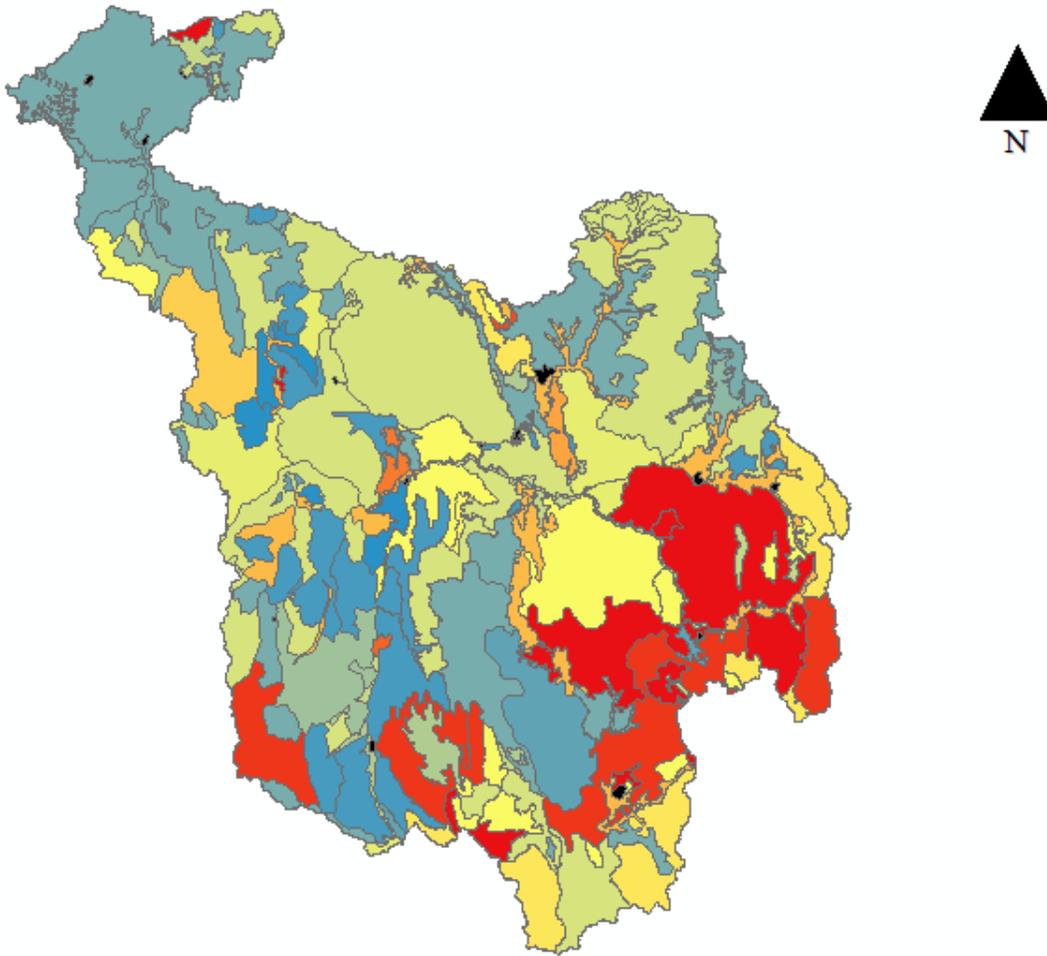


Figura 5.44 Edafología subcuenca RH18Af. (Elaboración propia, 2018)

Los valores de K se asignan con base al tipo de suelo y su textura (gruesa, media o fina), Para la subcuenca se tienen 9 grupos de la clasificación WSB. Dichos grupos se muestran en Tabla 5.24 con el valor de K correspondiente.

| Nombre | Orden | Textura | | |
|-----------------|-------|---------|-------|-------|
| | | Gruesa | Media | Fina |
| Calcisol | CL | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| Cambisol | CM | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| Fluvisol | FL | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| Leptosol | LP | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| Luvisol | LV | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| Phaeozem | PH | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| Regosol | RG | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| Umbrisol | UM | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| Vertisol | VR | 0.053 | 0.079 | 0.026 |

Tabla 5.24 Factor K, de acuerdo a la clasificación WRB. (Agroasemex, S.A., 2011)

Los valores de K fueron obtenidos de la tabla presentada en el Anexo B, la cual estima los valores en función de la unidad de suelo y su textura.

Para la subcuenca se asignaron los factores de K correspondiente, a cada uno de los 80 polígonos en que está dividida la subcuenca. Para algunos de estos polígonos su clasificación estaba compuesta hasta por 3 claves diferentes. Entonces para estos casos se decidió obtener el valor promedio de K.

Posterior a esto se convirtió la información vectorial a formato raster como se muestra en la Figura 5.45.

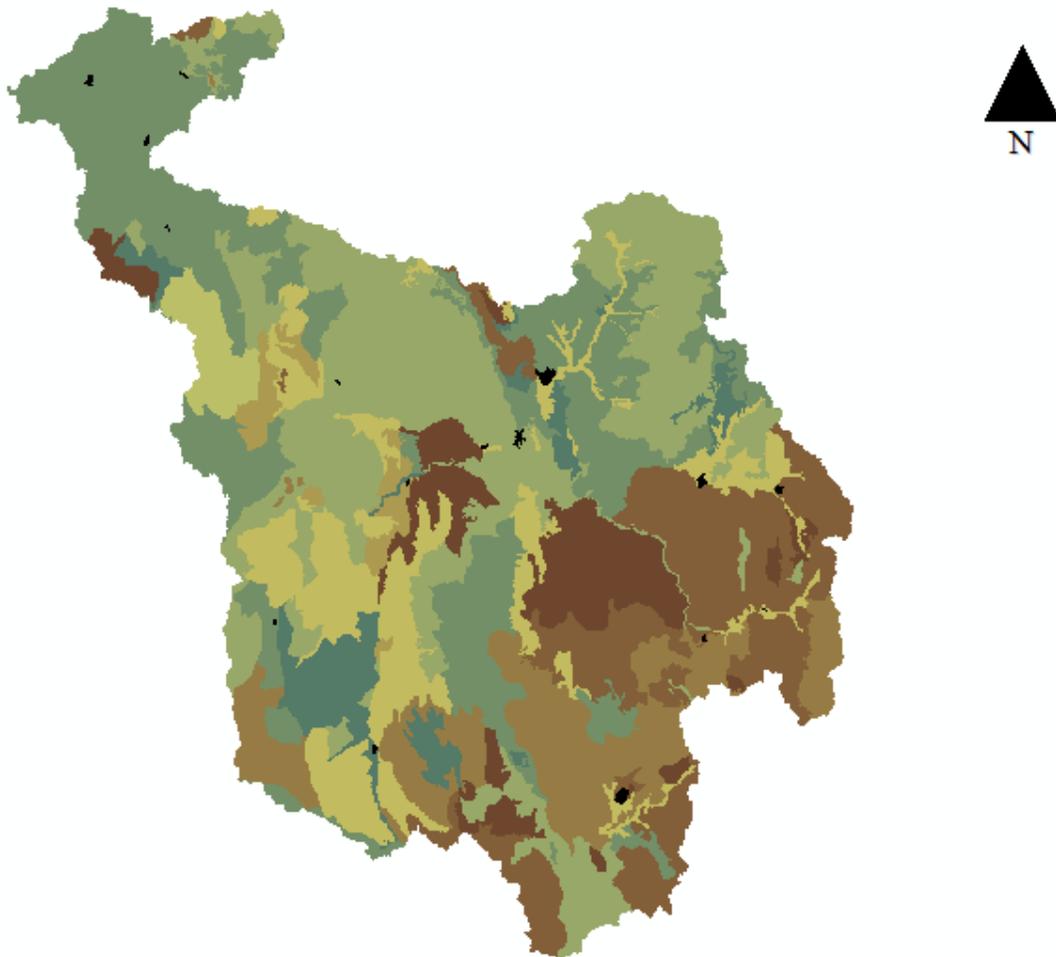


Figura 5.45 Factor K para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

De igual manera que con el factor “R”, el valor de “K” se dividió en 10 intervalos de clase, como lo muestra la Figura 5.46.

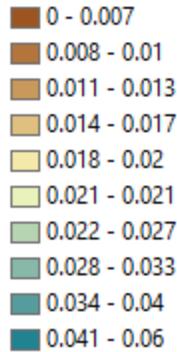


Figura 5.46 Clases del valor de K de la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

La figura 5.46 muestra los valores de K entre 0.007 y 0.06. Existen pequeñas áreas a las cuales se le asignó el valor de 0, porque corresponden cuerpos de agua o Zonas urbanas y se muestran en color negro en la Figura.5.45.

Las unidades del factor K , son: $Ton . ha/MJ . mm$.

5.3.4 Factor topográfico Longitud - Pendiente (LS)

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores: longitud (L) y grado de pendiente (S). La longitud L se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado de que ocurre una sedimentación o bien hasta el punto donde el escurrimiento, una vez concentrado, encuentra un canal de salida bien definido.

Agroasemex recomienda no calcular pendientes con distancias mayores a 300 m para la ecuación de USLE. Pues dichos mapas no tienen la resolución suficiente para indicar las áreas de flujo concentrado que determinarían las longitudes de pendiente.

El factor de grado de pendiente (S) refleja la influencia del ángulo en la erosión. La pendiente puede ser determinada utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Para la determinación de este factor se utilizó el MDE proporcionado por INEGI. Se determinó primero el factor L y después S , para finalmente obtener el producto de ambos, siguiendo la siguiente metodología.

Con la herramienta raster calculator se determinó el factor L , de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$\beta = (\text{sen}\theta / 0.0896) / \left[3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56 \right] \quad \text{Ecuación 5.8}$$

El valor de θ es conocido ya que corresponde a la pendiente que se calculó en las características fisiográficas, se deberá convertir a grados sexagesimales y posteriormente en radianes. El valor de λ requiere al tamaño de pixel en la imagen, el cual para este caso es de 30.2641416 m, resultado del tamaño de celda que proviene del MDE.

A continuación, la Figura 5.47 muestra el factor “L” en formato raster, resultado de aplicar las ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9 con la herramienta “álgebra de mapas” del software ArcGis.

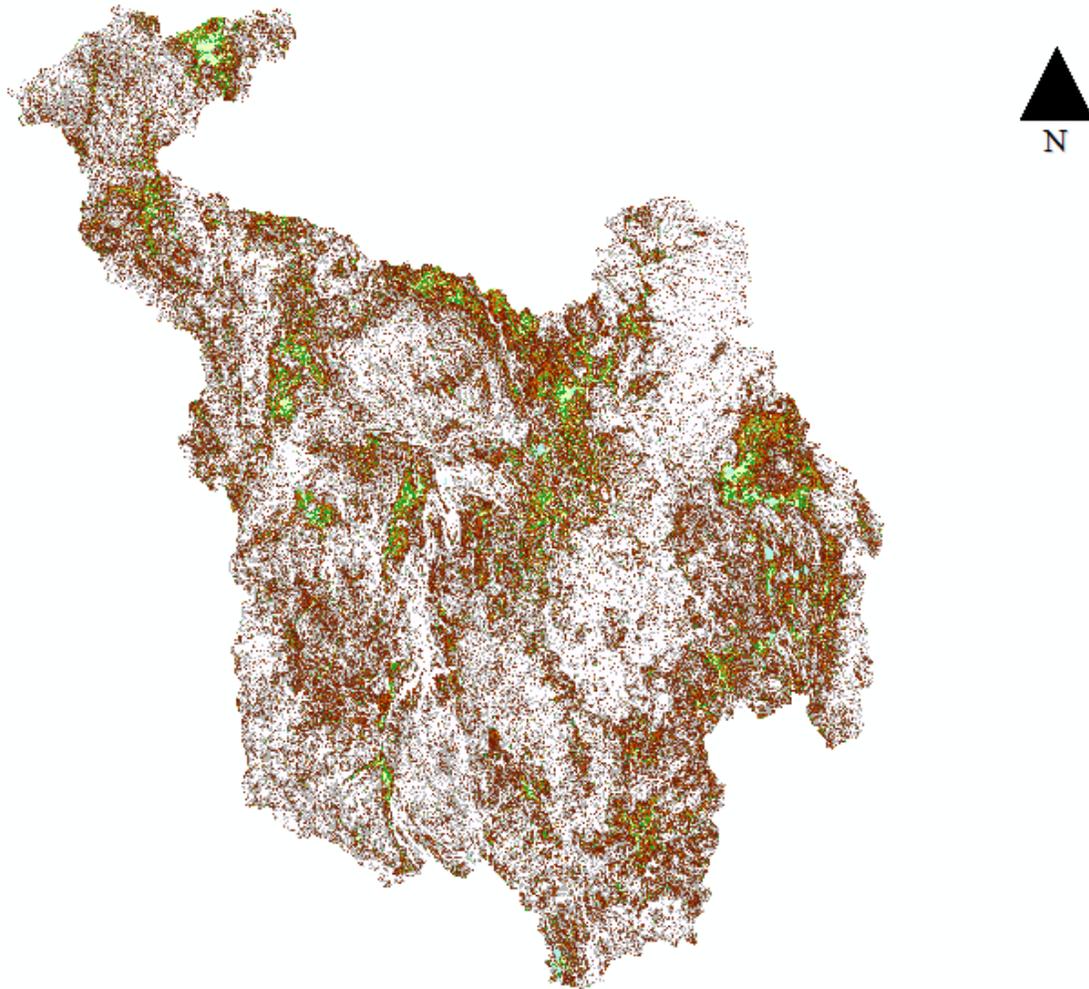


Figura 5.47 Factor L para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Para el factor S, las ecuaciones a utilizar son:

$$S = \begin{cases} 10.8 \cdot \text{sen}\theta + 0.03 & \text{si } \theta \leq 9\% \\ 16.8 \cdot \text{sen}\theta - 0.50 & \text{si } \theta > 9\% \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

De igual forma, con el “álgebra de mapas”, el factor “S” es calculado para la cuenca en formato raster se muestra en la Figura 5.48.

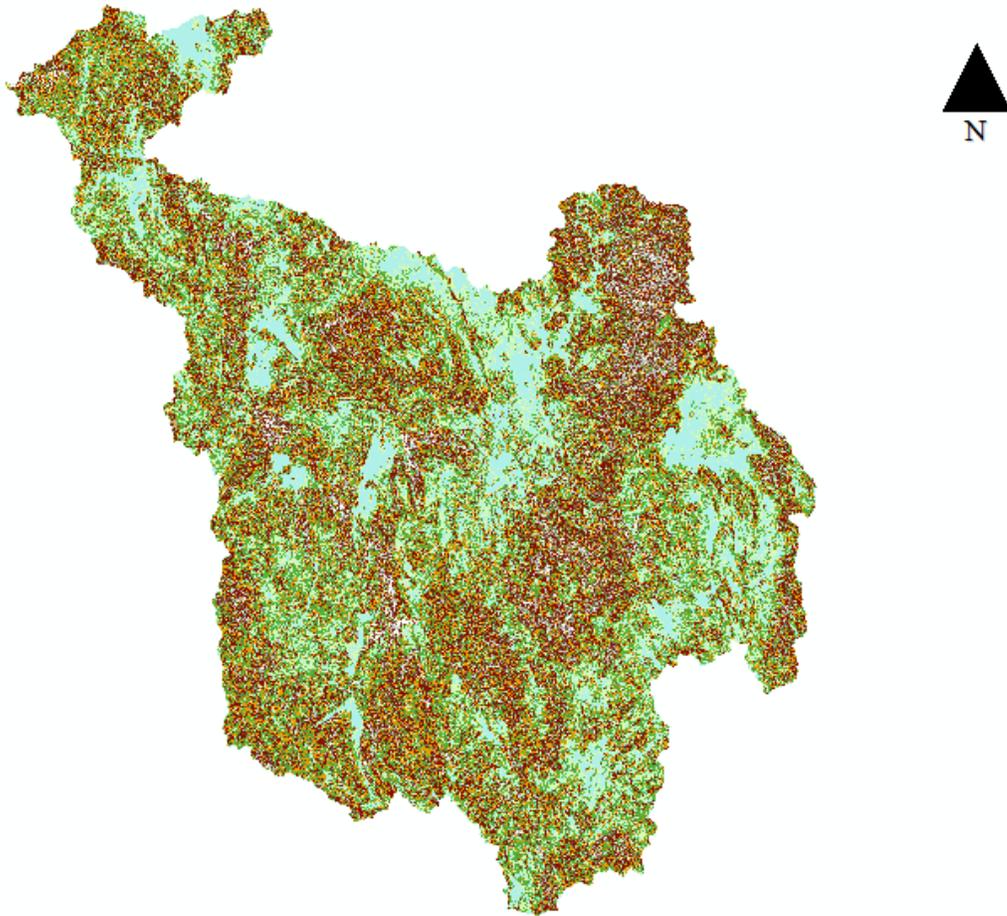


Figura 5.48 Factor S para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Finalmente, el factor “LS”, resultado del producto de las imágenes de las Figuras 5.47 y 5.48 se muestra en la Figura 5.49.

