



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN Y PROBABILIDAD DE
COLAPSO, DEL DIQUE FORMADO POR EL DESLIZAMIENTO
LA HUAHUA, MUNICIPIO DE AGUILA, MICH.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

SÓCRATES FIGUEROA MIRANDA

ASESOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL



MORELIA, MICHOACÁN

MARZO DEL 2010



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN Y PROBABILIDAD DE
COLAPSO, DEL DIQUE FORMADO POR EL DESLIZAMIENTO
LA HUAHUA, MUNICIPIO DE AQUILA, MICH.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

SÓCRATES FIGUEROA MIRANDA

ASESOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL



MORELIA, MICHOACÁN

MARZO DEL 2010

DEDICATORIA:

Dedico esta tesis, de manera muy especial y afectuosa a mi familia, en particular a mis padres Carlos Figueroa Plancarte y Tomasa Miranda Santiago por su total e incondicional apoyo durante la licenciatura y la realización de esta tesis, por su fortaleza y valentía en los momentos adversos; a mis hermanos: Aleyda, Tania, Marvin, Pedro y Kimberly Patricia por su cariño, afecto y comprensión durante mi ausencia en sus vivencias. Familia: Les agradezco infinitamente el ser... eso...mi familia.

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por mantenerme aun en este camino y por la fortaleza que siempre me brinda.

A mis padres y hermanos por entender mis pretensiones, mis sueños, mis metas y estar siempre ahí, brindándome su amor y cariño. *Ustedes son mi fuerza de voluntad.*

A mis compañeros de clase que con sus experiencias y comentarios aportaron argumentos para seguir en la lucha constante, en especial a mis amigos y mejores personas: Adrián Alejandro, Alberto Carlos, Moisés Caravantes, Gonzalo, Rogelio y Juan Manuel; les agradezco sobre todo su amistad, su compañía, su ayuda, sus aportaciones y sus buenos consejos a mi persona, durante la licenciatura.

A la señora Sabina García por sus consejos, su ayuda en la adversidad y por tenderme siempre una mano amiga, cuando la necesidad me agobiaba.

A mi asesor de tesis el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por sus enseñanzas, su apoyo, su confianza en mí, y sobre todo por su amistad y comprensión. Y también de manera muy atenta a los sinodales por sus comentarios y sugerencias, de antemano el agradecimiento para ellos.

A María Fernanda, por estar a mi lado en estos momentos, por compartir su vida conmigo y siempre tener una palabra de aliento y esperanza, pero sobre todo por el afecto a mi persona y los momentos loables que me regala. *Eres una gran mujer.*

A Yanet, a ti por darle un sentido a mi vida, demostrarme que siempre vale la pena luchar, por escucharme, entenderme, por tu amistad y tú cariño. *Me enseñaste lo bello de la vida.*

A mis profesores, por todo el cúmulo de enseñanzas, cultura y sabiduría que aportaron para forjar mi profesión.

A la señorita Eréndira Cruz, por su recibimiento en Aquila, y brindarnos ayuda para la localización de la zona de estudio.

Agradezco también, a todos aquellos que creyeron en mí, que algún día me externaron su afecto, me impulsaron con sus palabras o apoyaron para que pudiera continuar con mis estudios. A todos aquellos que han sido parte de mi vida y han aportado en mi crecimiento escolar, laboral y sobre todo personal.

“Porque la vida, es precisamente, voluntad de poder”

ÍNDICE.

	Pág.
Resumen	7
I.- Introducción.	8
I.1.- Hipótesis.	
I.2.- Objetivo general	
I.3.- Objetivos particulares.	
I.4.- Área de estudio.	
II.- Marco conceptual y antecedentes.	14
II.1.- Marco conceptual.	
II.2.- Antecedentes históricos.	
III.- Materiales y métodos.	42
III.1.- Materiales	
III.2.- Método.	
IV.- Gasto hidráulico máximo en el deslizamiento La Huahua.	56
IV.1.- Características físicas de la cuenca Huahua.	
IV.2.- Cálculo del escurrimiento (método racional).	
V.- Caracterización de la inundación provocada por el deslizamiento.	64
V.1.- Deslizamiento La Huahua.	
V.2.- Polígono de inundación.	
V.3.- Volumen de inundación.	
V.4.- Afectación.	
VI.- Probabilidad de colapso del dique-deslizamiento.	69
V.1.- Geometría y estructura del dique-deslizamiento.	
V.2.- Escurrimiento superficial.	
V.3.- Probabilidad de colapso.	
VI.4.-Inundación aguas abajo.	
VIII.- Conclusiones y recomendaciones.	77
Referencias.	79
Bibliografía consultada.	81
Anexos.	84

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA	PÁG.
Figura 1. Localización de la cuenca del río Huahua.	10
Figura 2. Ubicación espacial del dique de deslizamiento y las poblaciones cercanas.	11
Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que representa el relieve de la zona de estudio.	12
Figura 4. Climas existentes en la cuenca del río Huahua.	13
Figura 5. Vegetación predominante en la cuenca del río Huahua.	13
Figura 6. Las tormentas tropicales son causa de inundaciones en México.	15
Figura 7. Deslizamiento San Juan Grijalva, Chiapas 2007.	15
Figura 8. Esquematación del desbordamiento de un río.	16
Figura 9. Efecto del área de la cuenca, en el volumen de escurrimiento.	17
Figura 10. Inundación en Villahermosa Tabasco, en octubre de 2007	18
Figura 11. Inundación por desbordamiento del río Mississippi, EUA (junio, 2008).	19
Figura 12. Efecto del incremento del nivel medio del mar.	19
Figura 13. Deslizamiento del cerro La Hujera, en Huahua municipio de Aquila Mich, octubre de 2008.	20
Figura 14. Pérdidas humanas y materiales, efectos de las inundaciones.	21
Figura 15. Formación de un dique de deslizamiento en el río Poerua (octubre de 1999).	22
Figura 16. Esquema de una cuenca hidrográfica.	23
Figura 17. Características principales de una cuenca hidrográfica.	24
Figura 18. Efecto de la forma de la cuenca en el escurrimiento superficial.	25
Figura 19. Sistema de drenaje de una cuenca hidrográfica.	25
Figura 20. Clasificación de las corrientes de una cuenca, según Strahler.	26
Figura 21. Efecto de la pendiente de la cuenca en el escurrimiento.	27
Figura 22. El ciclo del agua. La precipitación principal fuente de agua a la superficie terrestre.	28
Figura 23. Esquema del escurrimiento superficial y subterráneo.	29
Figura 24. Precipitación-Cuenca-Escurrimiento (PCE).	30
Figura 25. Comparación de la vulnerabilidad de viviendas ante una inundación.	32
Figura 26. Vista del lago en el río Poerua, después de la ruptura del dique.	34
Figura 27. Vista de Bourg d' Osians en el Valle de la Romanche.	34
Figura 28. Vista de la parte superior del derrumbe del Dobratsch. .	35
Figura 29. Lago de Alleghe con un resort vacacional en el dique de deslizamiento.	36
Figura 30. Se muestra el deslizamiento del Monte Toc, en el valle de Vajont al noreste de Italia	36
Figura 31. Vista aérea del dique de deslizamiento en Mayunmarca, Perú.	37
Figura 32. Vista del dique de deslizamiento La Josefina meses después de la ruptura.	38
Figura 33. Dique de deslizamiento de tierra en el río La Lima.	39
Figura 34. Vista del deslizamiento que obstruyó el río Grijalva.	40
Figura 35. Dique de deslizamiento formado por el derrumbe del cerro La Hujera.	40
Figura 36. Mapa de pendientes de la cuenca del río Huahua.	47
Figura 37. Método de Taylor y Schwarz	48
Figura 38. Ubicación de las estaciones hidrométricas más cercana a la cuenca en estudio (Est. 16236 en Aguililla, est. 16217 en Lázaro Cárdenas y est. 16208 en Aquila).	49

Figura 39. Recorte del mapa de isoyetas para la República Mexicana con periodo de retorno de 50 años y duración de 24 horas que muestra la ubicación de la cuenca en el mapa de isoyetas.	49
Figura 40. Impacto de una gota sobre suelo desnudo.	51
Figura 41. Mapa de tipo de suelo en la cuenca del río Huahua.	52
Figura 42. Cuenca del río Huahua, Aguila Mich.	56
Figura 43. Curva hipsométrica de la cuenca del río Huahua.	58
Figura 44. Perfil del cauce principal	58
Figura 45. Tipo de suelo existente en la cuenca del río Huahua.	61
Figura 46. Mapa que muestra la cobertura vegetal en la cuenca.	62
Figura 47. Apariencia del agua en el río Huahua (baja concentración de sedimentos).	63
Figura 48. Deslizamiento traslacional del Cerro La Hujera, conocido como deslizamiento La Huahua.	64
Figura 49. Geometría del deslizamiento.	65
Figura 50. Polígono de inundación provocado por el deslizamiento.	66
Figura 51. Vista del lago formado por el dique.	67
Figura 52. Grafica de la variación del volumen embalsado con respecto a la elevación.	67
Figura 53. Afectación del polígono de inundación, aguas arriba del dique deslizamiento	68
Figura 54. Vista del depósito (dique) desde aguas abajo del río.	69
Figura 55. Salida del escurrimiento a través del dique.	70
Figura 56. Tipo de rocas que conforman el dique de deslizamiento.	70
Figura 57. Sección transversal del cauce obstruida por el depósito. Nivel que alcanzaría el río para desalojar un gasto con periodo de retorno de 500 años.	71
Figura 58. Vista del escurrimiento aguas abajo desde la parte superior del dique deslizamiento.	71
Figura 59. Vista en planta de los bordos longitudinales, en El Herradero.	72
Figura 60. Perfil de dos secciones transversales de los bordos en El Herradero.	73
Figura 61. Bordos longitudinales construidos por Protección Civil en El Herradero.	74
Figura 62. Ubicación del puente Huahua.	74
Figura 63. Perfil del puente Huahua, se muestran las pilas y la base del puente.	75
Figura 64. Vista lateral del puente Huahua, Aguila Mich.	76

LISTA DE TABLAS.

TABLA	PÁG.
Tabla 1. Distribución de inundaciones en el mundo.	14
Tabla 2. Parámetros morfométricos calculados para la cuenca Huahua.	44
Tabla 3. Significado de las variables de los parámetros morfométricos.	44
Tabla 4. Coeficientes de escurrimiento para el método racional.	45
Tabla 5. Resultados de los métodos usados para el cálculo de la pendiente de la cuenca.	47
Tabla 6. Valores del factor K.	51
Tabla 7. Valores del factor C.	53
Tabla 8. Valores para el factor P.	53
Tabla 9. Índices y parámetros morfométricos de la cuenca del río Huahua.	57
Tabla 10. Coeficientes de escurrimiento para el método racional.	59
Tabla 11. Laminas de lluvia para duraciones de 1 y 24 horas, para distintos periodos de retorno en la cuenca.	59
Tabla 12. Tiempos de concentración para cada periodo de retorno analizado.	59
Tabla 13. Resultados de la intensidad de lluvia.	60
Tabla 14. Gasto máximo liquido.	60
Tabla 15. Valores de los factores que intervienen en la FUPS.	60
Tabla 16. Gasto solido.	62
Tabla 17. Resultados del gasto total máximo en el dique de deslizamiento.	63
Tabla 18. Área hidráulica requerida para desalojar los caudales obtenidos en el análisis hidrológico.	73
Tabla 19. Área hidráulica total en el perfil del puente del río Huahua.	75

ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN Y PROBABILIDAD DE COLAPSO, DEL DIQUE FORMADO POR EL DESLIZAMIENTO LA HUAHUA, MUNICIPIO DE AQUILA, MICH.

RESUMEN.

Se estudia el caso de un dique-deslizamiento, en la tenencia de Huahua, municipio de Aquila Mich. El día 3 de octubre de 2008, el deslizamiento del cerro La Hujera, originó el taponamiento del río Huahua, provocando la inundación de zonas aguas arriba del dique-deslizamiento. Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se caracteriza la cuenca del río Huahua; determinando los parámetros morfométricos, cobertura vegetal, tipo y uso de suelo. Se aplica el método racional para determinar el escurrimiento máximo a la salida de la cuenca, utilizando diferentes periodos de retorno y un coeficiente de escurrimiento en función de los periodos de retorno considerados. Se determina el polígono de inundación provocado por la obstrucción repentina del cauce, en base a un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y observación en campo. Mediante análisis cualitativo, se estima la probabilidad de colapso del dique; además de un escenario crítico de inundación por simple comparación de áreas hidráulicas requeridas con aquellas disponibles, en puntos críticos de las comunidades El Herradero y puente Huahua.