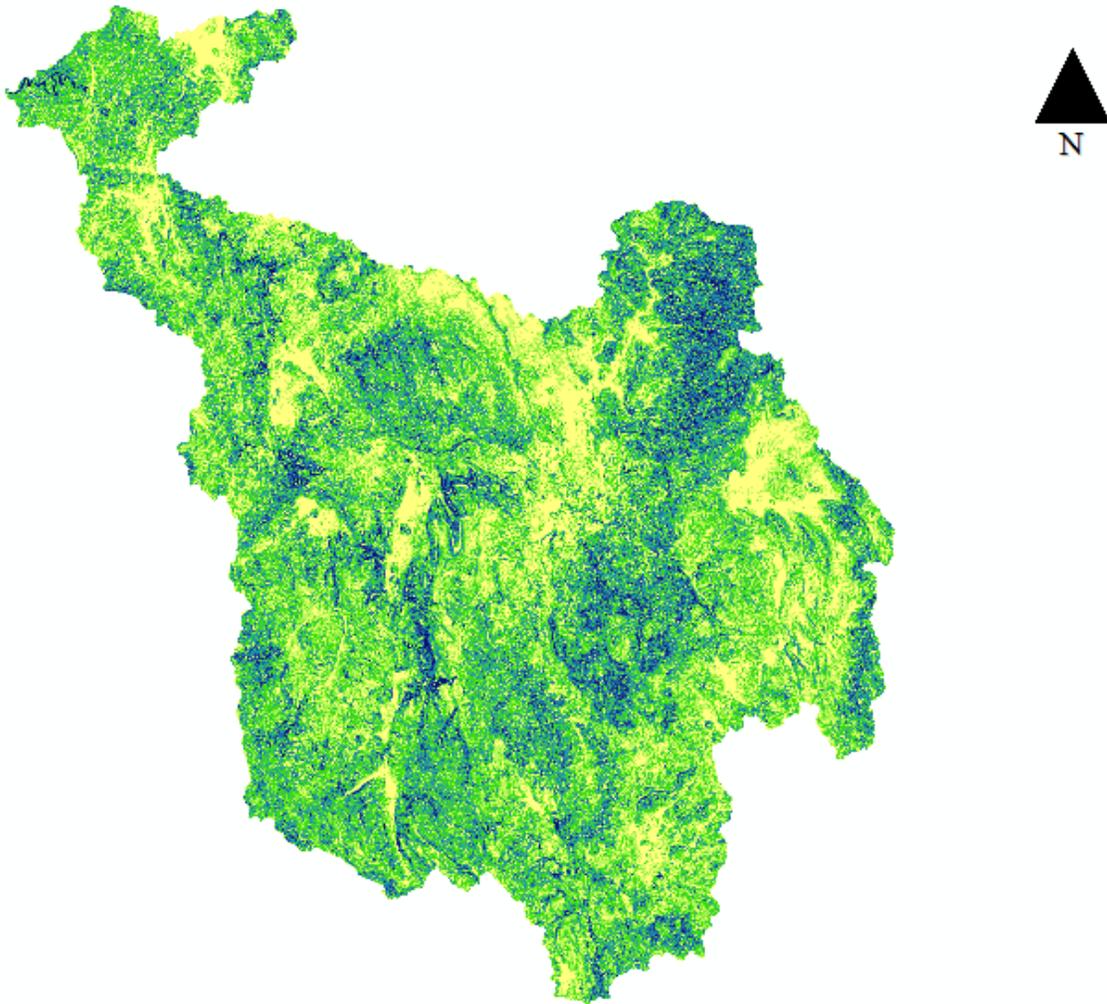


Figura 5.49 Factor LS para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Se clasificó el valor de “LS” en 10 intervalos de clase, los cuales aparecen en la figura 5.50.

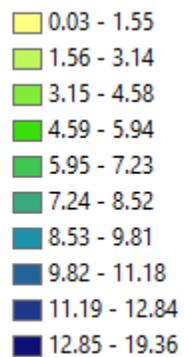


Figura 5.50 Clases del valor de LS de la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

El factor “LS” tienen unidades adimensionales.

5.3.5 Factor de vegetación y cultivo (C)

El factor C se asigna con el objeto de reflejar el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo en las tasas de erosión. A medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor de C es cada vez menor, por lo que el rango para este parámetro va de 0 (correspondiente a un terreno totalmente protegido) a 1.0 (para terrenos sin ninguna protección). Además de la vegetación activa, en el valor de C se toma en cuenta la presencia de residuos de plantas muertas, las raíces, los sistemas radiculares (conjunto de raíces) de los pastos y árboles, ya que todos estos elementos contribuyen a mantener al suelo en su sitio e incrementan la infiltración.

Para nuestra subcuenca, este factor se calculó de manera muy similar al factor K, mediante tablas e información vectorial de los usos de suelo del país. Acotamos dichos usos de suelo a la subcuenca, distribuidos en 640 polígonos o áreas. Los cuales se muestran en la Figura 5.51.

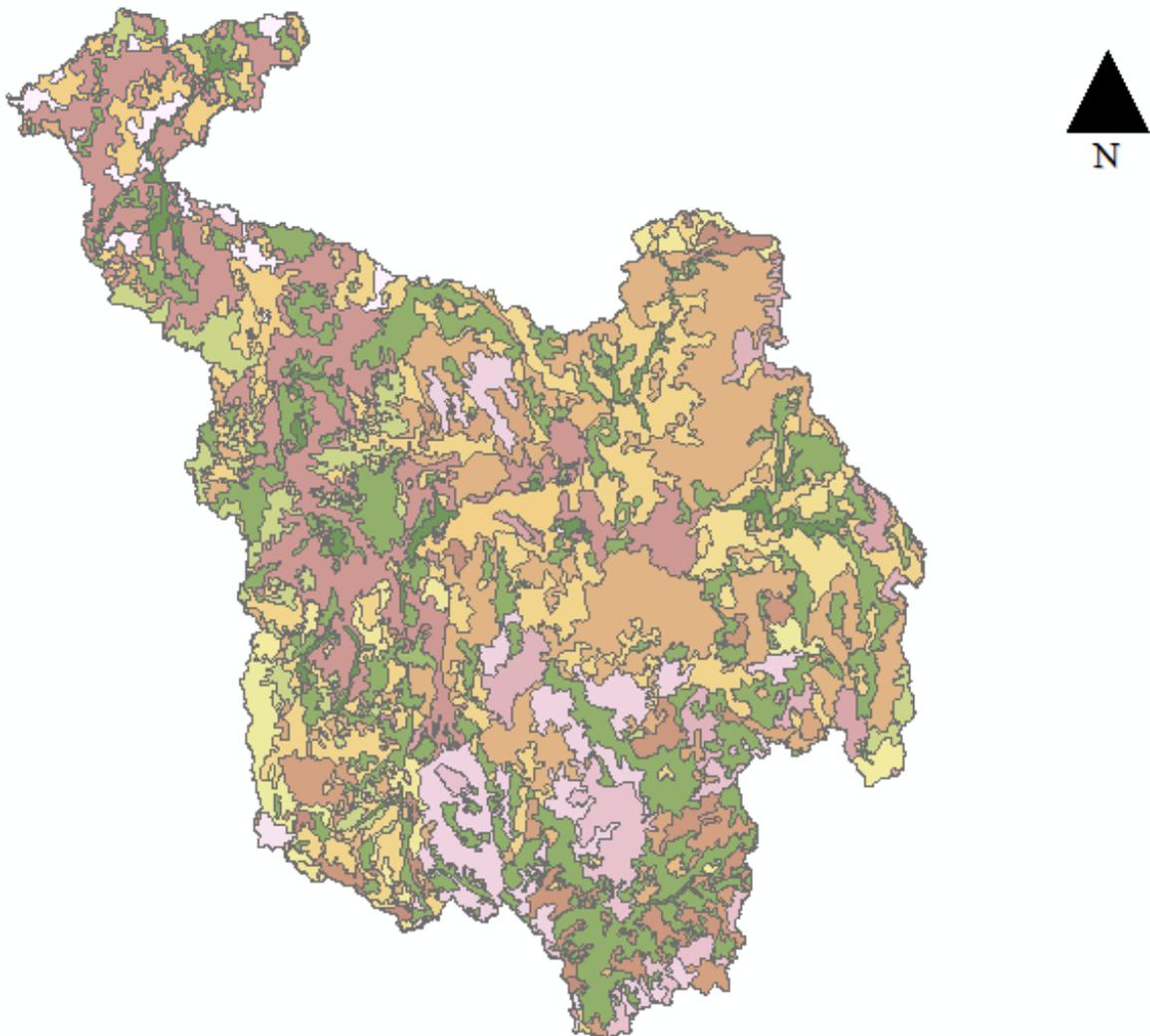


Figura 5.51 Uso de suelo de la subcuenca RH18Af. (Elaboración propia, 2018)

Para obtener el valor de C, la información necesaria es el uso de suelo.

En el caso de la subcuenca en estudio se presentan 20 diferentes tipos de usos de suelo, que se presentan en la Tabla 5.25 con respectivo valor de C.

| Uso de suelo | Factor C |
|--------------------------------------|----------|
| Zona urbana | 0.005 |
| Bosque de tascate | 0.01 |
| Bosque de mesofilo de montaña | 0.01 |
| Bosque de pino | 0.01 |
| Bosque de pino-encino | 0.01 |
| Bosque de encino | 0.1 |
| Bosque de encino-pino | 0.01 |
| Sin vegetacion aparente | 0.75 |
| Agua | 1 |
| Chaparral | 0.65 |
| Pastizal inducido | 0.02 |
| Agricultura en riego | 0.55 |
| Selva baja caducifolia | 0.5 |
| Agricultura de temporal | 0.75 |
| Palmar inducido | 0.75 |

Tabla 5.25 Factor C, de acuerdo a la clasificación WRB. (Agroasemex, S.A., 2011)

Los valores de C fueron obtenidos de la tabla presentada en el Anexo C, la cual estima los valores en función del uso de suelo.

Para asignar el valor de “C” a la imagen, primero se convirtió la información vectorial a formato raster lo que produjo como resultado la Figura 5.52.

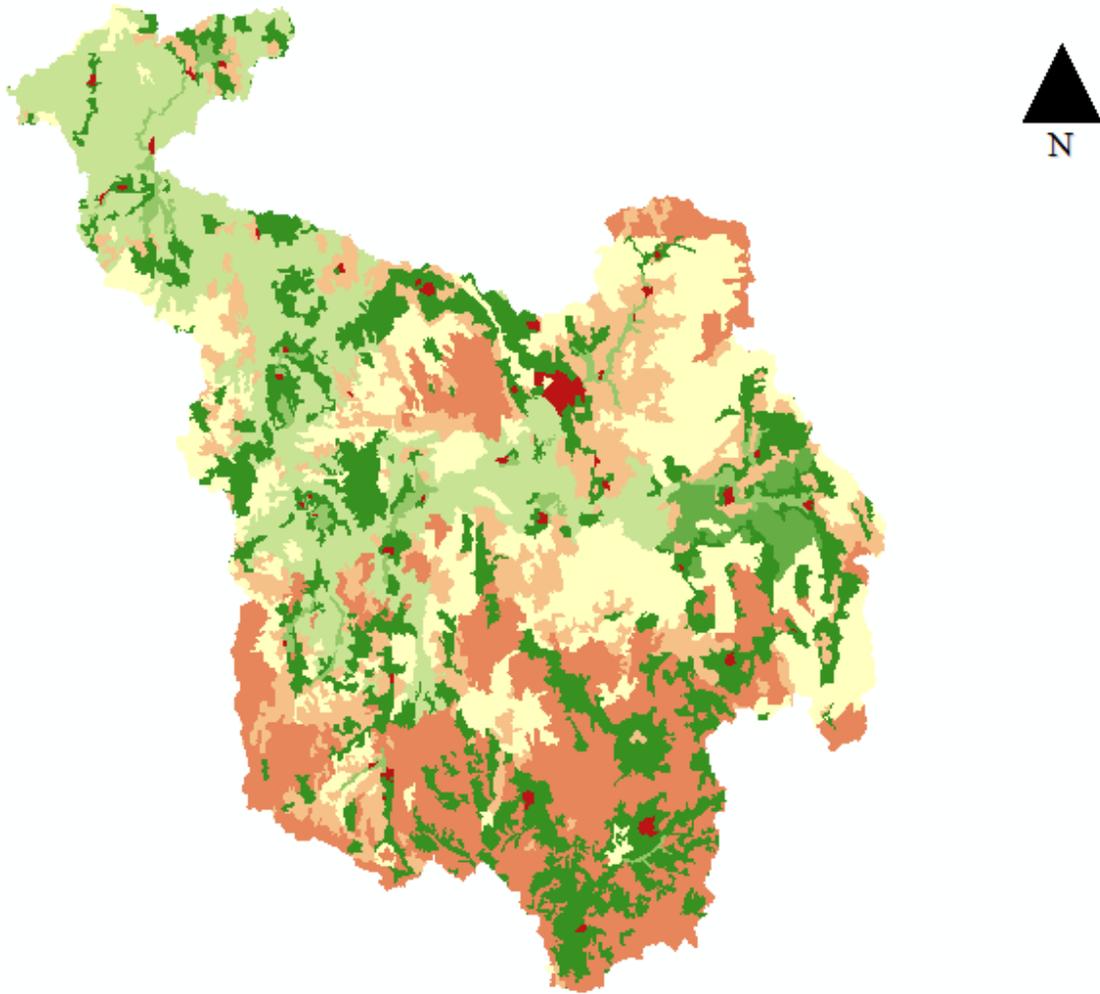


Figura 5.52 Factor C para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Posteriormente, la imagen de la Figura 5.52, se clasificó en 9 intervalos de clase para el valor de “C”, los que se muestran en la figura 5.53.

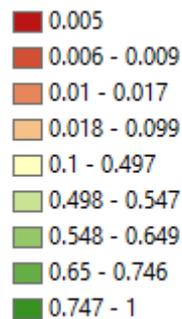


Figura 5.53 Clases del valor de C de la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

Los valores de “C” varían entre 0.005 y 1; Existen pequeñas áreas a las cuales se le asignó el valor de 1, dichas áreas corresponden a cuerpos de agua o zonas urbanas. Recordemos que el factor “C” es adimensional.

5.3.6 Factor de prácticas de conservación (P)

El factor de prácticas de conservación P en USLE es la tasa relativa de pérdida de suelo con una práctica específica. Las prácticas de conservación afectan principalmente la erosión mediante la modificación del patrón de flujo, grado de pendiente o dirección del escurrimiento superficial, y mediante la reducción de la tasa y cantidad de escurrimiento.

Algunas de las prácticas de conservación que se consideran en la evaluación de P para áreas cultivadas son las siguientes: surcado al contorno (laboreo, siembra y plantación, siguiendo las curvas de contorno o nivel), cultivos en faja, terraceo, establecimiento de obras de drenaje subsuperficial. En áreas semiáridas o pastizal son consideradas las prácticas de disturbio del suelo para el almacenamiento de humedad y reducción del escurrimiento.

Se revisó la información disponible en la agenda técnica agrícola de Oaxaca que proporciona la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); así como otras fuentes como no se detectó algún área significativa en donde se lleve a cabo algún tipo de práctica de conservación, el factor P asumió el valor de uno. Figura 5.54.



Figura 5.54 Factor P para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. (Elaboración Propia, 2018).

La Figura 5.54 es de un solo color puesto que todos los píxeles valen uno. El factor “P” es adimensional

5.3.7 Evaluación de la Erosión Hídrica.

Finalmente, calculados todos los parámetros de la ecuación de USLE se realizó el álgebra de mapas mediante ArcGis. Las unidades a operar debieron ser las correctas y también el tamaño de pixel deberá ser el mismo para todos los factores calculados. Esto con el objetivo de tener una respuesta correcta para el fenómeno de la erosión.

El resultado de la erosión final producto de los factores R, K, LS, C, y P se muestran en la Figura 5.55.