El dique-deslizamiento genera un peligro constante de inundación aguas arriba, debido a que cualquier variación de su altura o de la cota alcanzada por el escurrimiento superficial, modifica el polígono de inundación. Bajo condiciones actuales del dique, éste presenta una probabilidad baja de colapso debido a que es integrado por bloques de roca de cerca de 10m de diámetro, que le infieren estabilidad ante el empuje hidráulico.

El análisis de las secciones hidráulicas aguas abajo de los bordos longitudinales y del puente Huahua, indican que la comunidad del Herradero, corre peligro de inundación, ya que estas secciones resultan insuficientes para dar salida a los gastos máximos calculados para diferentes periodos de retorno. No siendo así, para la sección del puente Huahua, ya que esta es superior al máximo gasto calculado, para una intensidad de lluvia con periodo de retorno de 500 años.

Palabras claves: cuenca hidrográfica, inundación, dique-deslizamiento, afectación.

I. INTRODUCCIÓN.

Desde tiempos remotos las inundaciones han demostrado lo vulnerable que somos ante ellas. Son de los principales eventos que han causado y golpeado fuertemente las economías y bienestar de los pueblos. Lo que nos ha llevado a crear medidas de alerta y prevención, mediante el estudio y análisis de las principales causas de inundación.

Las inundaciones por diques formados a partir de deslizamientos de tierra son poco estudiadas en México. Los deslizamientos de tierra sobre los cauces son un doble problema para la sociedad y las autoridades que deben atender el problema. Los deslizamientos de tierra en flancos de ríos crean grandes represas que interrumpen el flujo de los cursos de agua, y son una amenaza para la infraestructura y la población, localizados aguas arriba y abajo. Aunque a veces los ríos no son totalmente obstruidos por los detritos que forman el dique, siempre son considerados un riesgo constante. Los diques o presas de deslizamiento pueden fallar por la erosión, por desborde, por colapso abrupto o progresivo del cuerpo del dique. Los incidentes por diques de deslizamiento, causan importantes daños tanto directa como indirectamente, por lo que es importante evaluar el riesgo, peligro y vulnerabilidad de las zonas adyacentes y cercanas.

En este trabajo, se estudia el escurrimiento máximo de salida en el dique del deslizamiento La Huahua, localizado en la tenencia de Huahua, municipio de Aguila Michoacán. El depósito del deslizamiento traslacional ocurrido en el flanco poniente del cerro La Hujera el día 4 de octubre del 2008, obstruyó el flujo del río Huahua. El remanso provocado formó una inundación que se extendió por poco mas de 2 km aguas arriba, afectando a comunidades asentadas en las márgenes del río. Se afronta el tema desde la cuenca de aportación, hasta la probabilidad de colapso del dique. Para el cálculo de los caudales máximos en el dique del deslizamiento nos apoyamos en la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) cuyo fundamento teórico es el método racional y en herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El análisis de la inundación aguas arriba del dique de deslizamiento, se realizó con base en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), mediciones en campo y calculo de volúmenes a través de un SIG, de manera que se determinó el polígono de inundación y los volúmenes de esta. Se aporta una estimación cualitativa de la probabilidad de colapso del dique que obstruye el flujo del río Huahua, y del peligro de las poblaciones cercanas.

Gran relevancia toma este trabajo por los vínculos entre el cambio climático, las inundaciones y deslizamientos de tierra. El proceso de cambio climático se cree que conducirá a un aumento de la temperatura media global, los cambios en la frecuencia y distribución de las precipitaciones y las variaciones en el patrón y la ocurrencia de sequias e inundaciones (FAO, 2000, Parry y Swaminathan, 1992).

Durante el siglo XXI, se incrementará la precipitación media anual a nivel mundial, aunque en escala regional los aumentos o disminuciones sean generalmente de 5 a 20%. Es probable que las precipitaciones aumenten sobre las latitudes medias tropicales de África y América en el verano (Makino y Funaki, 2002).

Lo anterior nos informa y nos advierte la importancia que tendrán las precipitaciones en el suceso de desastres naturales, tales como inundaciones y deslizamientos que en un futuro se puedan presentar en la zona de estudio, y en nuestro país.

I.1.- Hipótesis.

El taponamiento del río La Huahua por el depósito del deslizamiento del mismo nombre, ocurrido en octubre del 2008, pone en peligro de inundación a las rancherías localizadas aguas arriba y aguas abajo del deslizamiento; las primeras por la acumulación del agua a partir del dique formado por el deslizamiento, y las segundas por el probable colapso del mismo.

I.2.- Objetivo general.

Estudiar la inundación y probabilidad de colapso, del dique formado por el deslizamiento La Huahua, localizado en el municipio de Aquila, Mich.

I.3.- Objetivos particulares.

Realizar un levantamiento topográfico del depósito del deslizamiento La Huahua, para cuantificar el volumen del dique que constituye el “tapón” del río de mismo nombre.

Identificar el tipo de suelo en la cuenca del río Huahua a partir de cartografía edafológica preexistente y con base en ello determinar coeficientes de escurrimiento.

Calcular el escurrimiento máximo de salida o gasto pico en el punto del río donde se localiza el depósito del deslizamiento La Huahua.

Realizar comparaciones de las secciones hidráulicas requeridas con respecto a las disponibles, para evaluar la máxima extensión probable de la inundación localizada aguas arriba del dique formado por el deslizamiento La Huahua.

Estimar de forma cualitativa la probabilidad de colapso del dique a partir de la determinación de escurrimientos máximos con periodos de retorno amplios.

I.4.- Área de estudio.

I.4.a.- Localización del área de estudio.

La cuenca del río Huahua se encuentra albergada dentro de los municipios de Coalcomán de Vázquez Pallares ($18^{\circ}46'N$ $103^{\circ}09'O$) y el municipio de Aquila ($18^{\circ}36'N$ $103^{\circ}30'O$), en el estado de Michoacán (Fig.1). Ambos municipios se localizan al suroeste del estado, y pertenecen a la región de la Costa, estando enclavados en la Sierra Madre del Sur. Aquila se encuentra a 200 metros sobre el nivel del mar y a una distancia de aproximadamente 430 km de Morelia, capital del estado. Colinda al norte con el municipio de Coahuayana, Chinicuila y el mismo Coalcomán; al este con Lázaro Cárdenas y Arteaga; al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Coahuayana y el Océano Pacífico.

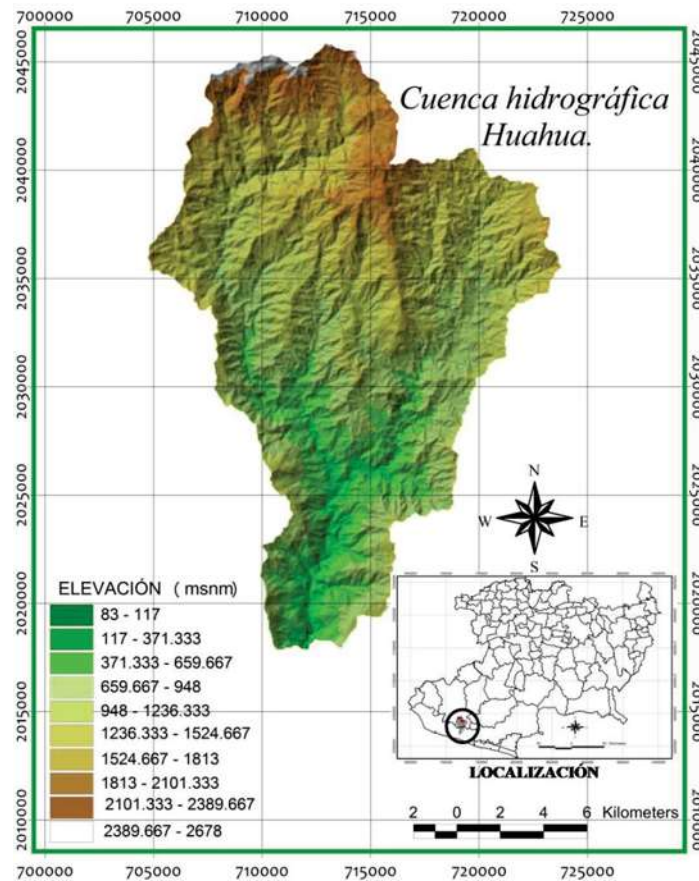


Figura 1. Localización de la cuenca del río Huahua.

La cuenca hidrográfica está limitada por los paralelos $18^{\circ}29'35.52''$ y $18^{\circ}14'2.4''$ de latitud norte y los meridianos $103^{\circ}03'51.84''$ y $102^{\circ}52'50.88''$ de longitud oeste. Está rodeada por las cuencas hidrológicas de los ríos Tupitina al este y Cuilala al oeste.

El dique de deslizamiento (punto de interés, con coordenadas $18^{\circ}14'24.58''N$, $102^{\circ}59'35.60''O$) se ubica al sureste del municipio de Aquila, en la tenencia de Huahua, localizada a unos 80 km de la ciudad de Lázaro Cárdenas y a unos 30 km de Caleta de Campos. Las localidades de Huahua ($18^{\circ}11'01.15''N$, $103^{\circ}00'23.40''O$), El Herradero ($18^{\circ}12'33.78''N$, $102^{\circ}59'58.20''O$) y La Hujera ($18^{\circ}15'24.78''N$, $102^{\circ}59'36.17''$) son las más cercanas al dique de deslizamiento (Fig. 2), formado por el desgajamiento del cerro La Hujera. Y más al sureste se encuentra El Campo de Huahua (La Tinaja).



Figura 2. Ubicación espacial del dique de deslizamiento y las poblaciones cercanas.

I.4.b.- Fisiografía y geología.

La Sierra Madre del Sur es la provincia fisiográfica que alberga a la cuenca del Río Huahua, y forma parte de las subprovincias Cordillera Costera del Sur y Costera del Sur (Raiz Erwin, 1959). El terreno está representado por numerosas barrancas y escarpes con altitudes que van desde los cero metros en las cercanías de la costa hasta los 2,650 m en el cerro de la Bufa al norte de la cuenca (Fig. 3). El relieve que se presenta en la cuenca es variado y está constituido por sierras complejas, disecadas por corrientes aluviales, así como con lomeríos con cañadas. Destacan las barrancas de El Grito, La Ocotera, Agua de Villa, Paniaguas y Encinitos. El cerro que sufrió el deslizamiento tiene por nombre La Hujera y se encuentra en la margen izquierda del río Huahua.

La geología del área de estudio corresponde a un grupo litotectónico constituido por rocas de origen volcánico sedimentario y cuerpos plutónicos con edades del Paleoceno. En la zona de estudio afloran rocas del Complejo Arteaga (Centeno, 1994), secuencias volcanosedimentarias de Arco Insular pertenecientes al subterreno Huetámo-Zihuatanejo del terreno Guerrero, así como rocas intrusivas del arco magmático Sierra Madre del Sur. En su mayoría encontramos parte del batolito de Arteaga emplazado durante el Paleoceno-Eoceno, representado por granito, granodiorita con variaciones a diorita, así mismo se tienen afectando a los cuerpos intrusivos, diques dioríticos y andesíticos. Estas formaciones del Cenozoico Terciario, son la unidad de rocas más antiguas de la zona de estudio.

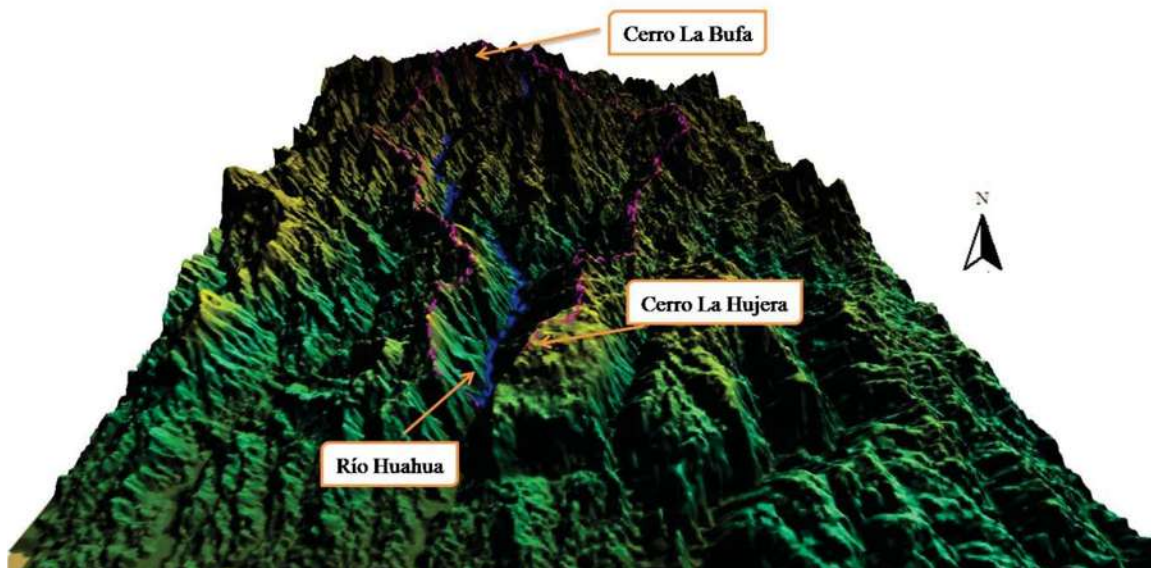


Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que representa el relieve de la zona de estudio. La línea color magenta, indica el parteaguas de la cuenca del río Huahua.

La otra gran parte de la litología que compone a esta cuenca, se trata de rocas volcánicas, toba andesítica-limolita, pertenecientes a la formación Tepalcatepec, de las edades Aptiano-Albiano. Se pueden encontrar también arenisca, conglomerado y lentes de caliza. La formación Tepalcatepec, se tiene por cambio de facies de las secuencias volcanosedimentarias del subterreno Zihuatanejo.

De manera aislada y en pequeñas porciones, dentro de los límites de la cuenca se pueden encontrar formaciones de caliza, de la edad Aptiano-Albiano. Estas rocas sedimentarias pertenecen al subterreno Zihuatanejo.

En la parte baja de la cuenca, donde el río Huahua tiene su contacto con las aguas del Océano Pacífico, encontramos depósitos continentales recientes, es decir, depósitos aluviales y coluviales recientes.

1.4.c.- Clima y vegetación.

El clima determina en gran medida el tipo de vegetación y la cantidad de lluvia que cae sobre una región. En la cuenca de análisis se tienen dos climas predominantes (Fig. 4): en la parte baja el clima es cálido y en la parte alta donde las cumbres sobresalen el clima es semicálido

templado. En ambas zonas las lluvias se presentan en verano con precipitaciones del 5 al 10.2 % de la precipitación anual.

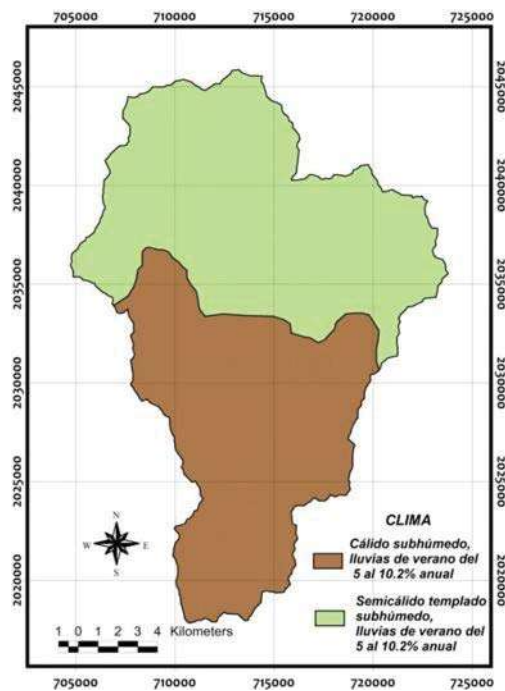


Figura 4. Climas existentes en la cuenca del río Huahua, modificado de SAGARPA.

La vegetación está compuesta por selva baja caducifolia y selva media subcaducifolia en la parte baja de la cuenca, en las cercanías con la costa. La flora característica se trata de bosques densos de 15 a 40 metros de altura compuestos por ejemplares de “parota”, “cedro rojo”, “copal”, “pochote” y cactus de formas columnares. En la parte alta de la cuenca se tienen bosques de pino y encino (Fig. 5), que determinan junto con la elevación, el clima templado de la zona; aquí se encuentran comunidades de pino-encino de 6 hasta 30 m de altura. Cabe mencionar que poco más del 96% de la superficie de la cuenca está cubierta por la vegetación antes citada, solo el 3% es suelo desnudo (sin vegetación, pastizales, agricultura de temporal) representado en aisladas y pequeñas zonas dentro de toda la cuenca.

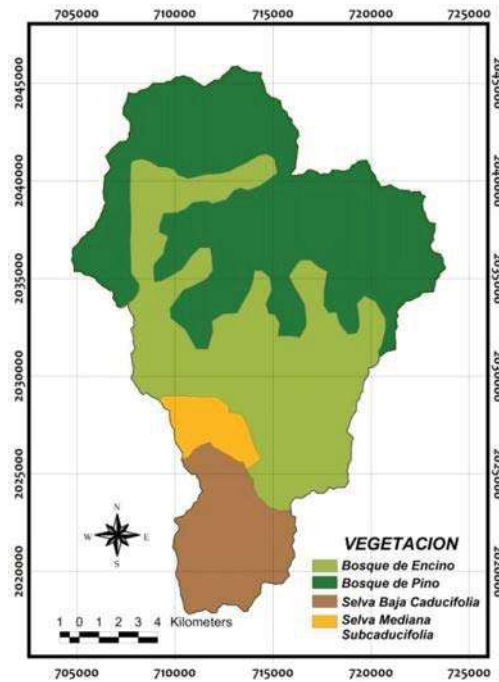


Figura 5. Vegetación predominante en la cuenca del río Huahua, modificado de SAGARPA.

II. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES.

II.1.- Marco Conceptual.

II.1.a.- Inundación.

La definición de inundación, según el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974) es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”. Donde “nivel normal” es la elevación de la superficie libre del agua que no causa daños ni genera pérdidas.

Sin embargo, al analizar varias definiciones de diversos autores podemos decir que la **inundación es un evento generalmente natural y recurrente que debido a fenómenos naturales o antrópicos (crecidas o desbordes de los cursos de agua, precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica), el agua invade zonas o áreas que normalmente están secas provocando daños a la población y la infraestructura.** Las inundaciones son de los desastres naturales más comunes y extensivos en el planeta (Tabla 1) y de manera singular en la República Mexicana (ver anexo I). Durante mucho tiempo han sido el riesgo natural que más pérdidas económicas y humanas ha causado.

Tabla 1. Distribución de inundaciones en el mundo. Después de Asia, el continente americano presenta mayor número de inundaciones y damnificados. Fuente: González, 2009.

Distribución de Inundaciones por Continente 1900 - 2009			
	N° Eventos	Muertos	Afectados
África	670	22.377	48.671.383
América	844	100.414	80.690.107
Asia	1.480	6.756.812	2.942.262.043
Europa	450	8.308	13.438.574
Oceania	112	429	683.071
TOTAL	3.556	6.888.340	3.085.745.178

Son bastantes las **causas y factores** que provocan las inundaciones en México y en el mundo, sin embargo las podemos abarcar de la siguiente forma:

II.1.b.- Causas de las inundaciones.

✚ Causas climáticas:

1. Lluvias intensas o exceso de precipitación debidas a huracanes, tormentas tropicales (Fig. 6), frentes fríos, etc.
2. Fusión de la nieve acumulada.
3. Precipitaciones de larga duración.

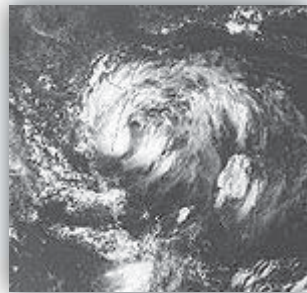


Figura 6. Las tormentas tropicales son causa de inundaciones en México. La imagen izquierda muestra una imagen satelital del huracán, en tanto que en la derecha se muestra la zona de posible afectación. Tomada de es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_At%C3%A1ntico_de_1995.

✚ Accidentales:

1. Ruptura de obras hidráulicas (presas, diques, bordos longitudinales, etc.).
2. Deslizamientos de tierra (Fig. 7).
3. Caída de árboles y puentes.



Figura 7. Deslizamiento San Juan Grijalva, Chiapas 200, ocurrido el 4 de noviembre del 2007. En la imagen se observa como el río Grijalva, segundo río más caudaloso de México, es obstruido por el dique formado por el deslizamiento de cerca de 50 millones de m³. Tomada de www.jornada.unam.mx/2007/11/29/index.php?sect...

✚ Hidromorfológicas y/o antrópicas:

1. El asfaltado de las vías de comunicación terrestre.
2. La deforestación de bosques.
3. Artificialización de los cauces.
4. La invasión u ocupación de las construcciones en las márgenes de los cauces (Fig.8).
5. El desequilibrio entre el volumen a evacuar y la capacidad de los cauces naturales y/o artificiales.
6. Colmatación u obstrucción previa, artificial o natural, de los cursos de agua.

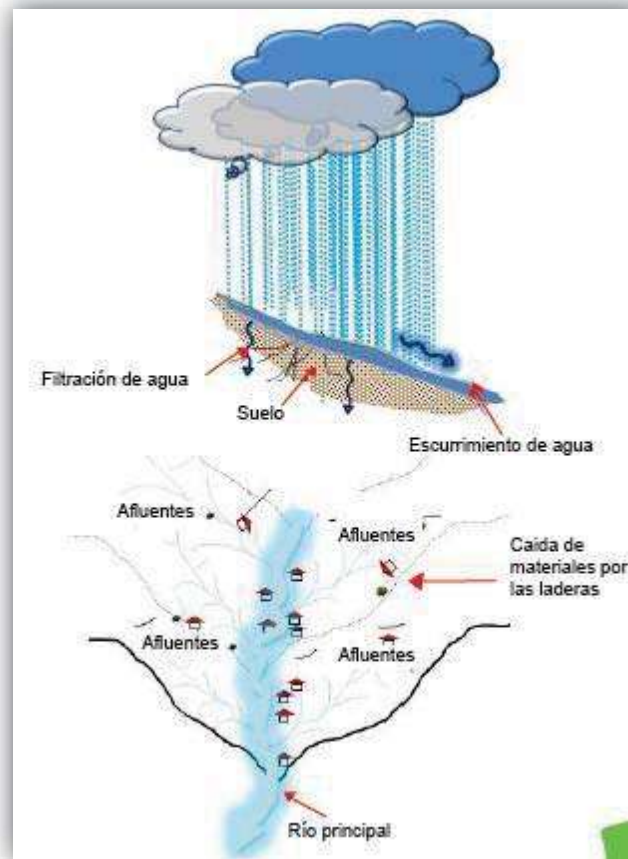


Figura 8. Esquematización del desbordamiento de un río. Se puede observar que la invasión de las construcciones en las márgenes del río, reducen su área hidráulica y obstruyen el flujo. Fuente: Mora, 2008.

II.1.c.- Factores de las inundaciones.

✚ Factores Condicionantes:

- 1) Incremento considerable y momentáneo de la alimentación de una cuenca.
- 2) Alta compacidad y pendiente en la zona de alimentación.
- 3) Baja pendiente en la zona de evacuación y sedimentación.
- 4) Sección de cauces reducidos u obstruidos (colmatados).

✚ Factores Coadyuvantes:

- 1) Altas temperaturas primaverales (efecto: fusión nival violenta).
- 2) Incremento de la impermeabilidad.
- 3) Angostamiento de cauces por obras de infraestructura.
- 4) Movimiento de tierras al interior del cauce.
- 5) Falta de limpieza y acondicionamiento de los cauces.

En México las causas más comunes son las lluvias intensas y/o de duración prolongada, ocasionadas por tormentas tropicales, huracanes y frentes fríos, y en menor medida la ruptura de represas o diques, no estando exentos de cualquiera de las demás causas antes mencionados.

II.1.d.- Clasificación de las inundaciones.

Según el CENAPRED (2004), las inundaciones pueden clasificarse más comúnmente de acuerdo a su origen o bien al tiempo que tardan en presentarse sus efectos.

✚ **De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca.** La respuesta de una cuenca se debe a sus características fisiográficas, como por ejemplo el área (Fig. 9). Prácticamente la respuesta de una cuenca se divide en lenta y rápida, por ende las inundaciones son de tipo lento o súbito.