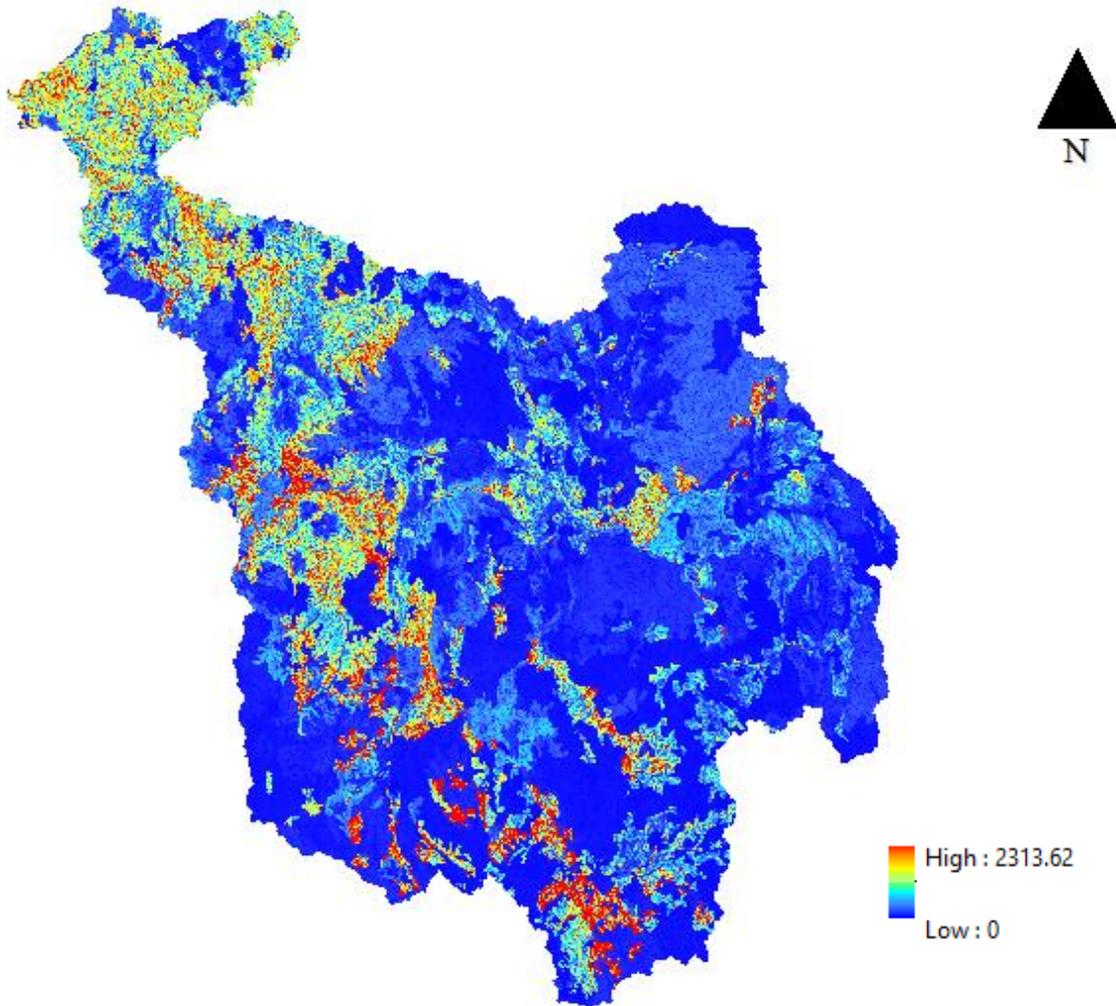


Figura 5.55 Erosión Hídrica de la subcuenca RH18Af. (Elaboración propia, 2018)

Los valores varían de 0 a 2313.62; Los valores de cero corresponden a los cuerpos de agua y zonas urbanas, y el valor de 2313.62 representa el máximo valor de erosión en la cuenca. Recordemos que las unidades de la erosión son *Ton/ha . año* o *Ton/ha /año*.

Se consultaron las fuentes de Agroasemex y la FAO y, con la intención de ver como se clasifica la tasa de erosión de acuerdo a los valores obtenidos. Se optó por utilizar la clasificación de Agroasemex que es muy parecida a la de la FAO. Dicha clasificación es la que se muestra en la Tabla 5.26.

| Rango | Clasificación |
|-----------|---------------|
| < 50 | Baja |
| 50 – 100 | Media |
| 100 – 150 | Considerable |
| 150 – 200 | Alta |
| 200 – 250 | Muy alta |
| > 250 | Extrema |

Tabla 5.26 Rangos de clasificación de la erosión hídrica. (Agroasemex, S.A., 2011)

La Figura 5.56 es el resultado de la clasificación anterior aplicado a la Figura 5.55, con el objetivo de conocer los porcentajes de área afectada.

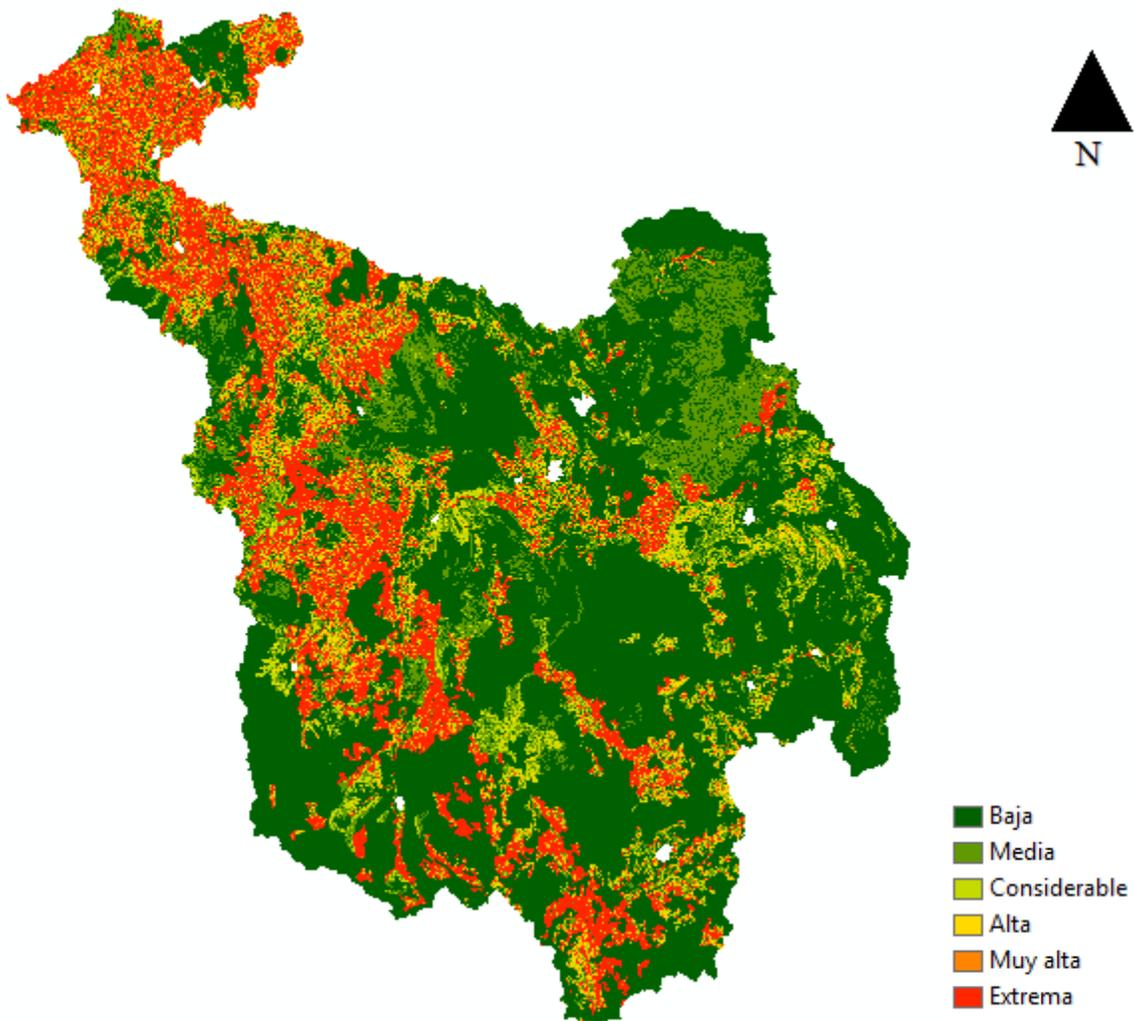


Figura 5.56 Clasificación de la erosión hídrica de la subcuenca RH18Af. (Elaboración propia, 2018)

En la Figura 5.56, predomina la tasa de erosión baja en la cuenca, seguida de erosión extrema y alta. Para poder comprobarlo se obtuvo el porcentaje de área que ocupa cada clasificación, dicho porcentaje se presenta en la Tabla 5.27.

| Rango | Clasificación | % de área |
|-----------|---------------|-----------|
| < 50 | Baja | 55.70% |
| 50 – 100 | Media | 13.45% |
| 100 – 150 | Considerable | 6.37% |
| 150 – 200 | Alta | 4.57% |
| 200 – 250 | Muy alta | 3.83% |
| > 250 | Extrema | 16.09% |

Tabla 5.27 Clasificación de la erosión Hídrica de la subcuenca RH18Af. (Elaboración propia, 2018)

Como podemos ver en la Tabla 5.27, la tasa de erosión baja es la que predomina en la subcuenca con un 55.7 % del área total de la cuenca. Sin embargo, hay un importante porcentaje de erosión extrema: 16.09 %. Las zonas donde se presentan estos valores se deben a una combinación de factores como los valores de precipitación media anual, las grandes pendientes que existen, la alta erodabilidad del suelo y la vegetación existentes en el lugar. Podemos concluir que, sí existe erosión considerable en la cuenca.

5.4 Evaluación de la vulnerabilidad

De acuerdo al Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIFEN), la vulnerabilidad son las características de un sistema que lo hacen susceptible a los efectos de una amenaza.

Identificación de variables.

A continuación, se identificaron las variables más representativas para el fenómeno de la erosión en la subcuenca de estudio. Las variables que corresponden a las características físicas de la subcuenca son: la pendiente, la erodabilidad del terreno y la cobertura vegetal.

Posterior a la identificación, se asignó una ponderación o peso de acuerdo a su incidencia ante la erosión. A mayor peso, mayor incidencia, para nuestro caso se otorgó una puntuación igual a cada variable porque tienen un el mismo nivel de incidencia, es decir el suelo es susceptible al fenómeno de la erosión debido a su pendiente, edafología y cobertura vegetal.

| Variable | Indicador crítico. | Unidades | Ponderación |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|
| Pendiente | 0 a 70 | [°] | 10 |
| Erodabilidad del suelo | 0.007 a 0.079 | [(Ton .ha)(MJ .mm)] | 10 |
| Cobertura vegetal | 0.005 a 0.75 | [1] | 10 |

Tabla 5.28 Variables de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

Para obtener la vulnerabilidad global se utilizó la metodología Heurística que combina lo cualitativo con lo cuantitativo. Se realiza de la siguiente manera.

Se eligió una ponderación de 10 para cada variable puesto que tienen el mismo nivel de incidencia en el fenómeno de la erosión por lo tanto nuestra vulnerabilidad estará asociada a la combinación de variables que se presenten.

Para la vulnerabilidad de la pendiente, se revisaron diferentes bibliografías y se concluyó que coincidían con la clasificación que se muestra en la Tabla 5.30. Si la pendiente es menor a 12 grados se considera poco vulnerable, por el contrario, si la pendiente es mayor a 50 grados, se considera muy vulnerable.

Para el caso de la erodabilidad del suelo y la cobertura se propuso la clasificación que se muestra en la tabla 5.30 justificando su grado de vulnerabilidad en función del tipo de suelo. Por ejemplo, los Leptosoles en general son suelos muy someros y pedregosos con poca presencia de materiales finos por lo tanto son poco erodables. Por el contrario, los suelos tipo Vertizol presentan con una alta proporción de arcillas por lo tanto son suelos muy susceptibles a ser erosionados.

Para el caso de la Cobertura vegetal se realizó una propuesta muy similar a la edafología, por ejemplo, las áreas donde se presentan bosques del tipo pino-encino son zonas muy poco erodables debido a la abundante vegetación que presentan. Por el contrario, las áreas que se utilizan para realizar agricultura de temporal son altamente afectados por el fenómeno de la erosión debido a que no son suelos sin protección vegetal

| Variables de vulnerabilidad | | Pendiente [grados] | Erodabilidad | Cobertura |
|-----------------------------|----------|--------------------|--------------|-------------------------------|
| Ponderación | | 10 | 10 | 10 |
| Bajo | 1 | S < 12 | Leptosol | Zona urbana |
| | | | | Bosque de táscate |
| | | | | Bosque de mesófilo de montaña |
| | | | | Bosque de pino |
| | | | | Bosque de pino-encino |
| | | | | Agua |
| Medio | 2 | 12 – 25 | Phaeozem | Pastizal inducido |
| | | | | Bosque de encino |
| Alto | 3 | 25 – 50 | Luvisol | Agricultura en riego |
| | | | Regosol | |
| | | | Fluvisol | Selva baja caducifolia |
| | | | Cambisol | |
| Muy alto | 4 | S > 50 | Vertisol | Palmar inducido |
| | | | Calcisol | |
| | | | | Agricultura de temporal |

Tabla 5.29 Criterios de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

Mediante ArcGis a cada variable le asigné una ponderación (10) y lo multipliqué por su correspondiente valor de vulnerabilidad (1, 2, 3 o 4). De esta forma obtuve un puntaje para cada celda como se muestra en la Tabla 5.30.

| Variables de vulnerabilidad | | Pendiente [grados] | Erodabilidad | Cobertura |
|-----------------------------|----------|--------------------|--------------|-----------|
| Ponderación | | 10 | 10 | 10 |
| Bajo | 1 | 10 | 10 | 10 |
| Medio | 2 | 20 | 20 | 20 |
| Alto | 3 | 30 | 30 | 30 |
| Muy Alto | 4 | 40 | 40 | 40 |

Tabla 5.30 Ponderación de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

Posterior a esto se suman las variables de vulnerabilidad mediante algebra de mapas como se muestra en la tabla 5.31. Dándole a cada celda el valor de la vulnerabilidad global, obteniéndose un mapa de vulnerabilidad física del suelo de la cuenca.

| Variables de vulnerabilidad | | Pendiente [grados] | Erodabilidad | Cobertura | Suma |
|-----------------------------|----------|--------------------|--------------|-----------|------------|
| Ponderación | | 10 | 10 | 10 | - |
| Bajo | 1 | 10 | 10 | 10 | 30 |
| Medio | 2 | 20 | 20 | 20 | 60 |
| Alto | 3 | 30 | 30 | 30 | 90 |
| Muy Alto | 4 | 40 | 40 | 40 | 120 |

Tabla 5.31 Suma de ponderación de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

El mapa de vulnerabilidad lo clasifique generando rangos de manera geométrica de acuerdo a los valores máximos y mínimos posibles que se pudieran obtener. Los rangos propuestos por el autor se presentan en la Tabla 5.32.

| Niveles de Vulnerabilidad | | | Rango |
|---------------------------|---|---|----------|
| Bajo | 1 |  | 30 – 53 |
| Medio | 2 |  | 53 – 75 |
| Alto | 3 |  | 75 – 97 |
| Muy alto | 4 |  | 97 – 120 |

Tabla 5.32 Rangos de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

El mapa de vulnerabilidad se muestra en la Figura 5.57 con su correspondiente clasificación de colores.

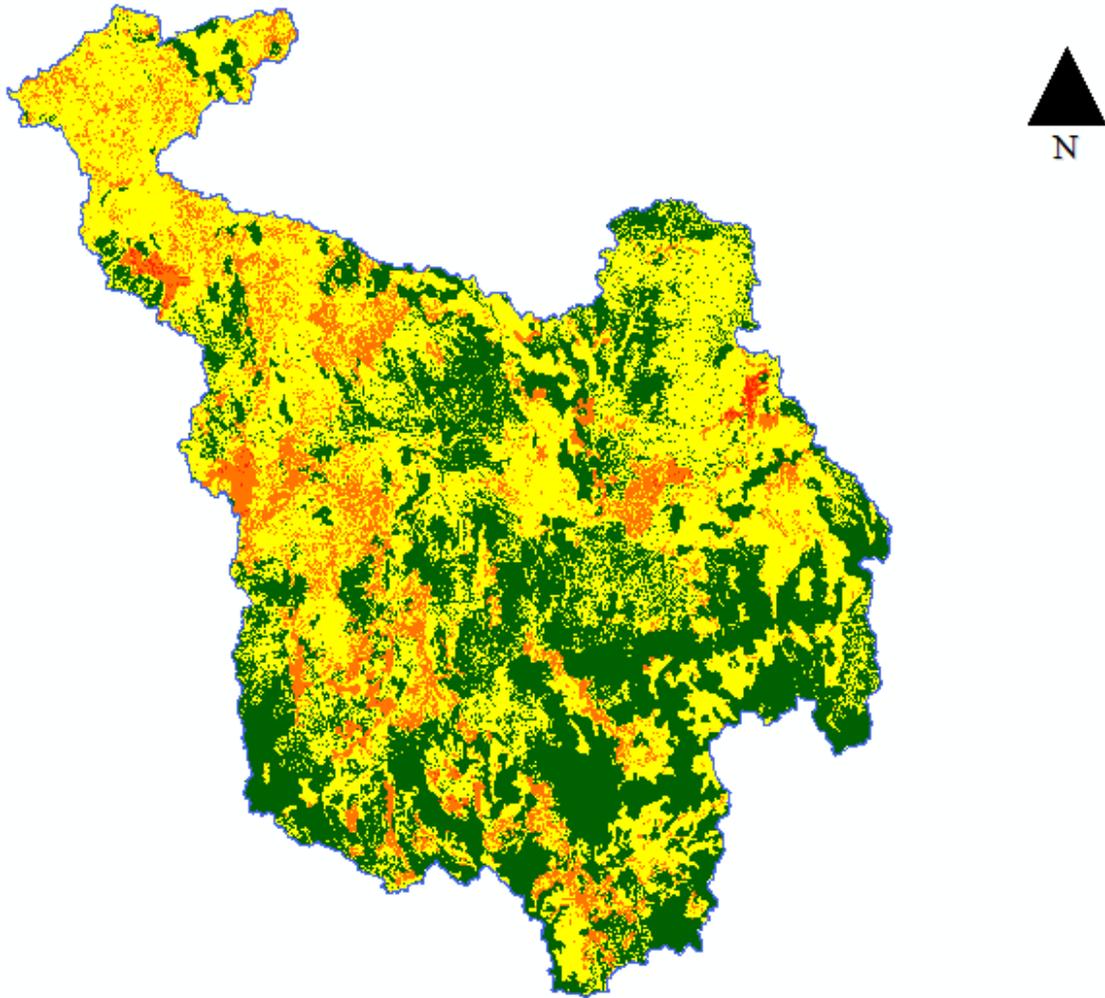


Figura 5.57 Mapa de vulnerabilidad física del suelo. (Elaboración propia, 2018)

Como se puede observar los colores verde y amarillo predominan en nuestro mapa de vulnerabilidad. Podríamos decir que en general la vulnerabilidad en nuestra cuenca es de baja a media. Recordemos que esta vulnerabilidad está aplicada a las variables físicas de la cuenca. Aunque también tenemos zonas donde la vulnerabilidad es alta y muy alta. En la siguiente tabla se presenta el porcentaje de área, para cada nivel de vulnerabilidad en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco.

| Niveles de Vulnerabilidad | | Rango | Porcentaje de Área |
|---------------------------|---|----------|--------------------|
| Bajo | 1 | 30 – 53 | 37.84 % |
| Medio | 2 | 53 – 75 | 50.00 % |
| Alto | 3 | 75 – 97 | 11.87 % |
| Muy alto | 4 | 97 – 120 | 0.30 % |

Tabla 5.33 Porcentajes de área de vulnerabilidad física del suelo en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco. (Elaboración propia, 2018)

En la Tabla 5.33 podemos comprobar que la vulnerabilidad que predomina en nuestra subcuenca es la media, seguida de la baja, alta y finalmente una muy pequeña parte con vulnerabilidad muy alta.