- a) *Inundaciones lentas.* Como en este caso la respuesta de la cuenca es lenta, las avenidas que se presentan suelen ser del orden de varias horas o días y los daños causados generalmente son solo materiales.
- b) *Inundaciones súbitas.* Cuando las inundaciones son repentinas (del orden de minutos y un par de horas) el desastre es mayor, hay pérdidas materiales y humanas. Y obedecen a lluvias extremadamente repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Además este tipo de inundaciones se presentan más ocasionalmente en zonas urbanas debido a que las calles y edificios generan una cubierta impermeable que hace que el agua escurra más rápidamente y casi no se infiltre, también la deforestación es causa de un escurrimiento más veloz.

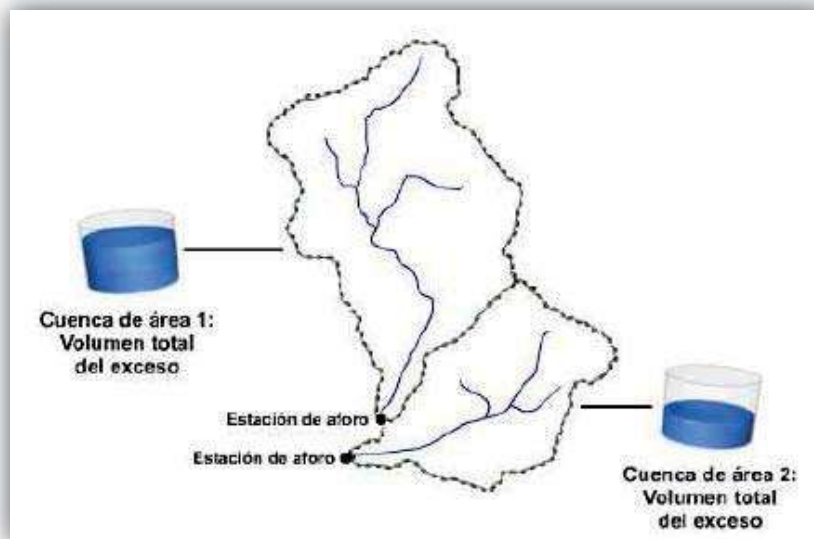


Figura 9. Efecto del área de la cuenca, en el volumen de escurrimiento. Entre mayor es el área de aportación, mayor es el volumen de escurrimiento a la salida de la cuenca. Fuente: González, 2009.

La diferencia entre las inundaciones lentas y súbitas radica en el tiempo que tardan en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. Una forma de caracterizar este tiempo es a través del llamado *tiempo de concentración* que es propio de cada cuenca.

✚ **De acuerdo a su origen.** Aquí se trata de identificar la causa de la inundación.

- a) *Inundaciones pluviales.* Estas ocurren por el exceso de lluvia, es decir, son consecuencia de la precipitación intensa o prolongada en una zona determinada, provocando la saturación del suelo y debido a que el agua no puede ser drenada se acumula (anegamiento), pudiendo permanecer ahí horas e incluso días (Fig. 10). **La principal característica de este tipo de inundación es que el agua acumulada es propiamente agua precipitada en la zona y no la que viene de algún otra parte** (por ejemplo de la parte alta de la cuenca). Entre los factores más comunes que provocan este tipo de inundaciones tenemos los huracanes, ciclones tropicales, los frentes fríos, lluvias convectivas y orográficas, además de fenómenos como la gota fría en el mediterráneo y los tifones en Asia Oriental.

En la República Mexicana son causas frecuentes de este tipo de inundación las tormentas tropicales (en verano) y los frentes fríos (en invierno), a veces asociados con lluvias de tipo convectivo y orográfico. Los municipios de la costa, en Michoacán son afectados cada año, por ciclones y huracanes.



Figura 10. Inundación en Villahermosa Tabasco, en octubre de 2007. Este evento es un ejemplo de inundación pluvial, asociada con el desbordamiento de ríos, ya que el exceso de precipitación provocó un anegamiento en toda Villahermosa. Tomada de www.hablandodesigs.com/2007/.../

- b) *Inundaciones fluviales.* Son provocadas por el desbordamiento de los cursos de agua (generalmente ríos). El desbordamiento de los ríos, se debe a un incremento brusco o paulatino del nivel del flujo, propiciado por las avenidas, las cuales tienen su origen en las súbitas y/o persistentes precipitaciones. **La diferencia con las inundaciones pluviales radica en que las precipitaciones pueden generarse en cualquier parte de la cuenca, y a través de sus tributarios aportar el excedente de agua al cauce principal, provocando así el incremento del recurso hídrico a través del largo del río.** Las inundaciones de este tipo afectan principalmente las zonas adyacentes del río, siendo las zonas más susceptibles, las partes bajas (por ejemplo la inundación en EUA, por el Mississippi. Fig. 11), los meandros, las zonas donde el río se estrecha o tiene poca profundidad y de manera especial en la desembocadura donde se acumulan los sedimentos.

Cabe señalar que el volumen de agua que escurre sobre el cauce aumenta con el área de aportación de la cuenca, siendo así los cauces de mayor longitud o los que llegan hasta las planicies costeras los que causan las inundaciones fluviales más importantes.



Figura 11. Inundación por desbordamiento del río Mississippi, EUA (junio, 2008).
Fuente: www.pantanodelzujar.es/blog/tag/tormenta/page/2/

- c) *Inundaciones costeras.* Estas son debidas al incremento del nivel medio del mar, originadas particularmente en las zonas costeras. Factores como el viento, sismos y ciclones tropicales, aumentan el nivel medio del mar y originan olas de grandes alturas, las cuales pueden penetrar tierra adentro inundando grandes extensiones (Fig. 12). El Golfo de México es una zona que sufre constantes inundaciones de este tipo, estas inundaciones son peligrosas tanto cuando el agua penetra como cuando regresa al mar y los daños que causan son la socavación de las pilas de los edificios cercanos, naufragio de las embarcaciones, destrucción de las instalaciones portuarias, así como erosión de las playas y riscos.

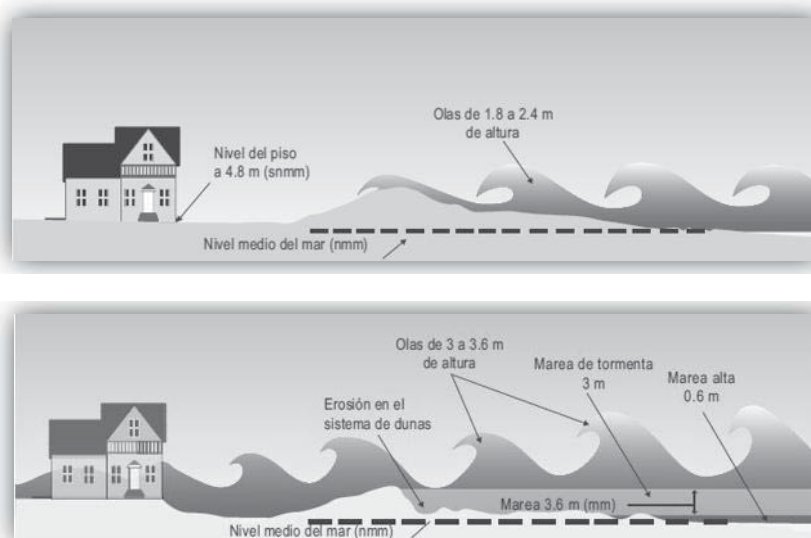


Figura 12. Esquema que ilustra la inundación provocada por incremento del nivel medio del mar. La imagen superior muestra una condición normal y la inferior con marea de tormenta. Fuente: CENAPRED, 2004.

- d) *Inundaciones por falla de una estructura hidráulica.* Resultan ser inundaciones más graves que las antes mencionadas, es decir, la falla de una obra hidráulica (por ejemplo una presa) ocasiona un alto grado de destrucción, ya que el agua es liberada de manera brusca y en grandes volúmenes. Afortunadamente, este tipo de inundación es poco común. En México en el año 2003 debido a la conclusión de la vida útil y la falta de mantenimiento fallaron las presas *Dolores* en San Luis Potosí y *El Capulín* en Zacatecas.

Los factores más comunes que ocasionan el fallamiento de una estructura hidráulica son: *un escaso o mal diseño*, debido a la falta de información hidrológica y climática de la región, el uso de metodologías o criterios inapropiados u obsoletos para el diseño. *Mala operación de compuertas:* a) cuando se abre demasiado la compuerta y se supera la capacidad de conducción del cauce aguas abajo, se provoca un desbordamiento del río y en consecuencia una inundación, b) cuando la compuerta no se abre lo suficiente para desaguar la avenida, entonces se supera la capacidad de la cortina poniéndola en riesgo. *Falta de mantenimiento o termino de la vida útil de la estructura.* Los bordos de protección y pequeñas represas construidas a principios del siglo pasado son las más propicias a fallar por estos factores.

Dentro de las inundaciones, según su origen, podemos incluir las inundaciones accidentales, como las ocasionadas por diques-deslizamiento.

- e) *Inundaciones por diques-deslizamiento.* Además de las lluvias, existen otros factores que pueden ocasionar el rebosamiento y/o desbordamiento de un cauce, tales como: **los deslizamientos de tierra** que forman tapones o diques provocando un remansamiento del agua, como sucede actualmente con el deslizamiento del cerro La Hujera (Fig. 13) en el municipio de Aquila Michoacán, el cual obstruye el río Huahua, inundando las zonas aguas arriba del deslizamiento (caso que nos comprende en este trabajo). La caída de puentes y arboles, la ruptura de alguna represa también pueden ocasionar un desbordamiento de cauces naturales.



Figura 13. Vista frontal del deslizamiento del cerro La Hujera, en Huahua municipio de Aquila Mich, octubre 2008. Tomada el 7 de enero de 2010.

Es de obviarse que las inundaciones causan severos daños materiales, son causa de muertes humanas e incluso es capaz de afectar a la misma naturaleza. Entre los efectos más comunes encontramos los siguientes:

- ✚ Arrastre de materia sólida (sedimentos).
- ✚ Extensas áreas cubiertas por agua.
- ✚ Intensa erosión.
- ✚ Proliferación de microorganismos.
- ✚ Construcciones dañadas.
- ✚ Pérdida de vidas.
- ✚ Pérdida de cosechas.
- ✚ Deposito de sedimentos.

Y a estos se suman también efectos secundarios tales como: la escasez de alimentos, transmisión de enfermedades, contaminación del agua potable y problemas para eliminar los desechos sólidos y líquidos (Fig. 14).



Figura 14. Pérdidas humanas y materiales, efectos de las inundaciones.

Fuente: www.gentedigital.es/.../

De ahí la importancia de poner especial atención a estos repentinos y destructivos desastres tanto en nuestro país como en el mundo. Tomando medidas preventivas y realizando estudios de riesgo de manera que se pueda alertar a la población de manera temprana y eficiente.

Como ya se mencionó, una de las causas (accidentales) que puede determinar una posible inundación, son los derrumbes o **deslizamientos de tierra**. Los deslizamientos son eventos recurrentes en las zonas montañosas, aunque pocas veces son registrados, debido a su carácter frecuentemente temporal. Uno de los efectos de los deslizamientos de tierra, es que presenta riesgos, entre ellos según Benn (1992) se encuentra **el bloqueo de ríos que forman diques** (Fig. 15) y posteriormente lagos.

Estos deslizamientos pueden ocasionar inundaciones de dos formas: *en los instantes seguidos al deslizamiento*, la obstrucción repentina del cauce provoca un remansamiento del mismo, inundando las zonas aguas arriba de la formación de tierra; *una vez formada y establecida la masa de tierra* es propensa a reventar o colapsar con el incremento del caudal, dando paso a una brusca y repentina avenida compuesta de rocas, agua y sedimentos, que afectan las áreas aguas abajo del dique. El caudal se incrementa por las intensas y prolongadas lluvias en la superficie de la cuenca.

La activación de estos deslizamientos puede producirse, principalmente, debido a tres mecanismos: lluvias, sismos, la influencia del ser humano en el uso del suelo o la combinación de estos mecanismos. La mayoría de los deslizamientos ocurren después de periodos de lluvias fuertes o de periodos lluviosos, por lo que el agua es el factor que comúnmente se asocia con la inestabilidad de laderas.

Un dique de deslizamiento (*landslide dam, en inglés*) es un terraplén natural conformado de tierra y rocas, que se deposita perpendicular al curso de un río, provocado por la inestabilidad de una ladera, de la cual una porción del material que la compone ha perdido el equilibrio y se ha deslizado ladera abajo por efecto de la gravedad.