5.5 Obtención del riesgo por erosión hídrica

El Riesgo está definido como la resultante de la interacción del Peligro con la Vulnerabilidad, como se expresa en la ecuación 5.10.

$$Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad \quad \text{Ecuación 5.10}$$

De acuerdo al Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIFEN), la amenaza se define como un fenómeno que puede ocasionar impactos, daños o la pérdida de medios de sustento. Para nuestro caso la erosión hídrica representaría la amenaza.

Se clasifico a la amenaza con mismo número de intervalos que la vulnerabilidad, con la intención de homogeneizar ambas variables.

La erosión hídrica propuse clasificarla con un numero del 1 al 4, considerando los rangos de la Tabla 5.34.

| Niveles de Amenaza | | | Rango |
|--------------------|---|---|-----------|
| Bajo | 1 |  | < 50 |
| Medio | 2 |  | 50 – 150 |
| Alto | 3 |  | 150 – 200 |
| Muy alto | 4 |  | > 250 |

Tabla 5.34 Rangos de Amenaza. (Elaboración propia, 2018)

Por lo tanto, en la Figura 5.58 se muestra el mapa de la región, con la nueva clasificación propuesta anteriormente.

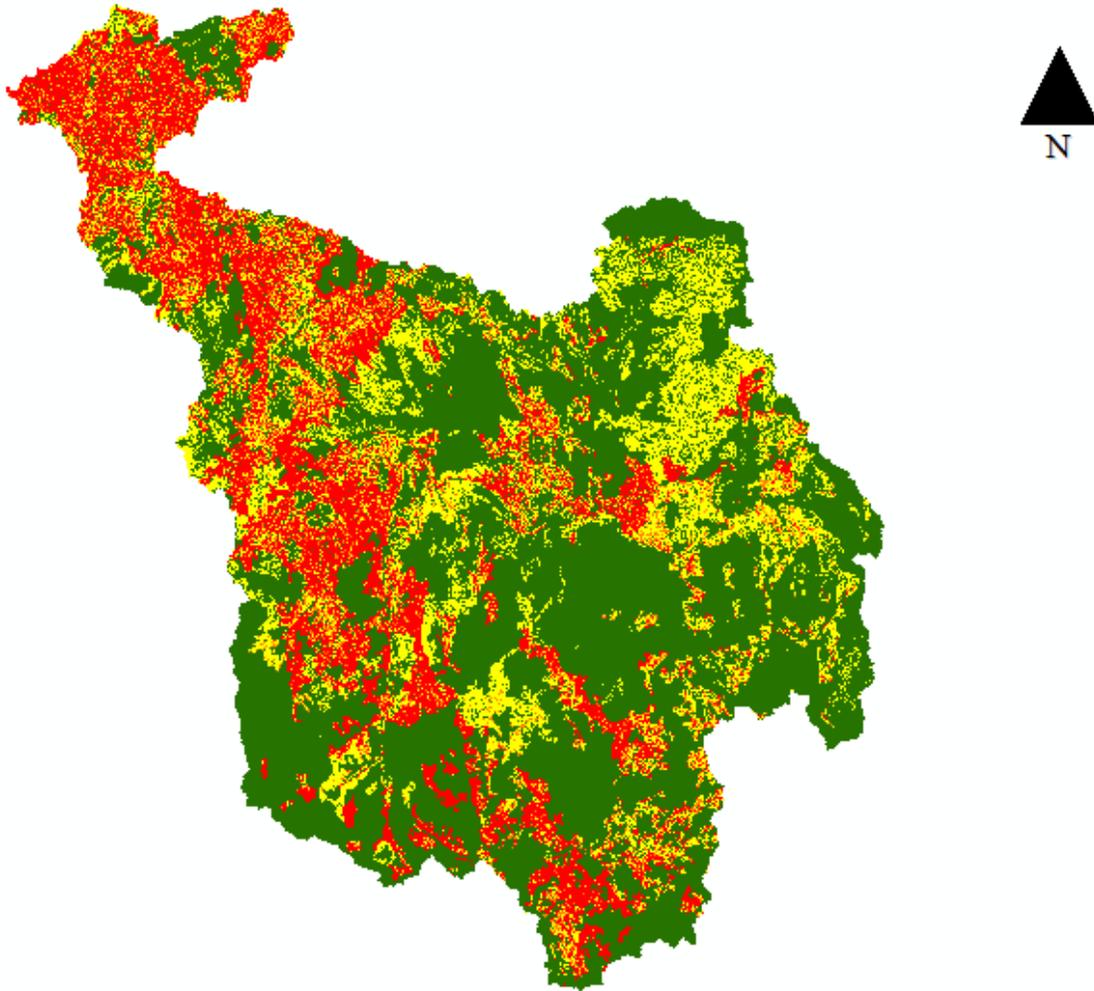


Figura 5.58 Mapa de Amenaza por erosión hídrica. (Elaboración propia, 2018)

Con la nueva clasificación los porcentajes de área de la sub cuenca RH18Af – Río Mixteco, son ahora: Tabla 5.35.

| Niveles de Amenaza | | Rango | Porcentaje de Área |
|--------------------|---|-----------|--------------------|
| Bajo | 1 | < 50 | 55.70 % |
| Medio | 2 | 50 – 150 | 19.82 % |
| Alto | 3 | 150 – 200 | 4.57 % |
| Muy alto | 4 | > 250 | 19.92 % |

Tabla 5.35 Porcentajes de área de amenaza por erosión hídrica en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco. (Elaboración propia, 2018)

Se puede apreciar que más de la mitad de la cuenca presenta una amenaza baja ante el fenómeno de la erosión hídrica. Aunque existe un porcentaje importante donde la erosión es alta y muy alta.

En la medida que tanto la amenaza por erosión hídrica (peligro), como las condiciones físicas de vulnerabilidad de la subcuenca presentan variaciones en el territorio, es posible determinar una

distribución espacial del riesgo, con la finalidad de determinar y priorizar acciones, intervenciones y proyectos de manera específica, orientados a disminuir los niveles de vulnerabilidad y riesgo.

Para efectos de la estimación de los escenarios de riesgo se propuso una matriz que representa los niveles bajo, medio, alta y muy alta tanto de vulnerabilidad como de amenaza. El autor propone los niveles de riesgo con base a la intersección mostrada en la Figura 5.39

| | | Zonas de Vulnerabilidad Física | | | | |
|---|----------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| | | Baja | Media | Alta | Muy alta | |
| Zonas de Amenaza por erosión hídrica | 1 | Baja | Bajo | Bajo | Medio | Medio |
| | 2 | Media | Bajo | Medio | Medio | Alto |
| | 3 | Alta | Medio | Medio | Alto | Muy alto |
| | 4 | Muy alta | Medio | Alto | Muy alto | Muy alto |
| | | Niveles de Riesgo ante el fenómeno de erosión hídrica | | | | |

Figura 5.59 Matriz de escenarios de riesgo ante el fenómeno de erosión hídrica erosión. (Elaboración propia, 2018)

Como podemos observar estos son los posibles escenarios que se nos pueden presentar con nuestras amenazas y vulnerabilidades obtenidas. Mediante ArcGis utilizando algebra de mapas se realiza el producto de nuestros mapas de vulnerabilidad y amenaza. El producto de dicha operación se clasifica de acuerdo a la matriz de escenarios anterior.

En la siguiente Figura se muestra los niveles de riesgo calculados para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco ante el fenómeno de erosión hídrica.

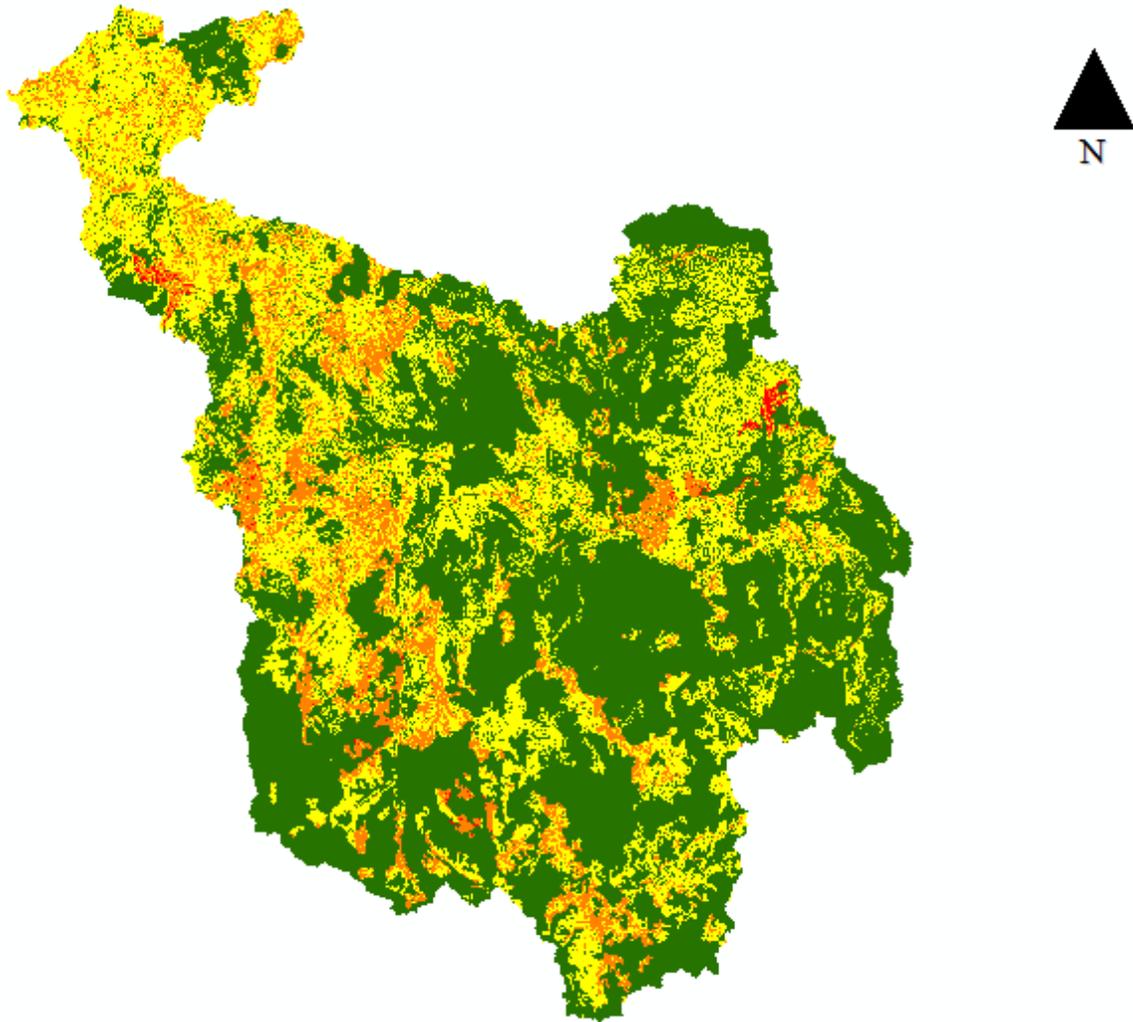


Figura 5.60 Mapa de Riesgo por erosión hídrica. (Elaboración propia, 2018)

Los niveles de riesgo de la subcuenca RH18Af – Río Mixteco, están asociados a la matriz de escenarios de riesgo y se muestran en la siguiente tabla con su correspondiente porcentaje de área.

| Niveles de Riesgo | | | Porcentaje de Área |
|-------------------|---|--|--------------------|
| Bajo | 1 | | 55.89 % |
| Medio | 2 | | 32.92 % |
| Alto | 3 | | 10.90 % |
| Muy alto | 4 | | 0.30 % |

Tabla 5.36 Niveles de Riesgo por erosión hídrica en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco. (Elaboración propia, 2018)

Como podemos observar el análisis de riesgo, resulto predominar en un 89 % del área de nuestra subcuenca el riesgo bajo y medio. Y en apenas un 11 % se presentó un riesgo alto y muy alto. Podemos concluir que el riesgo para nuestra subcuenca RH18Fa – Río Mixteco es de bajo a medio.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos para la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. Se analizará cada nivel de amenaza con el objetivo de entender qué se consideró para dar el nivel de amenaza a un pixel o celda en el mapa de peligro.

Para el caso de la vulnerabilidad se analizarán las variables que se consideraron en la susceptibilidad de la estructura del suelo y el significado posible que tiene un pixel en cada nivel de vulnerabilidad.

Finalmente, se analiza cómo interactúa la amenaza y la vulnerabilidad en una matriz de riesgos, mediante la construcción de escenarios y el significado que tiene cada nivel de riesgo en el mapa de riesgos.

6.1 Del peligro

Se realizará un análisis del mapa de erosión obtenido en el capítulo anterior (Figura 6.1), puesto que es el fenómeno que representa una amenaza potencial. Se analizará a nivel de subcuenca el comportamiento de la erosión con base a los factores con los que se calculó, es decir erosividad de la lluvia, que está asociado a la precipitación media anual, la erodabilidad del suelo, el factor longitud – pendiente, la cobertura vegetal del suelo y las prácticas de conservación de suelo.

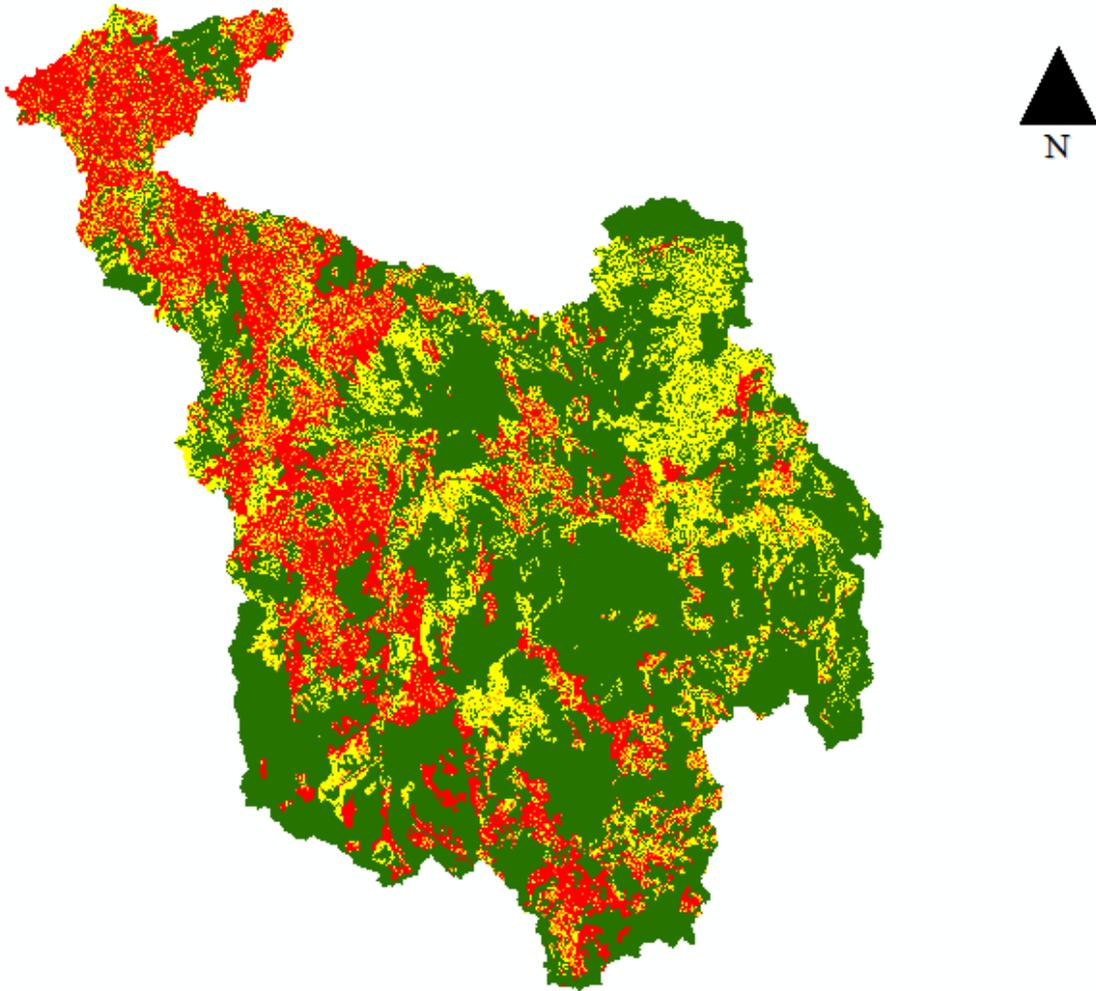


Figura 6.1 Mapa de Amenaza por erosión hídrica. (Elaboración propia, 2018)

El mapa de erosión potencial y la clasificación que propone el autor se muestra en la Figura.6.1. y Tabla 6.1.

| Niveles de Amenaza | | | Rango |
|--------------------|---|---|-----------|
| Bajo | 1 |  | < 50 |
| Medio | 2 |  | 50 – 150 |
| Alto | 3 |  | 150 – 200 |
| Muy alto | 4 |  | > 250 |

Tabla 6.1 Niveles de amenaza por erosión hídrica en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco. (Elaboración propia, 2018)

Se seleccionó un pixel o celda aleatoriamente dentro de cada nivel de amenaza y se obtuvieron los factores que determinaron dicho valor de erosión hídrica y nivel de amenaza. En Tabla 6.2 se muestran dichos factores.

| Niveles de Amenaza | | Rango | Factores | | | | Erosión hídrica |
|--------------------|---|-----------|----------|----------|-------|----------------------|-----------------|
| | | | R | K | S | C | |
| Bajo | 1 | < 50 | 3406 | Leptosol | 4.35 | Bosque encino | 2.35 |
| Medio | 2 | 50 – 150 | 2965 | Leptosol | 16.95 | Chaparral | 102.14 |
| Alto | 3 | 150 – 200 | 2969 | Vertisol | 12.38 | Agricultura Temporal | 163.50 |
| Muy alto | 4 | > 250 | 5019 | Luvisol | 23.89 | Agricultura Temporal | 324.10 |

Tabla 6.2 Factores y niveles de amenaza por erosión hídrica en nuestra subcuenca RH18 – Río Mixteco. (Elaboración propia, 2018)

Para el análisis de cada nivel se consideraron los factores L constante debido a que en nuestros mapas de erosión se trabajó con el mismo tamaño de pixel que nos proporcionó INEGI en el modelo digital de elevación (30 metros). También se supuso el Factor P como la unidad debido a que no se encontró información de prácticas de conservación de suelos en la zona.

Nivel de amenaza bajo.

Para un nivel de amenaza bajo tenemos que su valor de R es de 3406 $MJ .mm/ha .año$, que corresponde a una precipitación media anual de 1006 [mm] asociada a una precipitación media, puesto que en la subcuenca la precipitación varía de los 600 a los 1900 mm anualmente.

Para el factor K tenemos una edafología que principalmente se compone de Leptosol el cual tiene un valor de erodabilidad de 0.02, es decir tiene una erodabilidad baja. Para el caso de nuestra pendiente es un valor bajo, de 4.35 ° y nuestra cobertura vegetal tiene un valor de 0.01, se trata de un bosque de encino, el cual nos brinda una protección alta a la erosión hídrica alta.

En conclusión, para este nivel podemos esperar una amenaza por erosión baja, debido a la precipitación media, la erodabilidad del suelo baja, una pendiente baja y una protección por cobertura vegetal alta.

Nivel de amenaza Medio.

Para un nivel de amenaza medio tenemos que su valor de R es de 2 965 $MJ .mm/ha .año$, que corresponde a una precipitación media anual de 898 [mm] la cual corresponde a una precipitación relativamente baja.

Para el factor K tenemos una edafología que principalmente se compone de Leptosol el cual tiene un valor de erodabilidad de 0.02, es decir tiene una erodabilidad baja. Para el caso de la pendiente su valor medio, es 16.95 ° y la cobertura vegetal tiene un valor de 0.65, se trata de una vegetación tipo chaparral, el cual brinda una protección muy baja a la erosión hídrica.

En conclusión, para este nivel podemos esperar una amenaza por erosión media, debido a la precipitación y erodabilidad del suelo baja, una pendiente media. Pero lo que hace que la erosión sea media y no baja es su muy baja protección por cobertura vegetal, ya que los chaparrales son altamente vulnerables a la erosión hídrica.

Nivel de amenaza Alto.

Para un nivel de amenaza alto el valor de R es de 2969 $MJ \cdot mm/ha \cdot año$, que corresponde a una precipitación media anual de 897 [mm] que es una precipitación relativamente baja.

Para el factor K tenemos una edafología que principalmente se compone de Vertisol con un valor de erodabilidad de 0.079, es decir una erodabilidad alta. Para el caso de la pendiente su valor medio, es de 12.38 ° y la cobertura vegetal tiene un valor de 0.75, se trata de un uso de suelo de tipo agricultura temporal, el cual brinda la protección más baja a la erosión hídrica.

En conclusión, para este nivel podemos esperar una amenaza por erosión alta, aunque la precipitación baja, la erodabilidad del suelo es de las más altas, tiene una pendiente media. Además, su baja protección por cobertura vegetal, ya que el uso de suelo de tipo agricultura temporal es el más vulnerable a la erosión hídrica.

Nivel de amenaza muy Alto.

Para un nivel de amenaza muy alto tenemos que su valor de R es de 5019 $MJ \cdot mm/ha \cdot año$, que corresponde a una precipitación media anual de 1274 [mm] que es una precipitación relativamente alta.

Para el factor K tenemos una edafología que principalmente se compone de Luvisol con un valor de erodabilidad de 0.04, es decir tiene una erodabilidad media. Para el caso de la pendiente su valor es relativamente alto, de 23.89 ° y la cobertura vegetal tiene un valor de 0.75, se trata de un uso de suelo de tipo agricultura temporal, el cual brinda la protección más baja a la erosión hídrica.

En conclusión, para este nivel podemos esperar una amenaza por erosión muy alta, puesto que la precipitación es alta. Aunque la erodabilidad del suelo es media, con una pendiente alta. Además, baja protección por cobertura vegetal, ya que el uso de suelo de tipo agricultura temporal es el más vulnerable a la erosión hídrica.

6.2 De la Vulnerabilidad

Se realizará un análisis del mapa de vulnerabilidad (Figura 6.2) física del suelo de nuestra subcuenca, se analizará cada una de las variables que se consideraron en la evaluación de la vulnerabilidad del suelo. Es decir, la vulnerabilidad de la edafología, el uso de suelo y la pendiente del terreno.

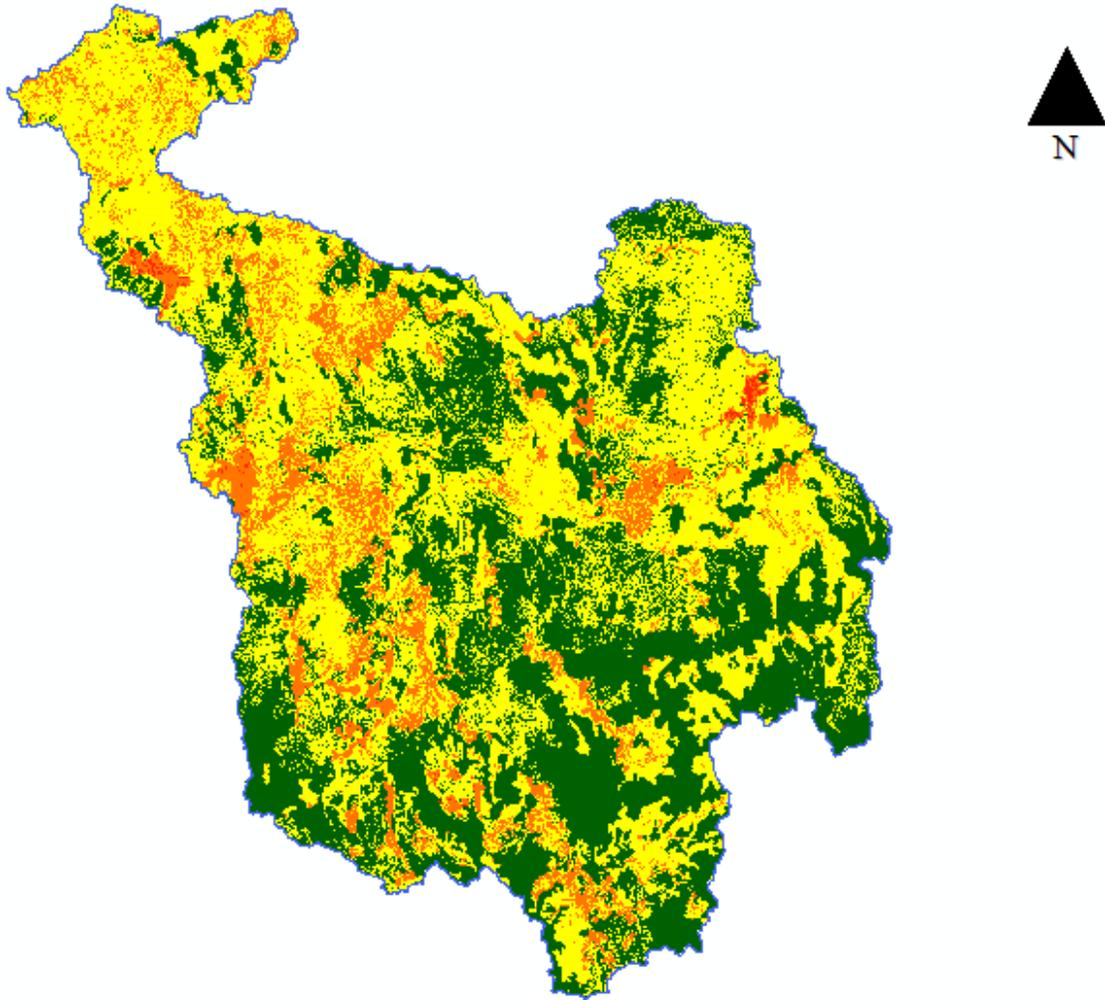


Figura 6.2 Mapa de vulnerabilidad física del suelo. (Elaboración propia, 2018)

El mapa de vulnerabilidad física del suelo y la clasificación propuesta por el autor se muestra en la Tabla 6.3. y Figura 6.2.

| Niveles de Vulnerabilidad | | |
|---------------------------|---|--|
| Bajo | 1 | |
| Medio | 2 | |
| Alto | 3 | |
| Muy alto | 4 | |

Tabla 6.3 Niveles de vulnerabilidad. (Elaboración propia, 2018)

Se seleccionó un pixel o celda aleatoriamente dentro de cada nivel de amenaza y se obtuvieron los factores que determinaron dicho valor de erosión hídrica y nivel de amenaza. En la Tabla 6.4 se muestran dichos factores.

| Niveles de vulnerabilidad | | | Variables | | |
|---------------------------|---|---|------------|------------------------|---------------|
| | | | Edafología | Uso de suelo | Pendiente [°] |
| Bajo | 1 |  | Leptosol | Pastizal inducido | 6.59 |
| Medio | 2 |  | Phaeozem | Selva baja caducifolia | 13.23 |
| Alto | 3 |  | Calcisol | Agricultura temporal | 10.57 |
| Muy alto | 4 |  | Vertisol | Agricultura temporal | 25.58 |

Tabla 6.4 Variables y niveles de vulnerabilidad física del suelo en la subcuenca RH18 – Río Mixteco. Propuestos por el autor

Nivel de vulnerabilidad bajo.

Para un nivel de vulnerabilidad bajo la edafología del suelo son Leptosoles, materiales poco erodables por lo tanto, la vulnerabilidad edafológica es baja. El uso de suelo es de tipo pastizal inducido lo que también hace que la vulnerabilidad sea baja. Además de que la pendiente es pequeña.

En conclusión, debido a que la edafología es difícil de alterar, tiene un uso de suelo de pastizales inducidos y la pendiente es pequeña, es muy poco probable alterar la estructura el suelo, por lo tanto, su vulnerabilidad física o estructural del suelo es baja.

Nivel de vulnerabilidad medio.

Para un nivel de vulnerabilidad medio la edafología del suelo está conformada por Phaeozems que son materiales poco erodables por lo tanto la vulnerabilidad edafológica es baja. El uso de suelo es de tipo selva baja caducifolia que consecuentemente hace que la vulnerabilidad sea alta, debido a que estos suelos son muy susceptibles a alterar su estructura. La pendiente es media.

En conclusión, debido a que la edafología es difícil de alterar, tiene un uso de suelo de selva baja caducifolia muy susceptible a alterar su estructura y la pendiente es media, es probable alterar la estructura del suelo, por lo tanto, su vulnerabilidad física o estructural del suelo es media.

Nivel de vulnerabilidad alto.

Para un nivel de vulnerabilidad alto la edafología del suelo está conformada por Calcisoles que son materiales muy erodables por lo tanto la vulnerabilidad edafológica es alta. El uso de suelo es de tipo agricultura temporal, que consecuentemente, hace que la vulnerabilidad sea muy alta, ya que estos suelos son los más susceptibles a alterar su estructura. También la pendiente es media.

En conclusión, debido a que la edafología y uso de suelo de agricultura temporal son muy susceptibles a alterar la estructura del suelo y considerando a la pendiente media, la respuesta es altamente probable a una afectación en la estructura del suelo, por lo tanto, su vulnerabilidad física o estructural del suelo es alta.

Nivel de vulnerabilidad muy alto.

Para un nivel de vulnerabilidad muy alto la edafología del suelo está conformada por Vertisoles que son materiales altamente erodables, por lo tanto, la vulnerabilidad edafológica es muy alta. El uso de suelo es de tipo agricultura temporal que consecuentemente hace que la vulnerabilidad sea muy alta, debido a que estos suelos son los más susceptibles a alterar su estructura. La pendiente es alta.

En conclusión, debido a que la edafología y uso de suelo de agricultura temporal son susceptibles a alterar la estructura con una pendiente alta provoca una alteración del suelo muy alta, por lo tanto, su vulnerabilidad física o estructural del suelo es muy alta.

6.3 Del Riesgo

Se realizará un análisis del mapa de riesgo de la subcuenca (Figura 6.3), se analizará cada una de las variables que se consideraron en la evaluación de la vulnerabilidad del suelo y la amenaza por erosión hídrica.