Figura 15. Formación de un dique de deslizamiento en el río Poerua (octubre de 1999).

Fuente: West Coast Regional Council, 2002.

Cuando las masas de tierra y rocas obstruyen el flujo del cauce, resulta un problema grave ya que al evitar que el agua fluya provoca el acumulamiento de un gran volumen (formación de un embalse o lago), lo que pone en peligro las zonas cercanas al río. Debido a que este fenómeno puede ocasionar una posible inundación; es necesario hacer un análisis de la cuenca de aportación del río y la probabilidad de colapso de la formación tórica, y proponer soluciones.

Para que el dique pueda colapsar de manera natural, debe de haber un empuje hidrostático (fuerza del cuerpo de agua, que se aplica sobre la pared que la obstruye) sobre el dique, mayor del que pueda soportar este último. Para que el empuje hidrostático crezca debe haber una gran acumulación de agua en ese punto. Es menester entonces, determinar el volumen de agua que debido a la lluvia se puede acumular en ese punto, es decir, hacer un análisis hidrológico de la zona de aportación.

II.1.e.- Cuenca hidrográfica.

Por lo mencionado en el párrafo anterior es necesario tener claros, ciertos conceptos relacionados con el análisis que se realizará, para determinar esa acumulación de agua, tales como: **cuenca hidrográfica, escurrimiento superficial, gasto pico, precipitación, coeficiente de escurrimiento, periodo de retorno y tiempo de concentración, entre otros.**

Una *cuenca hidrográfica* es la zona de la superficie terrestre en la cual las gotas de agua procedentes de una precipitación que cayeran sobre ella, serian drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (punto que generalmente es el de menor cota de la cuenca) (Fig. 16).

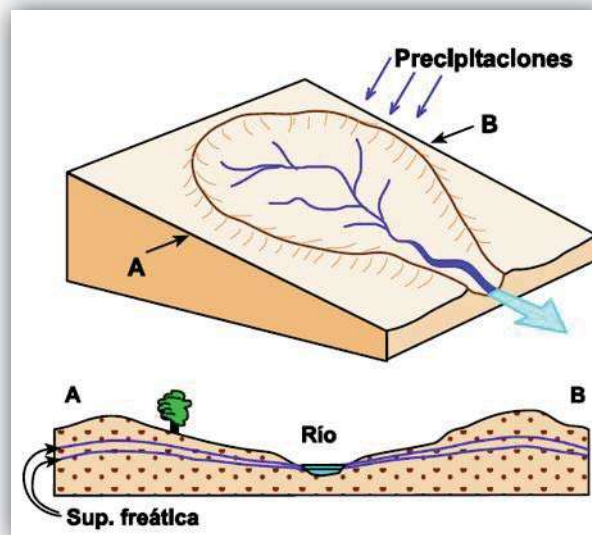


Figura16. Esquema de una cuenca hidrográfica. Fuente: Sánchez, 2004.

Existen 2 tipos de cuenca, desde el punto de vista de su salida:

Cuencas exorreicas o abiertas, en estas el punto de salida del río principal se encuentra en los límites de la cuenca, ya sea en otra corriente o en el mar.

Cuencas endorreicas o cerradas, son aquellas que tienen su punto de salida dentro de los límites de la cuenca, sus escurrimientos por lo general, dan origen a un lago.

Las características físicas de una cuenca hidrográfica dependen de la morfología del relieve, tipo de suelo, cobertura vegetal, geología e incluso de las prácticas agrícolas. Las principales características son:

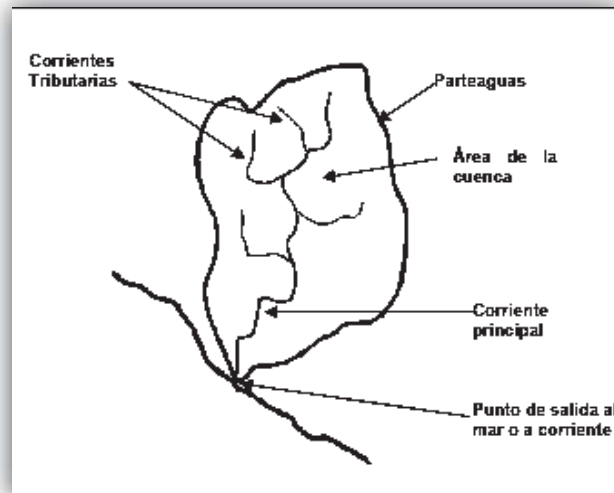


Figura 17. Características principales de una cuenca hidrográfica. Fuente: CENAPRED, 2006.

El *parteaguas* es la línea imaginaria de mayor nivel topográfico (Fig. 17), que separa las precipitaciones que caen en una cuenca, con respecto a las cuencas vecinas. El parteaguas solo cruza al río principal en el punto de salida de la cuenca.

El *área de la cuenca* es la superficie (en proyección horizontal), delimitada por el parteaguas y en donde el sistema de escorrentía, está dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

El *suelo* tiene influencia en el escurrimiento, es importante su naturaleza, su color, su textura, su tipo de vegetación, debido a que entre más impermeable sea el suelo, mayor será la velocidad de la escorrentía.

La morfometría de cuencas hidrológicas nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de la región, indispensables para el manejo y planeación de los recursos naturales.

Es importante mencionar, la *forma de la cuenca*, pues esta se relaciona con el tiempo de concentración y la velocidad de repuesta de la misma (Fig. 18). Dicha relación se evalúa a través de los siguientes índices:

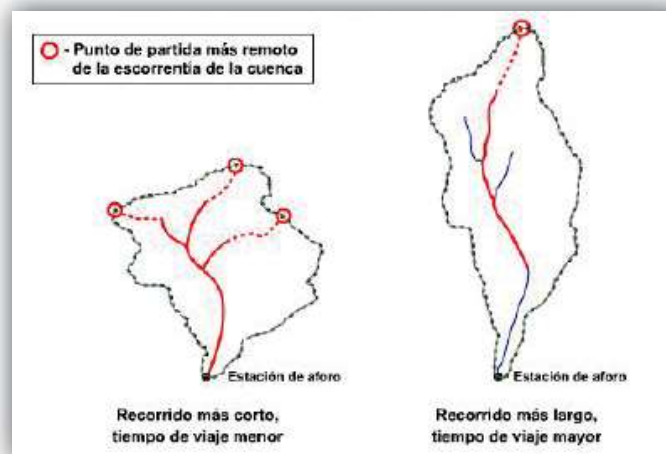


Figura 18. Efecto de la forma de la cuenca en el escurrimiento superficial. Fuente: González, 2009.

Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (K_c). El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano sea a la unidad, lo cual quiere decir que entre más bajo sea K_c , mayor será la concentración de agua.

Factor de forma (K_f). Un valor de K_f superior a la unidad nos proporciona el grado de achatamiento de la cuenca o el acortamiento del río principal. En consecuencia, factores superiores a la unidad reflejan una tendencia alta de la cuenca a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

Las cuencas hidrográficas cuentan con un *sistema de drenaje* que está constituido por el río principal y sus tributarios.

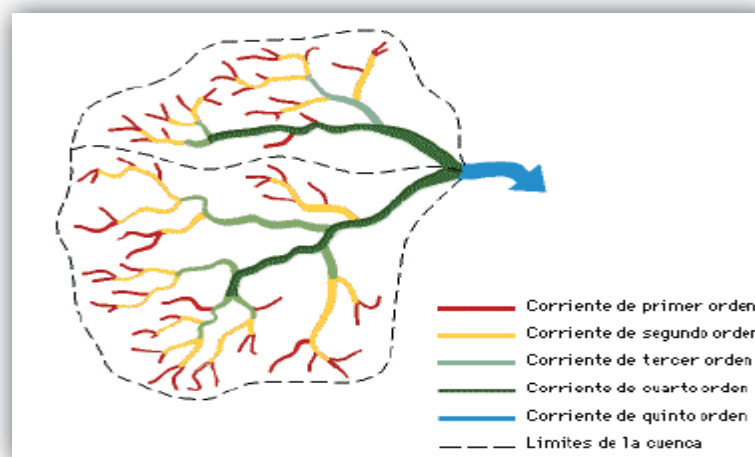


Figura 19. Sistema de drenaje de una cuenca hidrográfica. Fuente: González, 2009.

La *corriente principal* de una cuenca es la que pasa por el punto de salida. Toda cuenca tiene una y solo una corriente principal. Las demás corrientes de este tipo dentro de la cuenca se denominan *corrientes tributarias* (Fig. 19). Es importante notar, que esta definición solo se aplica a cuencas exorreicas.

El orden de corrientes, refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de la cuenca. 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.

Según la clasificación de Horton-Strahler (la más utilizada), las corrientes se clasifican según el esquema siguiente (Fig. 20):

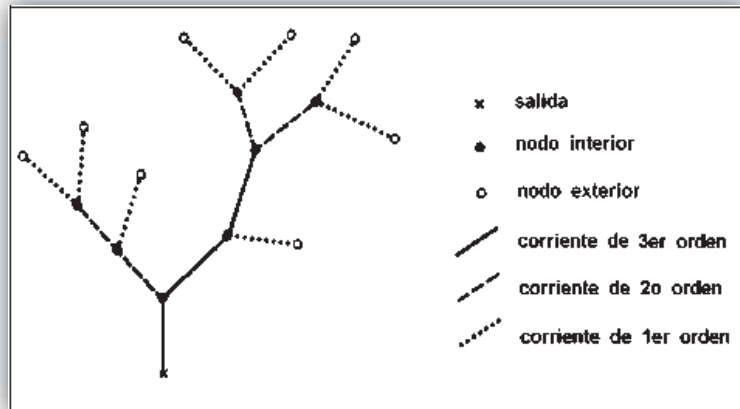


Figura 20. Clasificación de las corrientes de una cuenca, según Strahler. Fuente: CENAPRED, 2006.

Corrientes de 1er orden: tributarios sin ramificaciones. *Corrientes de 2do orden*: cuando tributarios de primer orden se unen. *Corrientes de 3er orden*: cuando dos corrientes de orden 2, se unen, y *corrientes de orden $n+1$* : cuando dos tributarios de orden n se unen. El orden de una cuenca, es el mismo que el de la corriente principal en su salida.

La *densidad de corrientes* (D_s) es otro indicador del grado de bifurcación de la cuenca. Está definida como el número de corrientes por unidad de área. Y la *densidad de drenaje* (D_d). Es la relación entre la longitud total de las corrientes de la cuenca y su área total.

Además dentro de las características que condicionan la velocidad de respuesta de la cuenca se encuentran la pendiente de la cuenca y del cauce principal.

La *pendiente de la cuenca* controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial, del poder de arrastre y erosión sobre la cuenca (Fig. 21).

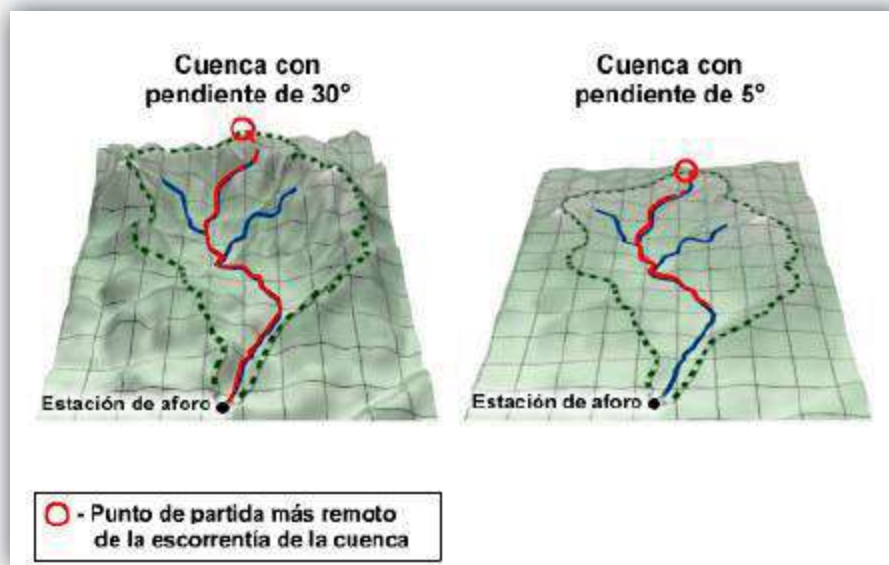


Figura 21. Efecto de la pendiente de la cuenca en el escurrimiento. Una pendiente mayor indica mayor rapidez en la velocidad de concentración y mayor poder de erosión, la línea roja indica el cauce principal; la longitud que alcanzaría el escurrimiento desde el punto más alejado de la cuenca en un mismo tiempo, haciendo notar la rapidez del flujo, entre mayor sea la pendiente. Fuente: González, 2009.