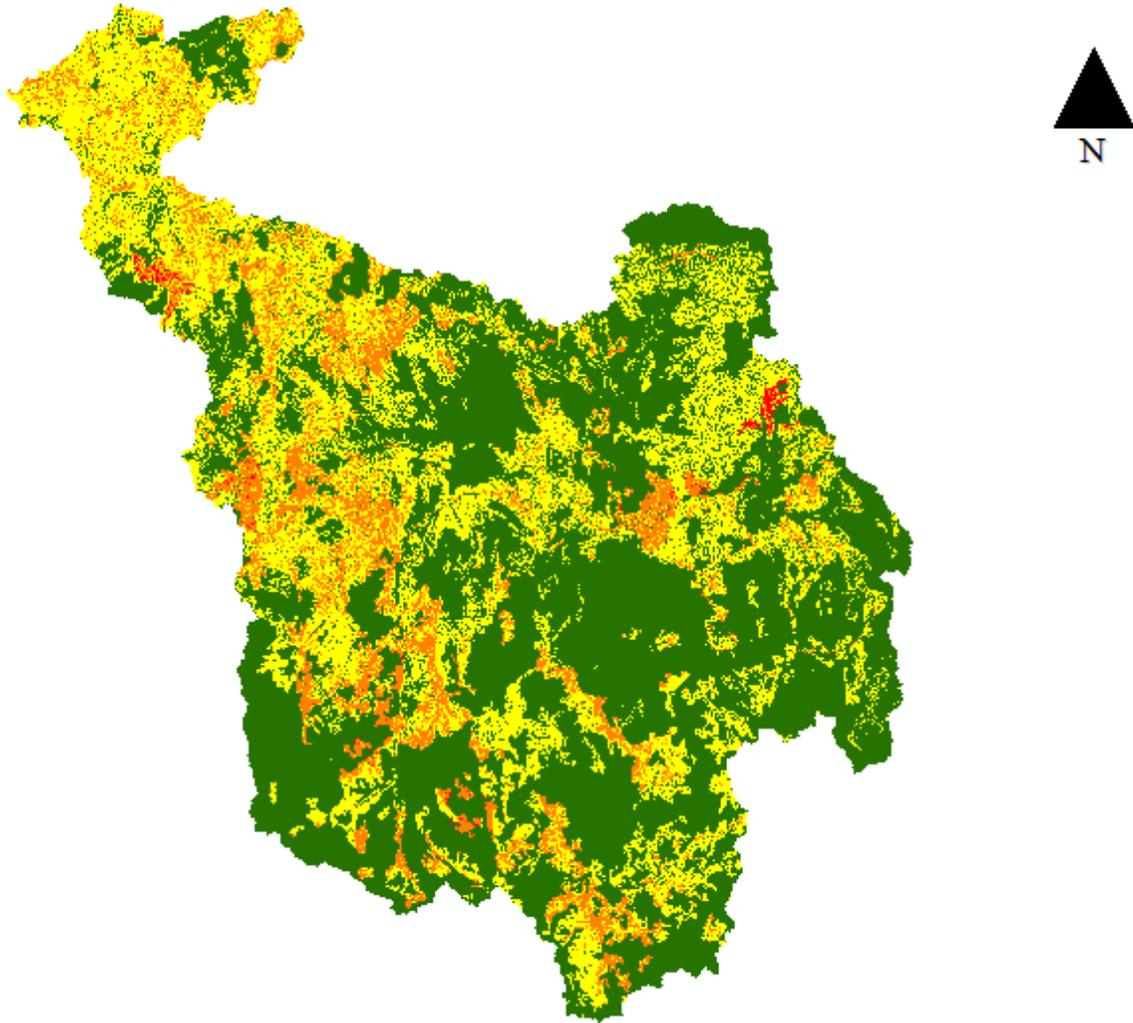


Figura 6.3 Mapa de Riesgo por erosión hídrica. (Elaboración propia, 2018)

El mapa de riesgo y la clasificación asignada por el autor, se muestra en la Tabla 6.5 y Figura 6.3..

| Niveles de Amenaza | | |
|--------------------|---|--|
| Bajo | 1 | |
| Medio | 2 | |
| Alto | 3 | |
| Muy alto | 4 | |

Tabla 6.5 Niveles de Riesgo por erosión hídrica en la subcuenca RH18 – Río Mixteco. con los niveles de amenaza propuestos por el autor

Se analizaron las amenazas y las vulnerabilidades. Se construyó una matriz de riesgo y se analizó cada nivel de riesgo. Dicha matriz de riesgos se muestra en la Figura 6.4.

| | | Zonas de Vulnerabilidad Física del suelo | | | | |
|--------------------------------------|---|---|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| | | Suelo poco susceptible | Suelo mediamente susceptible | Suelo altamente susceptible | Suelo muy altamente susceptible | |
| Zonas de Amenaza por erosión hídrica | 1 | Erosión hídrica baja | Riesgo bajo | Riesgo bajo | Riesgo medio | Riesgo medio |
| | 2 | Erosión hídrica media | Riesgo bajo | Riesgo medio | Riesgo medio | Riesgo alto |
| | 3 | Erosión hídrica alta | Riesgo medio | Riesgo medio | Riesgo alto | Riesgo muy alto |
| | 4 | Erosión hídrica muy alta | Riesgo medio | Riesgo alto | Riesgo muy alto | Riesgo muy alto |
| | | Niveles de Riesgo ante el fenómeno de erosión hídrica | | | | |

Figura 6.4 Matriz escenarios de riesgos propuesta por el autor

Riesgo bajo

Las zonas de riesgo bajo presentaran erosión hídrica menores a 50 [ton/ ha/ año] y suelos con baja vulnerabilidad o poco susceptibles con pendientes pequeñas menores a 12°. Su edafología se compone principalmente de Leptosoles y presenta usos de suelo como Zona urbana, bosque táscate, Bosque de mesófilo de montaña, Bosque de pino, Bosque de pino-encino y Pastizal inducido. Es muy probable que estas zonas presenten escasa o nula alteración en su estructura y cuenten con una vegetación densa, además de tener una pérdida de suelo muy escasa o nula (Erosión laminar).

Riesgo Medio

Las zonas de riesgo medio presentarán erosión hídrica entre 50 y 150 [ton/ ha/ año], suelos con considerable vulnerabilidad o mediamente susceptibles con pendientes regulares, entre 12° y 25°. Su edafología se compone principalmente de Phaeozems y presenta usos de suelo como Bosque encino. Es muy probable que estas zonas presenten una considerable alteración en su estructura y cuenten con una vegetación regular, además de tener una pérdida de suelo media (Erosión de canalillos).

Riesgo Alto

Las zonas de riesgo alto presentarán erosión hídrica entre 150 y 200 [ton/ ha/ año] y suelos con alta vulnerabilidad o altamente susceptibles con pendientes grandes, entre 25° y 50°. Su edafología se compone principalmente de Luvisoles, Regosoles, Fluvisoles y Cambisoles. Presenta usos de suelo como Agricultura de riego y Selva baja caducifolia. Es muy probable que estas zonas presenten una alteración alta en su estructura y cuenten con una vegetación escasa, además de tener una pérdida de suelo alta (Erosión de cárcavas), incluso puede haber degradación del suelo.

Riesgo muy Alto

Las zonas de riesgo muy alto presentarán erosión hídrica mayor a 200 [ton/ ha/ año] y suelos con muy alta vulnerabilidad o altamente susceptibles con pendientes muy pronunciadas, mayores a 50°. Su edafología se compone principalmente de Vertisoles y Calcisoles. Presenta usos de suelo como Agricultura temporal y Palmar inducido. Es muy probable que estas zonas presenten una alteración muy alta en su estructura y cuenten con una vegetación escasa o nula, además de tener una pérdida de suelo muy alta (Erosión de canales), incluso puede haber degradación del suelo o desertificación.

En la Tabla 6.4 se muestra un resumen del análisis general de las amenazas, vulnerabilidades y el riesgo.

| Zonas | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo |
|-----------------|--|---|---|
| Bajo | Zonas con erosión hídrica < 50 [Ton/ha/año] | Suelos poco susceptibles Pendiente: < 12 ° Edafología: Leptosoles Uso de suelo: Zona urbana, bosque táscate, Bosque de mesófilo de montaña, Bosque de pino, Bosque de pino-encino y Pastizal inducido. | Zonas con alteración escasa en su estructura de suelo, vegetación densa y con pérdida de suelo escasa o erosión laminar. |
| Medio | Zonas con erosión hídrica entre 50 y 150 [Ton/ha/año] | Suelos mediamente susceptibles Pendiente: de 12 ° a 25° Edafología: Phaeozems Uso de suelo: Bosque encino. | Zonas con alteración considerables en su estructura de suelo, vegetación considerable y con pérdida de suelo considerable o erosión de canalillos. |
| Alto | Zonas con erosión hídrica entre 150 y 200 [Ton/ha/año] | Suelos altamente susceptibles Pendiente: de 25 ° a 50° Edafología: Luvisoles, Regosoles, Fluvisoles y Cambisoles. Uso de suelo: Agricultura de riego y Selva baja caducifolia | Zonas con alteración alta en su estructura de suelo, vegetación escasa y con pérdida de suelo alta o erosión de cárcavas. Puede haber degradación del suelo. |
| Muy alto | Zonas con erosión hídrica > 200 [Ton/ha/año] | Suelos muy altamente susceptibles Pendiente: > 50° Edafología: Vertisoles y Calcisoles. Uso de suelo: Agricultura temporal y Palmar inducido. | Zonas con alteración muy alta en su estructura de suelo, vegetación escasa o nula, con pérdida de suelo muy alta o erosión en canales. Puede haber degradación del suelo o desertificación. |

Tabla 6.6 Análisis general de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo. (Elaboración propia, 2018)

Hay que señalar que la tabla anterior generalizó las amenazas, vulnerabilidades y el riesgo, porque se puede presentar un conjunto de combinaciones de amenaza y vulnerabilidad, por ejemplo, una vulnerabilidad baja y una amenaza muy alta. En este caso se realizará la construcción de escenarios con la finalidad de encontrar el mejor nivel de riesgo asociado a esa combinación, es decir, la propuesta realizada por el autor es una primera aproximación a la generación de un mapa de riesgos cercano a la realidad.

7 CONCLUSIONES Y/O RESULTADOS.

El objetivo general se alcanzó puesto que se describió el fenómeno de la erosión hídrica a detalle, desde que es iniciada por la precipitación, hasta algunas de las consecuencias que puede generar a largo plazo dicha erosión hídrica. También se determinó el riesgo existente en la subcuenca RH18Af – Río Mixteco. Aunado a esto se analizó la vulnerabilidad del suelo, tomando en cuenta sus características físicas. Principalmente la pendiente, la edafología y la cobertura vegetal o el uso de suelo.

Los objetivos secundarios también se lograron alcanzar puesto que fueron las bases que fueron construyendo esta tesis, de modo que cada concepto, herramienta y teoría aplicada en nuestro caso de estudio se definió y explicó.

Se definió la erosión de suelo de manera general, y se puntualizó en la pérdida de suelo detonada por la precipitación, también se definieron las consecuencias por dichos fenómenos de erosión hídrica. Consecuentemente se estudiaron los factores que influyen en dicha erosión y se presentó una metodología para poder calcularla, conocida como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

Para la ecuación de USLE se explicó cada una de las 6 variables que intervienen y como se asocian dentro de la ecuación con sus respectivas unidades. Aunado a esto se explicó la metodología para obtener cada variable y la interpretación de cada una de estas con sus correspondientes unidades.

La lluvia se presentó como la principal variable que detona la erosión hídrica y depende de la energía cinética de la precipitación y su intensidad máxima en 30 minutos obtenida a través del análisis de series de datos. Esta variable se agrava con la presencia del factor topográfico longitud-pendiente que depende de la zona de interés y se complementan con las variables edafología y uso de suelo, que intervienen en la ecuación de USLE a través de factores. La variable que corresponde a las prácticas de conservación de suelo aplica cuando estas existan.

Los objetivos secundarios referidos a los sistemas de información geográfica (SIG) también se alcanzaron porque se definió lo que es un SIG, así como los tipos de archivos con los que se pueden manipular y operar. A partir de esto se enfatizó en el álgebra de mapas para explicar cómo esta se opera de manera espacial y toma como unidad básica el pixel. También se hizo mención de los principales softwares que actualmente son los más comerciales.

Posterior esto los objetivos secundarios a alcanzar se enfocaron en definir los conceptos amenaza o peligro, y vulnerabilidad, se mencionaron algunos tipos de vulnerabilidad que forman la vulnerabilidad global.

La vulnerabilidad y el peligro se puntualizaron como principales componentes del análisis de riesgo y como es que dichos conceptos se asocian a los fenómenos naturales. También se indica como relacionar dichos conceptos a través a de mapas y se mencionan algunos ejemplos de aplicación

Los objetivos secundarios antes mencionados fueron la base para resolver el caso de estudio. En principio para conocer la cuenca, se calcularon las características fisiográficas mediante un SIG, para nuestro caso el software que se utilizó fue ArcGis.

La primera variable que se obtuvo fue el factor R debido a los grandes huecos de información en las series de datos en la zona se optó por la metodología propuesta por AGROASEMEX, que se obtuvo a partir de las isoyetas de precipitación de la república mexicana proporcionadas por INEGI. Mediante una interpolación de tipo Kriging se obtuvo un mapa de la subcuenca con los valores de (R) para cada pixel.

Los Modelos de Elevación (MDE) del estado de Puebla y Oaxaca fueron la base para obtener el mapa del factor Longitud – Pendiente (LS) en la cueca.

Las variables edafología, y el uso de suelo, se obtuvieron generando los mapas de los factores de erodabilidad de suelo (K) y de cobertura vegetal (C). Para el factor P se consideró la unidad debido a que no se encontraron datos de prácticas de conservación de suelo en la zona.

Una vez obtenidos los mapas (R, K, L-S, C y K) se realizó el producto mediante la herramienta SIG algebra de mapas, y se obtuvo el mapa de perdida de suelo potencial por erosión hídrica. En menor medida se presentaron zonas con un alto valor de erosión hídrica, es decir, el 20% del área de la cuenca presenta valores de erosión potencial mayores a 200 [ton/ha/año]. Que de acuerdo con distintos autores esta erosión ya se considera como muy alta o extrema. En segundo plano se presentó erosión media o moderada entere 50 y 200 [ton/ha/año], que abarco un 25% del área de nuestra subcuenca y en primer plano domino la erosión baja con un 55% del área de nuestra subcuenca. Una vez que conocíamos la erosión hídrica se clasificó en 4 rangos baja, media, alta y muy alta. Hasta este punto podemos concluir que tenemos una cuenca con un peligro potencial de pérdida de suelo de baja a media.

Para el análisis de la vulnerabilidad del suelo se consideraron características físicas del terreno como la pendiente, composición (edafología) y el uso de suelo. Mediante la herramienta matriz de vulnerabilidades se obtuvo el mapa de vulnerabilidad que se clasifico en 4 rangos baja, media, alta y muy alta, donde un 12% del área de la cuenca presento una vulnerabilidad alta, el 38% una vulnerabilidad baja y un 50% vulnerabilidad media. Podemos concluir que tenemos una cuenca con una vulnerabilidad de suelo de media a baja.

Mediante la herramienta algebra de mapas se realizó el producto del peligro y la vulnerabilidad para evaluar el riesgo mediante una matriz donde se analizaron y evaluaron distintos escenarios.

La subcuenca RH18Af –Río Mixteco, se presentó un 11% con riesgo con riesgo alto, es decir, zonas con alteración alta en su estructura de suelo, vegetación escasa como suelos de uso agrícola y con pérdida de suelo alta o erosión de cárcavas. Puede haber degradación del suelo. Un 33% presento un riesgo medio, es decir, zonas con alteración considerables en su estructura de suelo, vegetación media y con pérdida de suelo media o erosión de canalillos. Y finalmente domino con un 55% el riesgo bajo, es decir, zonas con alteración escasa en su estructura de suelo, vegetación densa y con pérdida de suelo escasa o erosión laminar.

En general bajo este análisis podemos decir que en la cuenca presenta un riesgo bajo a medio, por la amenaza ante el fenómeno de erosión hídrica. Teniendo en cuenta que solo se analizó la vulnerabilidad de estructura del suelo. Dicho análisis es una aproximación al riesgo real que puede existir en la zona, puesto que entre más variables consideremos en nuestro modelo, mayor certeza podemos tener en los resultados

Recomendaciones

Aunque para nuestro caso de estudio se presentó un riesgo bajo, a pesar de que existen zonas con erosión hídrica potencial alto. Es recomendable seguir de cerca y constantemente este fenómeno. Y para esto se necesita tener bases de datos de precipitación confiables y con al menos 50 años de información sin huecos. Puesto que la precipitación es el factor detonante de la erosión hídrica, además de mantener actualizada la información de edafología, usos de suelo y pendiente topográfica.

Esto con la intención de poder alimentar de manera correcta los modelos existentes y tener una representación aún más cercana a la realidad.

Además, que se cuente con una base de datos más detallada de la infraestructura con la que cuentan nuestro país, como los embalses pequeños que existen y no solo las grandes presas, puesto que representan un mayor riesgo a los pequeños embalses en el tema de generación de azolves. En el caso de la infraestructura carretera contar con todos los caminos rurales y no solo las carreteras principales, puesto que son más vulnerables los caminos si pavimentar, además de poder contar con una base de datos donde presente todos los cruces entre un cauce y una vía con su correspondiente obra hidráulica, puesto que la socavación es un fenómeno que se presenta frecuentemente en puentes. Dicho grado de resolución de información, cambiaría nuestro mapa de riesgo puesto que se realizaría un análisis más minucioso de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.

Además, para complementar esto, por que esperar a que se presenten las consecuencias para actuar. Se deben empezar a realizar en las zonas más vulnerables actividades para disminuir la erosión hídrica. Como las prácticas de conservación de suelo, practicar algunas alternativas para el campo como la hidroponía, pensar en estructuras como presas de gaviones que evitan la pérdida de suelos en zonas y una de las acciones más efectivas es la reforestación. Ya que la presencia de vegetación en el suelo protege la integridad y la estructura del suelo. Además, que es una manera de prevenir los efectos del cambio climático.