La velocidad de escurrimiento del *cauce principal*, depende en gran medida de su *pendiente*. Se tiene que a mayor pendiente, mayor velocidad de desplazamiento del agua, menor tiempo de concentración y menor infiltración.

Otro parámetro importante es *la curva hipsométrica* que es la representación gráfica del relieve de una cuenca hidrográfica. Representa la variación de la elevación del terreno de la cuenca, con respecto al nivel medio del mar.

II.1.f.- Precipitación.

Puesto que la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y en nuestro caso fuente principal de recurso hídrico sobre la cuenca de estudio, definiremos algunos conceptos concernientes a este trabajo de tesis.

La precipitación, en general son todas las formas de humedad, emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como *lluvia*, granizo, rocío, neblina o nieve (Fig. 22). En la cuenca del río Huahua, la precipitación que se genera, es en forma de lluvia, estas lluvias caen en verano, debido al clima tropical lluvioso de la zona. Dichas lluvias son provocadas por ciclones, que generan tormentas de larga duración, del orden de varios días y abarcan grandes extensiones. Por lo que pueden causar un aumento en el nivel del río y una mayor aportación de agua por parte de las corrientes tributarias y por ende un aumento del volumen en el embalse formado por el dique.

Las medidas características de la lluvia son:

Altura de precipitación o lluvia (hp). Es la altura del agua de lluvia caída y acumulada sobre una superficie plana e impermeable, donde el agua además no pudiera evaporarse, y se expresa generalmente en mm.

Duración. Es el periodo de tiempo en horas, por ejemplo, desde el inicio hasta el final de la precipitación.

Intensidad de precipitación o de lluvia. Es una lámina de lluvia por unidad de tiempo. Y se obtiene de dividir la cantidad de lluvia precipitada y el tiempo de la precipitación, y se expresa en *mm/h*.



Figura 22. El ciclo del agua. La precipitación principal fuente de agua a la superficie terrestre. Fuente: Mora, 2008.

Debido a lo amplio que resulta el tema de la precipitación, solo se mencionaran algunos conceptos más, que son los que competen e interesan a este trabajo.

Es necesario, conocer la cantidad de lluvia que cae en la cuenca de análisis, para ello se recurre a las estaciones pluviométricas, que cuentan con aparatos de registro llamados pluviómetros o pluviógrafos que registran la lluvia puntual, donde se encuentra colocado dicho instrumento. Sin embargo para los cálculos ingenieriles es indispensable conocer la *lluvia media o promedio* en la zona analizada.

Existen varios métodos para la determinación de la precipitación media en una cuenca (método aritmético, polígonos de Thiessen y *método de las isoyetas*), pero para hacer una adecuada estimación, se requiere que dentro de la cuenca o en las cercanías de esta, se cuente con varias estaciones pluviométricas o meteorológicas, que cuenten con registros históricos de lluvia.

De los métodos antes mencionados para la determinación de la precipitación media, el más preciso, es el de las isoyetas ya que considera los aspectos orográficos de la cuenca. Consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan curvas de nivel en topografía. Así entonces una *isoyeta*, es una línea trazada sobre un mapa sinóptico con la que se unen puntos (representación de una estación meteorológica), donde se registra igual cantidad de precipitación.

Una vez, que la precipitación desempeña su papel de influencia sobre la cuenca, aportando agua a la superficie terrestre y alimentando o colmatando las corrientes de esta, sucede que el

caudal o gasto que se conduce por estas corrientes aumenta, elevándose el flujo en el cauce principal y por ende a la salida de la cuenca.

II.1.g.- Esgurrimiento superficial.

Hemos utilizado el término esgurrimiento anteriormente, sin embargo no se ha definido. En hidrología conviene dividir los caminos que toma el agua para llegar a la salida de una cuenca hidrográfica, estos caminos son de tres clases: esgurrimiento superficial, esgurrimiento subsuperficial y esgurrimiento subterráneo (Fig. 23).

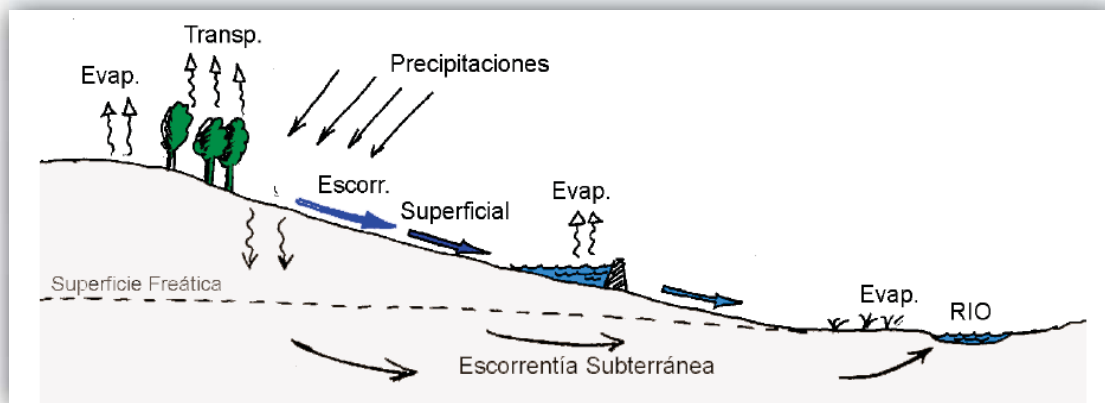


Figura 23. Esquema del esgurrimiento superficial y subterráneo. Fuente: Sánchez, 2004.

El tipo de esgurrimiento que nos compete es el *esgurrimiento superficial*, ya que es el más importante desde el punto de vista de la ingeniería y este no es más que la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre.

El esgurrimiento superficial consta del flujo en la superficie del terreno (*overland flow*) y esgurrimiento en corrientes.

Toda vez que la lluvia alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta saturar las capas superiores de este. Posteriormente, comienzan a llenarse las depresiones del terreno al mismo tiempo que el agua tiende a escurrir sobre la superficie, este fenómeno se presenta entretanto el agua no llegue a cauces bien definidos. El agua en su recorrido a la corriente más próxima sigue infiltrándose y evaporándose en pequeñas cantidades y cuando por fin llega a una corriente se dice que se trata de un *esgurrimiento en corrientes*.

El esgurrimiento superficial es afectado por diversos factores:

✚ Factores climáticos.

Intensidad de precipitación. Entre mayor es la intensidad de precipitación más rápido el suelo colma su capacidad de infiltración, y el esgurrimiento superficial aumenta.

Duración de la precipitación. De manera directamente proporcional entre mayor sea la duración de la precipitación, mayor será la ocurrencia de esgorrentía.

Precipitación antecedente. Una lluvia que ocurre cuando el suelo ya está saturado por un evento de precipitación anterior, tendrá una mayor facilidad de convertirse en esgurrimiento de superficie.

✚ Factores fisiográficos y cobertura vegetal.

Área. La superficie de la cuenca está directamente relacionada con la mayor o menor cantidad de agua de escurrimiento superficial que la cuenca puede generar.

Pendiente. La pendiente de la cuenca es directamente proporcional a la cantidad y velocidad de escurrimiento.

Permeabilidad. Cuanto más permeable sea el suelo mayor será la cantidad de agua que pueda absorber, disminuyendo así el escurrimiento superficial.

Cobertura vegetal. El tipo de cobertura vegetal influye en el escurrimiento. Por ejemplo un bosque denso reduce la cantidad de escurrimiento, pues capta el agua para sus necesidades, en cambio un suelo con escasa vegetación puede retener muy poco el agua, lo que resulta en mayor cantidad de flujo a escurrir.

✚ Factores humanos.

Obras hidráulicas construidas en la cuenca. En el caso que se tenga una presa, por ejemplo, el embalse reducirá los caudales máximos de la escorrentía superficial y retarda su propagación.

Rectificación de ríos. Cuando se rectifica un río, se aumenta la velocidad del escurrimiento superficial en el tramo que ha sido rectificado.

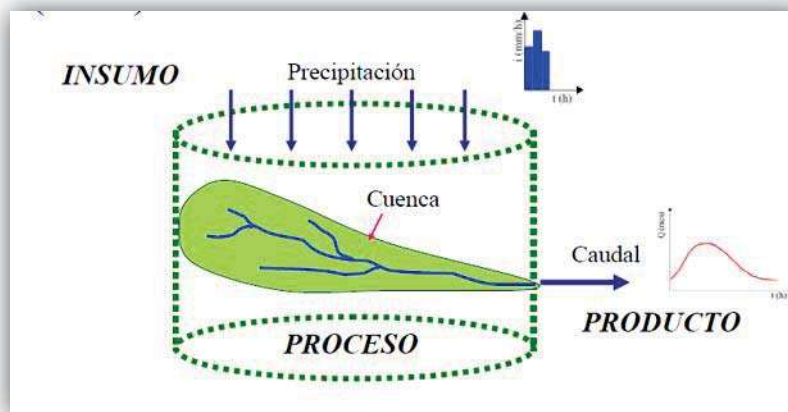


Figura 24. Precipitación-Cuenca-Escorrentamiento (PCE). Fuente: Sisa, 2005.

Coefficiente de escurrimiento. Es la relación entre el volumen de agua total que escurre y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado. En el método racional, que utilizaremos para calcular el gasto líquido, el coeficiente de escurrimiento representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa, y está en función de variables como el tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente de la cuenca intensidad de precipitación, etc., presentados en la cuenca.

A continuación se mencionan otros parámetros considerados en el análisis de la precipitación-cuenca-escorrentamiento (Fig. 24).

Caudal o gasto. Se define como el volumen de escurrimiento superficial por unidad de tiempo, comúnmente se expresa en m^3/s o l/s .

Para el cálculo eficiente del caudal a la salida de la cuenca, debe tomarse en cuenta el *tiempo de concentración*, que es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio en un punto de interés, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. El tiempo de concentración se puede determinar de manera directa. Durante una lluvia intensa se puede colocar un trazador radioactivo de la divisoria de aguas de la cuenca y medir el tiempo. También existen una gran variedad de formulas, sin embargo, no todas son aplicables debido a la necesidad de información que en muchos casos no se tiene.

Debido a que las alturas de precipitación (hp) que se utilizan para el diseño de obras hidráulicas o cálculo de avenidas en ríos están asociadas a distintos periodos de retorno, en función de las medidas de seguridad que se deseen tomar, es conveniente definir que es un periodo de retorno.

El periodo de retorno, es el tiempo promedio, en años en que un determinado evento (en nuestro caso, caudal), es igualado o excedido por lo menos una vez.

II.1.h.- Peligro, vulnerabilidad y riesgo.

Cuando se habla de un dique de deslizamiento, se tiene que hablar del riesgo de colapso, de las zonas afectadas por la inundación, de la vulnerabilidad de las comunidades cercanas, etc.

El *peligro* en el ámbito de la Protección Civil, que es la que nos interesa por el hecho de ser precursores de la seguridad de las personas ante desastres naturales como las inundaciones. Peligro es la idea de cuantificar en términos de probabilidad, la ocurrencia en un lapso dado, de un fenómeno potencialmente dañino para los bienes expuestos.

Cuando se define el peligro, conviene medir su potencial con la “intensidad” ya que la caracterización de un fenómeno está completa si se especifica su intensidad (Ordaz, 1996).

La *vulnerabilidad* es la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador. Por ejemplo de dos bienes expuestos, uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad este sufre mayores daños (Ordaz, 1996).



Figura 25. Comparación de la vulnerabilidad de viviendas ante una inundación. Fuente: CENAPRED, 2004.

El *riesgo* por otra parte, es una combinación de tres factores: el valor de los bienes expuestos (C) la vulnerabilidad (V) y la probabilidad (P) de que ocurra un hecho potencialmente dañino para lo expuesto.

II.2.- Antecedentes históricos.