8 BIBLIOGRAFÍA

- A.N. Strahler. (1964). *Section 4.II Geology. Part II Quatitative geomorphology of Drainage Basins and.* in Handbook of Applied Hydrology: VT. Chow, Mc. Graw Hill, New.
- Agroasemex, S.A. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. En M. A. Montes-León, *Mapa Nacional de Erosión Potencial* (pág. 13).
- ALONSO CLIMENT, I. (2002). *Tercer mundo, desarrollo, desastres y tecnología. Una mirada desde la Geografía.* En Serie Geográfica N°10,.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* . México: Limusa.
- Aranda, D. C. (´1998). *Procesos del ciclo hidrológico* . San Luis Potosí: Universitaria Potosina.
- ArcGIS for Desktop. (04 de 27 de 2017). *Arc Map*. Obtenido de ¿Qué son los datos ráster?: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- ArcGIS for Desktop. (27 de 04 de 2017). *Qué es ArcMap*. Obtenido de ArcGIS Resources: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm>
- Arronte, G. R. (31 de Agosto de 2017). *Agua.org.mx*. Obtenido de <https://agua.org.mx/quienes-somos/>
- Barrios, A. (1995). *Erosión y Producción de Sedimentos en Cuencas Hidrográficas*. Mérida, Venezuela: Fac. De Ciencias Forestales - Universidad de los Andes .
- BECERRA, M. (1997). *Erosión de suelos*. México, D.F.: Universidad Autónoma de Chapingo.
- C.A. Jones, R. G. (24 de 04 de 2017). *Predicción de la erosión hídrica y eólica del suelo*. Obtenido de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S03.htm>
- CENAPRED. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. México, D.F.: CENAPRED.
- CENAPRED. (2016). Causas que propician deslizamientos y medidas de prevención. En CENAPRED, *Causas que propician deslizamientos y medidas de prevención*.
- CONAGUA. (16 de Abril de 2010). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de ACUERDO POR EL QUE SE DAN A CONOCER LOS ESTUDIOS TECNICOS DE AGUAS NACIONALES: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5175730
- CONAGUA. (2015). *Atlas del agua en México 2015*. México.
- Confederación de Empresarios de Andalucía. (25 de 04 de 2017). *Sistemas de Información Geográfica, tipos y aplicaciones empresariales*. Obtenido de <http://sig.cea.es/SIG>
- D.O.F. (2002). *Diario Oficial de la Federación*. Mexico.

- FOSCHIATTI, A. M. (2005). *ulnerabilidad demográfica y social. Consideraciones conceptuales*. Investigaciones y Ensayos Geográficos. Revista de Geografía. Año IV, Nº4, Universidad Nacional de Formosa, EDUNaF.
- Geoinnova Formación. (27 de 04 de 2017). *SIG Y medio ambiente*. Obtenido de Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG): https://geoinnova.org/cursos/componentes-sistema-informacion-geografica-sig/?gclid=EAlaIqobChMII9LLiI7X2gIVxrrACh0I2ACMEAYASAAEgKF8fD_BwE
- Instituto Mexicano del Transporte. (01 de 03 de 2016). *Sistemas de Información Geoespacial*. Obtenido de Atlas cibernético del transporte: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/sistemas-de-informacion-geoespacial>
- ISRIC. (2015). *INTAGRI*. Obtenido de Artículos: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/clasificacion-del-suelo-WRB-y-soil-taxonomy>
- LLamas, J. (1993). *Hidrología general: principios y aplicaciones*. Universidad del País Vasco.
- Merino, J. P. (2013). *Definicion.de*. Obtenido de <https://definicion.de/vulnerabilidad/>
- Mongil, J. (1 de septiembre de 2015). *Hidrología y conservación*. Obtenido de <http://ghidrologia.blogspot.mx/2015/09/erosion-por-carcavas-en-gea-de.html>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Orellana, R. (31 de 08 de 2017). *Manejo integrado de cuencas*. Obtenido de <http://michidro.blogspot.mx/2015/02/bienvenidos.html>
- Organización de los Estados Americanos . (27 de 04 de 2017). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Obtenido de Capítulo 5. Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/ch10.htm>
- Patricia Ávila García, J. L. (2018). *ESTUDIO SOBRE PROTECCIÓN DE RÍOS, LAGOS Y ACUÍFEROS DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS DERECHOS HUMANOS*. Mexico.
- Pucha-Cofrep, F. (2017). *Fundamentos de SIG*.
- QGIS. (2017 de 04 de 2017). *Un Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto*. Obtenido de <https://www.qgis.org/es/site/>
- Sánchez, J. G. (s.f.). Pérdida de suelos en cuencas. En C. N. Agua, *Manual de Ingeniería de Ríos*. Mexico.
- Sandoval, L. (16 de Enero de 2016). *Cuadernillo de apuntes de Calculo Integral*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/abrahamaj752/calculo-de-centroides>
- Sediments, D. (18 de Marzo de 2018). *System Sensitive Solitions*. Obtenido de Las dos caras de la sedimentación: <http://www.db-sediments.com/index.php/las-dos-caras-de-la-sedimentacion.html>

- SEMARNAT. (2011). *Inforteca*. Obtenido de Particionado oficial de México en las diferentes zonas UTM: <http://inforteca.semarnat.gob.mx>
- SIATL. (31 de Agosto de 2017). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- tiposdeerosiones5toc. (06 de 03 de 2016). *blogdiario.com*. Obtenido de [blogdiario.com: http://tiposdeerosiones5toc.blogspot.es/tags/hidrica/](http://tiposdeerosiones5toc.blogspot.es/tags/hidrica/)
- USDA. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses, Agriculture Handbook Number 537*. USA.
- Veiga, L. d. (s.f.). *FAO*. Obtenido de Organización para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm>
- Verde Zona. (27 de 05 de 2014). *Erosión II; consecuencias y soluciones*. Obtenido de <http://verdezona.blogspot.mx/2014/05/erosion-ii-consecuencias-y-soluciones.html>
- Wilches-Chaux, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis*. Servicio Nacional de Aprendizaje, Popayán.

9 ANEXOS.

Anexo A

Códigos recomendados para los Grupos de Suelos de Referencia, calificadores y especificadores.

| Grupos de Suelos de Referencia | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|------------------|-----|----------------|-----|--------------|-----|
| Acrisol | AC | Chernozem | CH | Kastanozem | KS | Podzol | PZ |
| Albeluvisol | AB | Crisol | CR | Leptosol | LP | Regosol | RG |
| Alisol | AL | Durisol | DU | Lixisol | LX | Solonchak | SC |
| Andosol | AN | Ferralsol | FR | Luvisol | LV | Solonetz | SN |
| Antrosol | AT | Fluvisol | FL | Nitisol | NT | Stagnosol | ST |
| Arenosol | AR | Gleysol | GL | Phaeozem | PH | Tecnosol | TC |
| Calcisol | CL | Gipsisol | GY | Planosol | PL | Umbrisol | UM |
| Cambisol | CM | Histosol | HS | Plintisol | PT | Vertisol | VR |
| Calificadores | | | | | | | |
| Abruptico | ap | Ferrálico | fl | Irrágrico | ir | Reductácuico | ra |
| Acérico | ae | Férrico | fr | Lamélico | ll | Redúctico | rd |
| Ácrico | ac | Fíbrico | fi | Láxico | la | Régico | rg |
| Álbico | ab | Flóico | ft | Léptico | le | Réndzico | rz |
| Alcálico | ax | Flúvico | fv | Lígnico | lg | Rheico | rh |
| Álico | al | Fólico | fo | Limnico | lm | Ródico | ro |
| Aluándico | aa | Fractipétrico | fp | Línico | lc | Rúbico | ru |
| Alúmico | au | Fractiplíntico | fa | Lítico | li | Rúptico | rp |
| Ándico | an | Frágico | fg | Lixico | lx | Rústico | rs |
| Antrácuico | aq | Fúlvido | fu | Lúvico | lv | Sálico | sz |
| Ántrico | am | Gárbico | ga | Magnésico | mg | Sáprico | sa |
| Arénico | ar | Gélico | ge | Manganiférrico | mf | Silándico | sn |
| Árico | ai | Gelistágnico | gt | Mázico | mz | Límico | sl |
| Árido | ad | Gérico | gr | Melánico | ml | Esquelético | sk |
| Ázrico | az | Gíbico | gi | Mesotrófico | ms | Sódico | so |
| Brúnico | br | Gláico | gc | Mólico | mo | Solódico | sc |
| Calcárico | ca | Gleyico | gl | Moliglóxico | mi | Sómbrico | sm |
| Cálcico | cc | Glosálbico | gb | Nátrico | na | Spódico | sd |
| Cámbico | cm | Glósico | gs | Nítrico | ni | Spóico | sp |
| Cárbico | cb | Gréyico | gz | Nóvico | nv | Stágnico | st |
| Carbonático | cn | Grúmico | gm | Nudiárgico | na | Sulfático | su |
| Clorídico | cl | Gipsico | gy | Nudilítico | nt | Takyrico | ty |
| Crómico | cr | Gipsárico | gp | Ómbrico | om | Técnico | te |
| Arcílico | ce | Háplico | ha | Ornítico | oc | Tétrico | tf |
| Colúvico | co | Hémico | hm | Orsteinico | os | Tétrico | tr |
| Críco | cy | Hístico | hi | Oxiácuico | oa | Thaptándico | ba |
| Cutánico | ct | Hórtico | ht | Páquico | ph | Taptovitríco | bv |
| Dénsico | dn | Húmico | hu | Pélico | pe | Tiónico | ti |
| Drénico | dr | Hidrágico | hg | Pétrico | pt | Tixotrópico | tp |
| Dúrico | du | Hídrico | hy | Petrocálcico | pc | Tidálico | td |
| Dístrico | dy | Hidrofóbico | hf | Petrodúrico | pd | Tóxico | tx |
| Ekránico | ek | Hiperálbico | hb | Petrogleyico | py | Transpórtico | tn |
| Endodúrico | nd | Hiperálico | hl | Petrogipsico | pg | Túrbico | tu |
| Endodístrico | ny | Hipercálcico | hc | Petroplíntico | pp | Úmbrico | um |
| Endoéutrico | ne | Hiperdístrico | hd | Petrosálico | ps | Umbriglósico | ug |
| Endoflúvico | nf | Hiperéutrico | he | Pisocálcico | cp | Úrbico | ub |
| Endogleyico | ng | Hipergipsico | hp | Pisoplíntico | px | Vérmico | vm |
| Endoléptico | nl | Hiperórcico | ho | Pláico | pi | Vértico | vr |
| Endosálico | ns | Hipersálico | hs | Plágico | pa | Vético | vt |
| Éntico | et | Hiperesquelético | hk | Plíntico | pl | Vítrico | vi |
| Epidístrico | ed | Hipocálcico | wc | Pésico | po | Vorónico | vo |
| Epieutrico | ee | Hipogipsico | wg | Profúndico | pf | Xántico | xa |
| Epiléptico | el | Hipolúvico | wl | Prótico | pr | Yérmico | ye |
| Episálico | ea | Hiposálico | ws | Púfico | pu | | |
| Escálico | ec | Hiposódico | wn | | | | |
| Éutrico | eu | | | | | | |
| Eutrosílico | es | | | | | | |
| Especificadores | | | | | | | |
| Bati | ..d | Epi | ..p | Orto | ..o | Proto | ..t |
| Cumuli | ..c | Hiper | ..h | Para | ..r | Tapto | ..b |
| Endo | ..n | Hipo | ..w | | | | |

Anexo B

Factor K, de acuerdo con el tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la WRB.

| Orden | Textura | | |
|-------|---------|-------|-------|
| | G | M | F |
| AC | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| AL | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| AN | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| AR | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| CH | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| CL | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| CM | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| DU | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| FL | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| FR | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| GL | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| GY | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| HS | 0.053 | 0.02 | 0.007 |
| KS | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| LP | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| LV | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| LX | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| NT | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| PH | 0.013 | 0.02 | 0.007 |
| PL | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| PT | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| RG | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| SC | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| SN | 0.053 | 0.079 | 0.026 |
| UM | 0.026 | 0.04 | 0.013 |
| VR | 0.053 | 0.079 | 0.026 |

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

Anexo C

Factor C para vegetación y/o uso de suelo.

| Vegetación y/o uso de suelo | C |
|-------------------------------------|------|
| Bosque de ayarín | 0.01 |
| Bosque de cedro | 0.01 |
| Bosque de encino | 0.10 |
| Bosque de encino-pino | 0.01 |
| Bosque de galería | 0.10 |
| Bosque de oyamel | 0.01 |
| Bosque de pino | 0.01 |
| Bosque de pino-encino | 0.01 |
| Bosque de tascate | 0.01 |
| Bosque de mesófilo de montaña | 0.01 |
| Chaparral | 0.65 |
| Manglar | 0.10 |
| Matorral crasicale | 0.65 |
| Matorral de coníferas | 0.20 |
| Matorral desértico microfilo | 0.25 |
| Matorral desértico roetofilo | 0.25 |
| Matorral espinoso tamaulipeco | 0.45 |
| Matorral rosetofilo costero | 0.25 |
| Matorral sarcocale | 0.25 |
| Matorral sarco-crasicale | 0.25 |
| Matorral sarco-crasicale de neblina | 0.25 |
| Matorral submontano | 0.35 |
| Matorral subtropical | 0.12 |
| Mezquital | 0.65 |
| Palmar inducido | 0.75 |
| Palmar natural | 0.75 |

| Vegetación y/o uso de suelo | C |
|-------------------------------------|-------|
| Pastizal gipsofilo | 0.25 |
| Pastizal halofilo | 0.25 |
| Pastizal inducido | 0.02 |
| Pastizal natural | 0.07 |
| Popal | 0.85 |
| Pradera de alta montaña | 0.05 |
| Sabana | 0.54 |
| Sabanoide | 0.54 |
| Selva alta perennifolia | 0.45 |
| Selva alta subperennifolia | 0.45 |
| Selva baja caducifolia | 0.50 |
| Selva baja espinosa caducifolia | 0.50 |
| Selva baja espinosa subperennifolia | 0.50 |
| Selva mediana caducifolia | 0.45 |
| Selva mediana perennifolia | 0.45 |
| Selva mediana subcaducifolia | 0.45 |
| Tular | 0.10 |
| Vegetación de desiertos arenosos | 0.85 |
| Vegetación de dunas costeras | 0.85 |
| Vegetación de galería | 0.85 |
| Vegetación halófila | 0.85 |
| Zona urbana | 0.005 |
| Cuerpos de agua | 1.0 |
| Agricultura en riego | 0.55 |
| Agricultura de temporal | 0.75 |
| Agricultura de humedad | 0.25 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO. (SMAPA, 2017) | 9 |
| FIGURA 2.2 TIPOS DE CUENCAS (APARICIO MIJARES, 1992) | 11 |
| FIGURA 2.3 REGIÓN HIDROLÓGICA NUMERO 18 BALSAS. (D.O.F, 2002)..... | 11 |
| FIGURA 2.4 SUBCUENCA R. MOJARRAS. (SIATL, 2017) | 12 |
| FIGURA 2.5 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE UNA CUENCA. (ORELLANA, 2017) | 13 |
| FIGURA 2.6 CARACTERÍSTICAS DE UNA CUENCA. (APARICIO MIJARES, 1992) | 15 |
| FIGURA 2.7 CUENCA HIDROLÓGICA DE ORDEN 4. (APARICIO MIJARES, 1992) | 16 |
| FIGURA 2.8 MÉTODO DE LA PENDIENTE GEOMÉTRICA. (APARICIO MIJARES, 1992) | 17 |
| FIGURA 2.9 MÉTODO DE LA PENDIENTE COMPENSADA. (APARICIO MIJARES, 1992) | 17 |
| FIGURA 2.10 MÉTODO DE TAYLOR SCHWARZ. (APARICIO MIJARES, 1992)..... | 18 |
| FIGURA 2.11 CORRIENTE PERENNE. (APARICIO MIJARES, 1992)..... | 20 |
| FIGURA 2.12 CORRIENTE INTERMITENTE. (APARICIO MIJARES, 1992) | 20 |
| FIGURA 2.13 CORRIENTE EFÍMERA. (APARICIO MIJARES, 1992) | 20 |
| FIGURA 2.14 CLASIFICACIÓN DE CORRIENTES POR SU POSICIÓN O EDAD GEOLÓGICA. (APARICIO MIJARES, 1992)..... | 21 |
| FIGURA 3.1 IDEALIZACIÓN DEL PROCESO DE EROSIÓN EN UNA CUENCA. (SÁNCHEZ)..... | 23 |
| FIGURA 3.2 CALCIFICACIÓN DE LA EROSIÓN DE PARTÍCULAS DE SUELO. (ELABORACIÓN PROPIA)..... | 24 |
| FIGURA 3.3 EROSIÓN POR CÁRCAVAS EN GEA DE ALBARRACÍN. (MONGIL, 2015)..... | 25 |
| FIGURA 3.4 PROCESO DE EROSIÓN. (TIPOSDEROSIONES5TOC, 2016) | 26 |
| FIGURA 3.5 PÉRDIDA DE FERTILIDAD EN SUELOS. (VERDE ZONA, 2014)..... | 28 |
| FIGURA 3.6 FENÓMENOS DE SEDIMENTACIÓN - EROSIÓN EN UN EMBALSE. (SEDIMENTS, 2018)..... | 29 |
| FIGURA 3.7 DESLIZAMIENTO DE UNA LADERA. (CENAPRED, 2016) | 30 |
| FIGURA 3.8 CLASIFICACIÓN DE SEGÚN LA FORMA EN QUE SE TRANSPORTAN LOS MATERIALES. (CENAPRED, 2016) | 31 |
| FIGURA 3.9 CAÍDO CARRETERA CHILAPA-HUEYCANTENANGO, GUERRERO. (CENAPRED, 2016) | 31 |
| FIGURA 3.10 CARRETERA OBSTRUIDA A CAUSA DE UN FLUJO DE LODOS. (LAURA MOLINA, 2017)..... | 32 |
| FIGURA 3.11 PARTES QUE COMPOENEN UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL. (CENAPRED, 2016)..... | 33 |
| FIGURA 3.12 DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL. (PATRICIA PRIETO, 2016)..... | 34 |
| FIGURA 3.13 DESLIZAMIENTO QUE BLOQUEO EL CAUCE DEL RIO GRIJALVA. (2007)..... | 34 |
| FIGURA 3.14 ECUACIONES REGIONALIZADAS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA (BECERRA, 1997). | 40 |
| FIGURA 3.15 REGIONALIZACIÓN NACIONAL DE FACTOR R (BECERRA, 1997). | 40 |
| FIGURA 3.16 NOMOGRAMA DE WISCHMEIER Y SMITH PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K (RENARD, 1997)..... | 42 |
| FIGURA 3.17 FACTOR K, DE ACUERDO CON EL TIPO DE SUELO DE LA CLASIFICACIÓN DESARROLLADA POR LA WRB.(BECERRA, 1999) | 43 |
| FIGURA 3.18 VALORES QUE TOMAN M EN FUNCIÓN AL GRADO DE PENDIENTE. (WISCHMEIER Y SMITH, 1978)..... | 44 |
| FIGURA 3.19 FORMAS TÍPICAS DE DETERMINAR EL FACTOR LS. (RENARD, 1997)..... | 45 |
| FIGURA 3.20 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SIG. (OLAYA, 2014)..... | 50 |
| FIGURA 3.21 SISTEMA RÁSTER. (ARCGIS FOR DESKTOP, 2017)..... | 54 |
| FIGURA 3.22 RÁSTER EN FORMA DE MAPAS BASE. (ARCGIS FOR DESKTOP, 2017)..... | 55 |
| FIGURA 3.23 RÁSTER EN FORMA DE MAPA DE SUPERFICIE QUE REPRESENTA ELEVACIONES EN UN ÁREA. (ARCGIS FOR DESKTOP, 2017) | 55 |
| FIGURA 3.24 RÁSTER EN FORMA DE MAPA TEMÁTICO QUE CATEGORIZA LA COBERTURA DEL SUELO. (ARCGIS FOR DESKTOP, 2017) | 56 |
| FIGURA 3.25 MODELO RÁSTER Y MODELO VECTORIAL. (CONFEDERACIÓN DE EMPRESARIOS DE ANDALUCÍA, 2017)..... | 56 |
| FIGURA 3.26 LOGO QGIS (SOFTWARE LIBRE). (QGIS, 2017)..... | 58 |
| FIGURA 3.27 LOGO ARCGIS DESARROLLADO POR ESRI. (ARCGIS FOR DESKTOP, 2017)..... | 58 |
| FIGURA 3.28 EJEMPLO DE ALGEBRA DE MAPAS. (OLAYA, 2014) | 60 |
| FIGURA 3.29 EN ROJO, CELDAS DE PARTIDA ANALIZADAS. EN VERDE, CELDA QUE RECOGE EL RESULTADO. (OLAYA, 2014) ... | 61 |
| FIGURA 3.30 EJEMPLOS SENCILLOS DE ANÁLISIS LOCAL ESTADÍSTICO CON MÚLTIPLES CAPAS. (OLAYA, 2014)..... | 62 |
| FIGURA 3.31 EN ROJO, CELDAS DE PARTIDA ANALIZADAS. EN VERDE, CELDA QUE RECOGE EL RESULTADO. (OLAYA, 2014) ... | 63 |
| FIGURA 3.32 NOTACIÓN PARA UNA VENTANA DE ANÁLISIS EN FUNCIONES FOCALES. (OLAYA, 2014)..... | 63 |
| FIGURA 3.33 ALGUNOS DE LOS TIPOS DE VENTANA DE ANÁLISIS MÁS COMUNES EN DISTINTOS TAMAÑOS. A) CUADRADA, B) CIRCULAR. (OLAYA, 2014)..... | 64 |
| FIGURA 3.34 EN ROJO, CELDAS DE PARTIDA ANALIZADAS. EN VERDE, CELDA QUE RECOGE EL RESULTADO. (OLAYA, 2014) ... | 65 |
| FIGURA 3.35 FORMAS DE DEFINIR LAS CLASES PARA EL ANÁLISIS ZONAL. A) ASIGNACIÓN POR VALOR CON CONTIGÜIDAD, B) ASIGNACIÓN ÚNICAMENTE POR VALOR. (OLAYA, 2014)..... | 65 |
| FIGURA 3.36 LAS FUNCIONES DE ANÁLISIS GLOBAL. (OLAYA, 2014) | 66 |
| FIGURA 4.1 CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GLOBAL. (WILCHES-CHAUX, 1989)..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.2 ESQUEMA DE RIESGO. (CENAPRED, 2004)..... | 73 |
| FIGURA 4.3 ACELERACIONES MÁXIMAS DEL TERRENO (EN CM/S ²) PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (GUTIÉRREZ C., CENAPRED, 2004)..... | 77 |
| FIGURA 4.4 FUNCIÓN DE DAÑO FÍSICO PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA ADECUADAMENTE CONFINADA DE TRES O CUATRO NIVELES Y LOCALIZADAS EN LA ZONA SÍSMICA D DEL MAPA DE REGIONALIZACIÓN SÍSMICA DE CFE. (CENAPRED, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, 2003)..... | 78 |
| FIGURA 4.5 MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS (PÉRDIDAS CALCULADAS). (CENAPRED, 2004) | 79 |
| FIGURA 4.6 ZONIFICACIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO MÁXIMAS CFE. (CENAPRED, 2004)..... | 80 |
| FIGURA 4.7 MAPA DE RIESGO DE LA CIUDAD DE COLIMA, GENERADO MEDIANTE UN SISTEMA QUE PERMITE REALIZAR DIFERENTES ANÁLISIS SOBRE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO (OBJETOS DE RIESGO). (CENAPRED, 2004)..... | 81 |
| FIGURA 5.1 REGIONES HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 84 |
| FIGURA 5.2 REGIÓN HIDROLÓGICA 18 BALSAS (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 86 |
| FIGURA 5.3 REGIÓN HIDROLÓGICA 18 BALSAS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 87 |
| FIGURA 5.4 LOCALIZACIÓN DE LA RH18 BALSAS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 88 |
| FIGURA 5.5 CUENCAS HIDROLÓGICAS DE LA RH18. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 89 |
| FIGURA 5.6 SUBCUENCAS HIDROLÓGICAS DE LA RH18A. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 90 |
| FIGURA 5.7 ÁREA ESTATAL DE LA CUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 90 |
| FIGURA 5.8 DIVISIÓN MUNICIPAL DE LA CUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 91 |
| FIGURA 5.9 DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN. (SIATL, 2017)..... | 93 |
| FIGURA 5.10 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA LLUVIA. (CONAGUA, 2010) | 94 |
| FIGURA 5.11 CURVAS DE IGUAL PRECIPITACIÓN. (SIATL, 2017)..... | 94 |
| FIGURA 5.12 ZONAS UTM DE MÉXICO. (SEMARNAT, 2011) | 95 |
| FIGURA 5.13 LOCALIZACIÓN DEL CENTROIDE DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 96 |
| FIGURA 5.14 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 97 |
| FIGURA 5.15 RANGOS DE PENDIENTE DE LA CUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 98 |
| FIGURA 5.16 RANGOS DE PENDIENTE RECLASIFICADOS DE LA CUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 98 |
| FIGURA 5.17 CLASE SE ENCUENTRA LA PENDIENTE. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 99 |
| FIGURA 5.18 RED HÍDRICA DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 99 |
| FIGURA 5.19 CORRECCIÓN DEL RASTER DEL MDE. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 101 |
| FIGURA 5.20 DIRECCIÓN DEL FLUJO DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 102 |
| FIGURA 5.21 NÚMERO DE CELDAS QUE ACUMULAN EL FLUJO EN LA CUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 102 |
| FIGURA 5.22 NUMERO DE ORDEN DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 103 |
| FIGURA 5.23 MODELO DE ELEVACIÓN RECLASIFICADO EN 20 INTERVALOS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 104 |
| FIGURA 5.24 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 105 |
| FIGURA 5.25 CURVAS HIPSOMÉTRICAS CARACTERÍSTICAS DEL CICLO DE EROSIÓN. (LLAMAS, 1993)..... | 105 |
| FIGURA 5.26 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 106 |
| FIGURA 5.27 CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 107 |
| FIGURA 5.28 PERFIL DE ELEVACIONES DEL CAUCE PRINCIPAL. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 107 |
| FIGURA 5.29 DELIMITACIÓN DE LA ZONA ESTUDIO DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 110 |
| FIGURA 5.30 EMAS Y ESIMES DISPONIBLES EN LA CUECA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 112 |
| FIGURA 5.31 CRONOGRAMA INFORMACIÓN TOTAL DE EMAS Y ESIAMES. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 113 |
| FIGURA 5.32 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 114 |
| FIGURA 5.33 CRONOGRAMA 1. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 115 |
| FIGURA 5.34 CRONOGRAMA 2. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 115 |
| FIGURA 5.35 ECUACIONES REGIONALIZADAS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA (BECERRA, 1997). | 116 |
| FIGURA 5.36 REGIONALIZACIÓN NACIONAL DE FACTOR R (BECERRA, 1997). | 117 |
| FIGURA 5.37 REGIONALIZACIONES DEL FACTOR R EN NUESTRA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 118 |
| FIGURA 5.38 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (PMA) DE NUESTRA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 119 |
| FIGURA 5.39 VALOR DE R CORRESPONDIENTE A CADA ÁREA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 120 |
| FIGURA 5.40 VALOR DE R CORRESPONDIENTE A AL CENTROIDE DE CADA ÁREA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 121 |
| FIGURA 5.41 FACTOR R PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 122 |
| FIGURA 5.42 CLASES DEL VALOR DE R DE LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 122 |
| FIGURA 5.43 PRINCIPALES GRUPOS DE SUELOS DE MÉXICO. (ISRIC, 2015) | 124 |
| FIGURA 5.44 EDAFOLOGÍA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 125 |
| FIGURA 5.45 FACTOR K PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 126 |
| FIGURA 5.46 CLASES DEL VALOR DE K DE LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 127 |
| FIGURA 5.47 FACTOR L PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 128 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.48 FACTOR S PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 129 |
| FIGURA 5.49 FACTOR LS PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 130 |
| FIGURA 5.50 CLASES DEL VALOR DE LS DE LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 130 |
| FIGURA 5.51 USO DE SUELO DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 131 |
| FIGURA 5.52 FACTOR C PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 133 |
| FIGURA 5.53 CLASES DEL VALOR DE C DE LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). | 133 |
| FIGURA 5.54 FACTOR P PARA LA SUBCUENCA RH18AF – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 134 |
| FIGURA 5.55 EROSIÓN HÍDRICA DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 135 |
| FIGURA 5.56 CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LA SUBCUENCA RH18AF. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 136 |
| FIGURA 5.57 MAPA DE VULNERABILIDAD FÍSICA DEL SUELO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 141 |
| FIGURA 5.58 MAPA DE AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 143 |
| FIGURA 5.59 MATRIZ DE ESCENARIOS DE RIESGO ANTE EL FENÓMENO DE EROSIÓN HÍDRICA EROSIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 144 |
| FIGURA 5.60 MAPA DE RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 145 |
| FIGURA 6.1 MAPA DE AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 147 |
| FIGURA 6.2 MAPA DE VULNERABILIDAD FÍSICA DEL SUELO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 150 |
| FIGURA 6.3 MAPA DE RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 153 |
| FIGURA 6.4 MATRIZ ESCENARIOS DE RIESGOS. . (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 154 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| TABLA 3.1 VALORES DE PARA BOSQUES NO ALTERADOS. (WISCHMEIER Y SMITH, 1978) | 46 |
| TABLA 3.2 FACTOR C PARA VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO. (AGROASEMEX, S.A., 2011)..... | 47 |
| TABLA 3.3 VALORES DEL FACTOR P. (USDA, 1978)..... | 48 |
| TABLA 4.1 CLASIFICACIÓN DE CONSTRUCCIONES DE ACUERDO A SU SISTEMA ESTRUCTURAL. (CENAPRED, I. DE I., 2003) .. | 78 |
| TABLA 5.1 REGIONES HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS. (CONAGUA, 2015)..... | 85 |
| TABLA 5.2 EXTENSIÓN TERRITORIAL DE LAS 37 REGIONES HIDROLÓGICAS. (CONAGUA, 2015)..... | 87 |
| TABLA 5.3 CUENCAS HIDROLÓGICAS DE LA RH18. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 88 |
| TABLA 5.4 SUBCUENCAS HIDROLÓGICAS DE LA RH18A. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 89 |
| TABLA 5.5 MUNICIPIOS DEL ESTADO DE PUEBLA (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 91 |
| TABLA 5.6 MUNICIPIOS DEL ESTADO DE OAXACA (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 92 |
| TABLA 5.7 DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS DE LA VEGETACIÓN Y USO DE SUELO. (SIATL, 2017)..... | 93 |
| TABLA 5.8 ÁREA Y PERÍMETRO DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 95 |
| TABLA 5.9 CENTROIDE DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 96 |
| TABLA 5.10 PENDIENTE MEDIA DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 99 |
| TABLA 5.11 RED DE DRENAJE DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 103 |
| TABLA 5.12 RED DE DRENAJE DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 104 |
| TABLA 5.13 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 106 |
| TABLA 5.14 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 107 |
| TABLA 5.15 CLASES DE VALORES DE COMPACIDAD. (GRAVELIUS, 1914)..... | 108 |
| TABLA 5.16 COEFICIENTE DE COMPACIDAD O DE GRAVELIUS. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 108 |
| TABLA 5.17 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 109 |
| TABLA 5.18 CARACTERÍSTICAS FISIográfICAS DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 109 |
| TABLA 5.19 COORDENADAS UTM Y GEOGRÁFICAS QUE DELIMITAN NUESTRA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 110 |
| TABLA 5.20 COORDENADAS UTM DE LAS ESTACIONES EMAS Y ESIMES EXISTENTES EN LA CUECA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 112 |
| TABLA 5.21 DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN LA CUECA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018). 113 | 113 |
| TABLA 5.22 ECUACIONES REGIONALIZADAS EN NUESTRA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 118 |
| TABLA 5.23 GRUPO DE SUELOS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN WRB. (FAO, 2014). | 123 |
| TABLA 5.24 FACTOR K, DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN WRB. (AGROASEMEX, S.A., 2011)..... | 125 |
| TABLA 5.25 FACTOR C, DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN WRB. (AGROASEMEX, S.A., 2011)..... | 132 |
| TABLA 5.26 RANGOS DE CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA. (AGROASEMEX, S.A., 2011)..... | 136 |
| TABLA 5.27 CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LA SUBCUENCA RH18Af. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 137 |
| TABLA 5.28 VARIABLES DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 138 |
| TABLA 5.29 CRITERIOS DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 139 |
| TABLA 5.30 PONDERACIÓN DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 139 |
| TABLA 5.31 SUMA DE PONDERACIÓN DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 140 |
| TABLA 5.32 RANGOS DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 140 |
| TABLA 5.33 PORCENTAJES DE ÁREA DE VULNERABILIDAD FÍSICA DEL SUELO EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 141 |
| TABLA 5.34 RANGOS DE AMENAZA. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 142 |
| TABLA 5.35 PORCENTAJES DE ÁREA DE AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 143 |
| TABLA 5.36 NIVELES DE RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 145 |
| TABLA 6.1 NIVELES DE AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 147 |
| TABLA 6.2 FACTORES Y NIVELES DE AMENAZA POR EROSIÓN HÍDRICA EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 148 |
| TABLA 6.3 NIVELES DE VULNERABILIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 150 |
| TABLA 6.4 VARIABLES Y NIVELES DE VULNERABILIDAD FÍSICA DEL SUELO EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 151 |
| TABLA 6.5 NIVELES DE RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA EN NUESTRA SUBCUENCA RH18 – RÍO MIXTECO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018)..... | 153 |
| TABLA 6.6 ANÁLISIS GENERAL DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO. (ELABORACIÓN PROPIA, 2018) | 156 |