A lo largo de la historia y en todos los continentes del planeta, se han presentado fenómenos de este tipo, deslizamientos de tierra que forman grandes lagos, lagunas, represas y diques de deslizamiento. Los grandes volúmenes de tierra, roca o hielo que se desprenden de los cerros, montañas o glaciares a menudo caen sobre los cursos de agua obstruyendo el paso de esta, formando diques naturales, los cuales son una amenaza latente, en primera instancia cuando los volúmenes de escombros súbitamente obstruyen el paso del agua, provocando un remansamiento del agua que conlleva a inundaciones aguas arriba del dique afectando poblaciones enteras. Una vez establecido el dique, el peligro se mantiene ya que este puede ceder en cualquier momento debido a la presión del agua y originar grandes olas de descarga que además de agua contienen fragmentos de roca y lodo.

Como se mencionó anteriormente el riesgo ante fenómenos de este tipo es doble y la amenaza de un posible desastre es muchas veces inevitable y repentina.

La formación de presas naturales es común en valles estrechos y empinados bordeados por montañas altas. Grandes volúmenes de tierra, roca o lodo se deslizan y depositan en el pie de ladera, formando depósitos o diques que bloquean el cauce antes de ser movilizados por el caudal del río. Estos diques están compuestas de una masa heterogénea que se encuentra pobremente consolidada o no consolidada, que no posee ningún tipo de filtro o zonas para controlar la presión de poros, por lo que la falla más probable será la de rebalse, seguida de una apertura que se forma como producto de la erosión del material a causa del flujo de agua. La falla también puede producirse por tubificación o erosión interna, debido a la permeabilidad del material que forma la presa, por la cual el ascenso del nivel de agua detrás de la presa fuerza al agua a pasar a través de las partes permeables, guiando la erosión por tubificación (Costa y Schuster 1988).

Se ha visto que no es necesario el incremento del volumen de agua en el río o embalse formado, para que la masa de tierra y rocas que obstruyen el cauce colapse. Aunque en general los diques se rompen cuando el ingreso de agua es mayor que el egreso. Ejemplos de esto se mencionaran en el siguiente recuento de registros de deslizamientos de tierra que forman diques naturales y que han afectado severamente a centros urbanos, pequeñas poblaciones y vías de comunicación.

De los 184 diques de deslizamiento en el mundo (Costa y Schuster, 1988). Se mencionaran los más importantes y de mayor impacto destructivo y socioeconómico, incluyendo los más recientes en México.

OCEANÍA.


-  [Hari, Westland, Nueva Zelanda \(1999\)](#). En octubre de 1999 cerca de 15 millones de metros cúbicos de restos de rocas cayeron del monte Adams, al sur de Hari, Westland, en el desfiladero del río Poerua, formando un dique de 120 m de ancho. Seis días más tarde, el dique colapso (Fig. 26) liberando de forma súbita de 3 a 4 millones de metros cúbicos de agua.



Figura 26. Vista del lago formado en el río Poerua, después de la ruptura del dique. Fuente: West Coast Regional Council, 2002.

EUROPA.

- ❶ **Isére, Francia (1191).** En agosto de 1191, una gran avalancha de grandes rocas y flujo de escombros elevó una pequeña parte del valle de la Romanche (Fig. 27), obstruyendo **el río Isére**, cerca de Grenoble, lo que provocó una elevación de 10 a 15 metros del nivel del agua en el lago, inundando la ciudad de Bourg d' Osians, aparentemente sin causar víctimas. 28 años después, es decir, el 24 de septiembre de 1219, el dique se rompió y unos 340 millones de m³ de agua se precipitaron sobre el valle de la Romanche, la ola de agua y escombros destruyeron los asentamientos a lo largo del valle de la Romanche hasta la ciudad de Grenoble, ubicada a 30 km aguas abajo que fue parcialmente inundada ya que fue construida en una llanura. Los canales de la Romanche y el río Isére fueron desplazados y la inundación fue percibida hasta el mar Mediterráneo. Miles de víctimas fueron reportadas.



Figura 27. Vista de Bourg d' Osians en el Valle de la Romanche. Fuente: Bonnard.

- ❶ **Carintia, Austria (1348).** El 25 de enero de 1348 un significativo terremoto sacudió el macizo Dobratsch (Fig. 28), el cual tiene una elevación de 2000 m y causó el desprendimiento de grandes bloques de rocas, uno de los cuales de aproximadamente 30 millones de m³ de volumen bloqueó 2.5 km del amplio Valle Gail (elevación 500 m). Este valle que corresponde a una falla importante de los Alpes ya había sido afectado por varios desprendimientos de roca, debido a esto varios asentamientos fueron enterrados e inundados aguas arriba, tiempo después el colapso del dique devastó el valle.

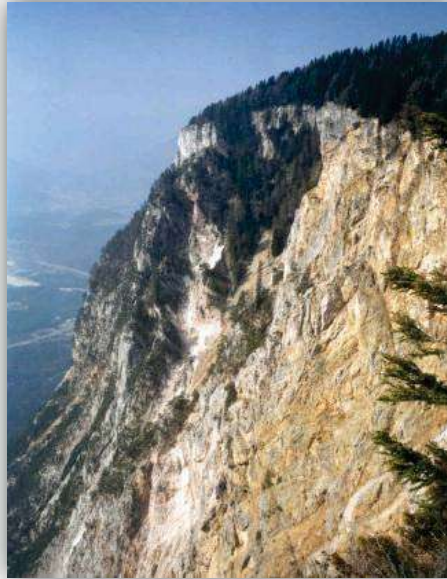


Figura 28. Vista de la parte superior del derrumbe del Dobratsch. Grandes grietas se pueden ver en el bosque, en la parte superior. Fuente: Bonnard.

- ❷ **Biasca, Suiza (1513).** El 30 de septiembre de 1513, un deslizamiento de la empinada ladera occidental del Pizzo Magno (elevación 2329 m) ocasionó el derrumbe de grandes rocas con un volumen de 10 a 20 millones de m³ que bloquearon el valle de El Blenio a 400 metros aguas arriba de la ciudad de Biasca, donde el río Tesino y el río Brenno (que desembocan en el valle Blenio) se fusionan. Este dique de deslizamiento llamado Buzza di Biasca (Bonnard, 2004) primero destruyó varios edificios de las afueras de Biasca y luego creó un lago de 5 km de extensión que alcanzó un volumen de 100 millones de m³ inundando las comunidades de Malvaglia y Semione. Durante casi 20 meses, este lago pareció haberse convertido en una característica permanente del valle, sin embargo el 20 de mayo de 1515 el erosionamiento del dique causó el derrumbe y desbordamiento de la represa. La ciudad de Biasca fue arrastrada así como el valle del Ticino hasta Bellinzona de Locamo y luego hasta el Lago Maggiore para que 600 personas murieran.
- ❸ **Alleghe, Italia (1771).** En 1771, en el límite de los Alpes del Sur, la pronunciada pendiente ocasionó el derrumbe de rocas, con un volumen de 20 millones de m³ que bloquearon el Valle Cordevole, ascendiendo el nivel del agua hasta 50 m en la vertiente opuesta, hecho que destruyó 3 aldeas y cobró la vida de 49 de sus habitantes. Con la formación del Lago de Alleghe (Fig. 29), 5 aldeas fueron inundadas aguas arriba ya que el lago se extendió hasta unos 4 km. El 1 de mayo de 1771 una parte el escarpe principal Cliff se cayó desde una altura de 1000 metros y se sumergió en el

lago causando una ola que se alzó sobre la ladera opuesta. En la aldea cercana de Alleghe dañó la iglesia y mató a tres personas.



Figura 29. Lago de Alleghe con un resort vacacional en el dique de deslizamiento. Fuente: Bonnard.


 **Vajont, Italia (1963).** El 9 de octubre de 1963, el Monte Toc se deslizó (Fig. 30). Más de 260 millones de metros cúbicos de bosque, tierra y roca cayeron sobre la lámina de agua del embalse de la presa Vajont, provocando una ola de 200 metros de altura. Aguas arriba de la presa, una ola de 50 millones de metros cúbicos arrasó los pueblos de Spesse, S. Martino, Patata y El Cristo (municipio de Erto e Casso) y ocasiona 150 muertos. La otra mitad de la ola, con unos 25 millones de metros cúbicos, sobrepasó la pared de la presa y destruyó completamente los pueblos de Longarone, Rivalta, Villanova, Faè y Pirago, con un balance total de 2000 muertos y decenas de heridos (160 aprox.). Un frente de ola de 12 metros de alto llegó hasta la mar recorriendo 40 km agua abajo de la presa, arrastrando varios cuerpos hasta la laguna de Venecia. También aparecieron cuerpos sobre los árboles, en el curso del río Piave hasta cerca de la ciudad de Belluno (16 km aguas abajo de Longarone, 8 km agua abajo de Ponte nelle Alpi).



Figura 30. Se muestra el deslizamiento del Monte Toc, en el valle de Vajont al noreste de Italia. Fuente <http://www.yesano.com/images/Vajont/index.htm>:

AMÉRICA.

- 📍 **Antioquia, Colombia (1970).** El 25 de enero de 1970, en el municipio de Uramita, departamento de Antioquia, ocurrió un deslizamiento (conocido como El Revenidero), los 8 millones de m^3 de material removido durante el evento formaron una presa de 20 metros de altura, 1300 metros de longitud y 250 metros de ancho superior, que represaron el río Sucio formando un embalse que alcanzó una longitud cercana a 6 km y un volumen de 26 millones de m^3 . El colapso final del represamiento produjo un flujo de lodo de carácter torrencial que ocasionó la semidestrucción de las partes bajas del municipio de Dabeiba, incluyendo puentes, carreteras y viviendas. También fueron afectados Pavarandocito, corregimiento de Mutatá, 5 km de la carretera al mar en sector de Dabeiba-Mutatá y zonas cercanas al casco urbano de Uramita.
- 📍 **Mayunmarca, Perú (1974).** El 25 de abril de 1974 en la cabecera de un valle afluente del río Mantaro, llamado Quebrada Ccochacay, que estaba ocupado por varias aldeas, de las cuales la principal es Mayunmarca un derrumbe de rocas gigantescas con un volumen estimado de 1 a $1.3 \cdot 10^9 m^3$ represó el río Mantaro (hasta el 8 de junio) en los Andes Peruanos causando más de 450 víctimas entre muertos y desaparecidos. Entre Tablachaca y el deslizamiento fueron destruidos unos 28 km de la carretera principal a lo largo de la orilla izquierda del río Mantaro, además, varios puentes sobre el Mantaro fueron arrastrados y por lo menos 1264 hectáreas de tierras cultivadas se perdieron. El deslizamiento provocó la formación de unos 130 y 150 m de presa (altura de la cresta) y un lago de 30 km aguas arriba del dique, se estima que el volumen total de agua embalsada fue de unos 670 millones de m^3 . El 6 de junio el agua comenzó a rebosar por encima de la cresta, sin embargo fue hasta el 8 de junio (44 días después del derrumbe) que el dique sufrió la ruptura. Pero gracias a las prontas y bien organizadas acciones de la Defensa Civil, el fenómeno no causó pérdidas humanas, a pesar de la formación de una ola de 20 metros de altura. Este caso corresponde a una de las presas de deslizamiento más grandes del mundo.



Figura 31. Vista aérea del dique de deslizamiento en Mayunmarca, Perú. Fuente: Bonnard.

- 🏰 **San Felipe El Fuerte, Venezuela (1812).** El 25 de marzo de 1812 Un gran deslizamiento represó el río Yurubí, el represamiento duró de 4 a 6 días, toda vez que en la noche del 29 al 30 de marzo cayó un copiosísimo aguacero que provocaron el colapso del dique que obstruían el río, tal ruptura originó una ola de descarga (alud torrencial) que arrasó con la ciudad de San Felipe El Fuerte, dejándola totalmente destruida.
- 🏰 **Provincia del Azuay, Ecuador (1993).** Después de un largo periodo de intensa lluvia, un gran derrumbe de rocas con un volumen de 20 a 30 millones de m³ se produjo durante la noche del 29 de marzo de 1993 en La Josefina, aguas abajo de la ciudad de Cuenca, Ecuador, el represamiento del río Paute así como un pequeño afluente llamado río Jadán, causaron la muerte de 80 personas. El deslizamiento formó una presa de 1 km de longitud, un ancho de 600 metros y una altura en la parte más baja de 95 metros. Durante los 33 días que duró la crisis originada por el deslizamiento, se formaron dos lagos como consecuencia del embalsamiento de los ríos Cuenca y Jadán. En los últimos días, ambos lagos se unieron llegando a almacenar alrededor de 200 millones de m³ de agua, anegando aproximadamente 1000 hectáreas de tierras fértiles y zonas habitadas, además de varios puentes y tramos de carreteras.



Figura 32. Vista del dique de deslizamiento La Josefina meses después de la ruptura. Fuente: Bonnard.

- 🏰 **Alberta, Canadá (1939-1995).** Se tienen registrados 5 casos de diques de deslizamiento en el Río Paz en el oeste de Alberta Central, aunque no se tienen registrados grandes daños materiales es importante mencionarlos, ya que nos demuestra lo recurrentes que suelen ser estos eventos. En junio de 1990, se presentó un deslizamiento en el río Eureka (tributario del río Paz), la superficie de ruptura fue un deslizamiento de fase glaciolacustre que se extendió debajo del lecho del río, originando un dique de unos 20 o 25 metros de altura. También en junio de 1990 en el río Saddle se reactivó un deslizamiento de sedimentos glaciolacustres, causando que el lecho del río se desplazara 60 metros al sur y dio origen a un dique de deslizamiento tipo 6 (Costa y Schuster, 1988). El derrumbe de Hines Creek fue reactivado en 1990, tal deslizamiento causó una represa de 25 m y un lago de 1.5 a 1.7 km de largo. En abril de 1939 ocurrió un deslizamiento sobre el río Montagneuse, lo que provocó un dique tipo 6 y un lago temporal de 4 km. La reactivación de un deslizamiento de tierra en julio de 1995, provocaron 4 obstrucciones en el río Spirit, el dique con mayor altura cuenta con entre 8 y 10 metros de altura.

- ❶ **Sierra de las Minas, Guatemala (1998).** Como resultado del Huracán Mitch a principios de noviembre de 1998, ocurrieron dos grandes deslizamientos de tierra a lo largo del río La Lima, río arriba del pueblo de Jones. Ambos deslizamientos estaban compuestos de roca y escombros de pendiente inclinada. El menor de los deslizamientos formó un dique en el río La Lima, dicho dique tiene una altura de cresta de aproximadamente 50 metros sobre el nivel anterior del río, un volumen estimado de 500000 m^3 y una ladera río abajo con una pendiente aproximada de 30° . El volumen total del dique y su sedimento y agua embalsadas es como de $700,000 \text{ m}^3$. Por lo tanto, si el dique fallara catastróficamente, el río tiene un gradiente lo suficientemente inclinado y hay suficiente agua y sedimento/escombros en el embalse, para causar un gran flujo de escombros que podría alcanzar las afueras de la poblada aldea de Jones, como 4 km río abajo.




Figura 33. Dique de deslizamiento de tierra en el río La Lima, viendo río arriba (norte) desde un punto a 4 km al norte de Jones; fotografía tomada el 25 de enero del 2000. Fuente: Schuster, Bucknam, Mota, 2001.

- ❶ **Chiapas, México (2007).** El 4 de noviembre de 2007 ocurrió un deslizamiento en la ladera derecha del río Grijalva, en el Estado de Chiapas, entre las presas de Peñitas y Malpaso. Este fenómeno ocasionó que se obstruyera el cauce del río y se formaran una serie de olas de hasta 15m de altura que arrasaron con el poblado Juan de Grijalva, municipio de Ostuacán. El material deslizado formó un tapón de 800 metros de longitud por 200 metros de ancho, impidiendo el paso del flujo. Se calcula que en el movimiento se desplazaron cerca de 50 millones de m^3 de los cuales 15 millones de m^3 formaron el dique. El deslizamiento provocó entre 16 y 30 muertos, y la inundación desarrollada por el dique afectó a cerca de 3600 personas de 21 comunidades próximas al río Grijalva. Por el tipo de inestabilidad y la magnitud del cuerpo desplazado, este deslizamiento es considerado como el más importante ocurrido en la historia reciente de México (Hernández-Madrigal, et al, 2010).



Figura 34. Vista del deslizamiento que obstruyó el río Grijalva. Fuente: Arvizu, 2009.

-  **Huahua, municipio de Aguila Michoacán (octubre 2008).** El 03 de octubre del 2008 un gran cuerpo de tierra y rocas se desprendió del cerro La Hujera, y provocó un tapón parcial en el río Huahua. La profundidad en el embalse alcanzó los 35 metros y el vaso alcanzó más de 3.5 km de largo. El embalse inundó por completo la comunidad de la Hujera, donde el agua llegó hasta los techos de las casas. Ante este suceso unos 350 habitantes de las poblaciones de El Herradero, La Huahua y La Hujera desalojaron sus hogares. Dos días después, un nuevo deslizamiento terminó por formar el dique. La deposición de este último evento provocó un incremento en la altura del dique y en consecuencia en el nivel de inundación. Se registró la inundación de una escuela y viviendas ubicadas aguas arriba del dique.



*Figura 35. Dique de deslizamiento formado por el derrumbe del cerro La Hujera.
Fuente: <http://www.oem.com.mx/elsoldemexico/notas/n878386.htm>*

En síntesis, en cuanto a los antecedentes descritos, podemos decir que los diques formados por deslizamiento presentan los siguientes efectos que construyen la amenaza:

- 1) Las represas pueden durar muy poco o mucho tiempo pero al final siempre colapsan, por lo que la amenaza general no disminuye y más bien se incrementa con el tiempo.
- 2) Causan dramáticas consecuencias en caso de falla, a una gran distancia aguas abajo y aguas arriba.
- 3) Cuando el área de drenaje del valle represado es grande, el embalse no dura mucho tiempo.
- 4) Los deslizamientos de tierra aparte de provocar remansamiento y obstrucción de cauces, puede enterrar poblaciones al momento de su formación.
- 5) Es devastador el efecto de la avalancha, después del desprendimiento del embalse.

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

III.1.- Materiales.

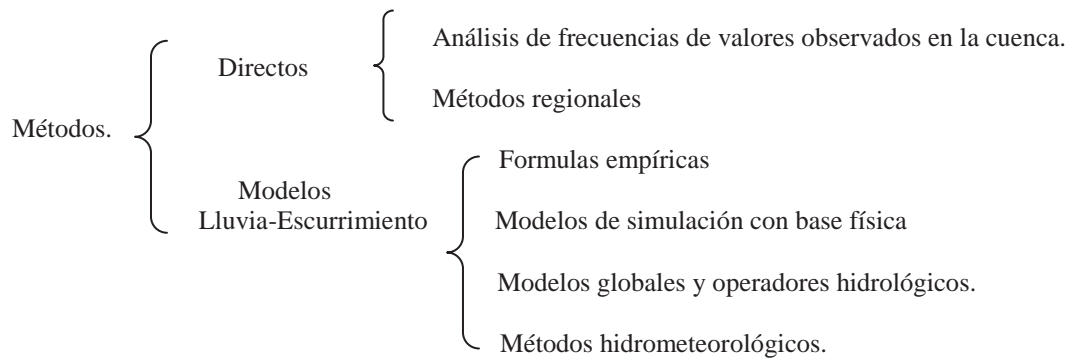
El equipo y materiales que se utilizaron para el análisis y realización de este trabajo fueron los siguientes:

- ✚ Modelo Digital de Elevaciones (MDE), de la zona de estudio, con una resolución de 30m, delimitado por el recuadro de coordenadas $102^{\circ}48'41.75''$, $103^{\circ}07'42.29''$ de latitud oeste y $18^{\circ}05'38.90''$, $18^{\circ}33'34.35''$ de latitud norte.
- ✚ Carta geológico-minera E13-B77, escala 1:50,000.
- ✚ Mapas temáticos de uso y tipo de suelo, escala 1:1, 000,000 para el estado de Michoacán, tomados vía internet de la página de CONABIO (Comisión Nacional de Biodiversidad).
- ✚ Mapas de isoyetas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de la República Mexicana.
- ✚ Imágenes de satélite, tomadas del Google Earth.
- ✚ Estación total, marca Leica, modelo TC400L
- ✚ GPS tipo SIG, marca Magellan con precisión submétrica mediante corrección WAAS.

II.2.- Método.

El escurrimiento a la salida de una cuenca, se considera como la suma de una fase líquida (agua) y una fase sólida (sedimentos). Para el caso de este trabajo nos interesa determinar el escurrimiento en el embalse formado por el dique de deslizamiento, de igual manera consideraremos un gasto líquido y un gasto sólido.

Cuando se desea conocer el gasto de salida en una cuenca, se puede acudir a registros de estaciones de aforo para obtener el gasto que pasa por una sección determinada en caso de tormentas extraordinarias por ejemplo, sin embargo cuando la cuenca carece de estas estaciones se recurre a otros métodos para obtener el escurrimiento (gasto). Se han desarrollado varios métodos para analizar la relación lluvia-escurrimiento. Según Farías (2005), tenemos:



Dentro de los métodos más representativos y que más se adaptan al medio mexicano están: los métodos de envolventes, la fórmula racional y el hidrograma unitario.

Es importante hacer mención que para determinar el gasto pico o de diseño, como primeras alternativas deben considerarse métodos de:

- a) *Análisis estadístico de frecuencia de caudales máximos, en el caso de existir una estación hidrológica cercana a la zona de estudio con información histórica suficiente.*
- b) *Métodos estadísticos de carácter regional de los valores máximos de lluvia o de crecidas según metodologías de regionalización de precipitación o caudales.*
- c) *Aplicación de un modelo de simulación hidrometeorológico lluvia-escorrentía.*

Sin embargo debido a que la cuenca del río Huahua no se encuentra instrumentada, además de no haber estaciones cercanas que con su información pudieran facilitarnos el cálculo del escurrimiento, y que las estaciones hidrométricas relativamente más cercanas, tienen registros deficientes (ver figura 38), se recurrirá a un método empírico como lo es el método racional para calcular el escurrimiento en el embalse originado por el dique. En este trabajo, diversas variables que requiere el método racional fueron obtenidas mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y reconocimientos de campo.

La metodología que se aplicó para el cálculo del caudal máximo, es la que a continuación se describe:

La determinación de la mayoría de las características morfométricas de la cuenca, en mayor medida se obtuvieron a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente con los programas ArcView 3.1 (extensiones, *Spatial Analyst*, Cartografía de Erosión, *Hydro Tools 1.0*, entre otras), Global Mapper y Google Earth.

En primer lugar, el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se proyectó a la zona UTM 13 (108°W-102°W-Northern Hemisphere) con ayuda del programa Global Mapper, para después ser exportado al programa ArcView 3.1.

Una vez en ArcView 3.1, y con ayuda de la extensión *Hydro Tools 1.0* se hizo una corrección del modelo, de tal manera que se eliminaron las depresiones que no producen escorrentía y así evitar errores de cálculo en la acumulación de la corriente, además de que se corrigieron los

sumideros y áreas planas. Posteriormente, con ayuda de las extensiones Cartografía de Erosión, *Spatial Analyst*, *Hydrologic Modeling v1.1*, *3D Analyst* y la misma *Hydro Tools 1.0*, así como el programa Microsoft Office Excel 2007, se determinaron los parámetros hidrológicos de la cuenca, como: área, perímetro, desnivel altitudinal, orden de corrientes, número de escurrimientos, longitud del cauce principal y pendiente de la cuenca. Además de parámetros morfométricos como: coeficiente de forma, índice de alargamiento, coeficiente de compacidad, coeficiente de masividad, densidad de drenaje y elevación media de la cuenca.

Tabla 2. Parámetros morfométricos calculados para la cuenca Huahua.

Parámetro	Descripción	Formula
Coficiente de forma (K_f)	Propuesto por Gravelius, se refiere a la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca	$K_f = \frac{B}{L}; B = \frac{A}{L}$ $\therefore K_f = \frac{A}{L^2}$
Índice de alargamiento (I_a)	Propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal, y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente.	$I_a = \frac{L_m}{H_m}$
Coficiente de compacidad (K_c),	Propuesto por Gravelius, es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual al de la cuenca hidrográfica.	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$
Coficiente de masividad (K_m)	Representa la relación entre la elevación media y la superficie de la cuenca.	$K_m = \frac{h}{A}$
Densidad de drenaje (D_d)	Relación entre la longitud total de las corrientes de agua de la cuenca y su área total.	$D_d = \frac{L_t}{A}$

Tabla 3. Significado de las variables de los parámetros morfométricos.

K_f	Coficiente de forma, adimensional
B	Ancho medio de la cuenca, en km. Se obtiene al dividir el área por la longitud axial de la cuenca hidrográfica
L	Longitud axial de la cuenca, en km. Ésta se mide siguiendo el río principal desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca.
A	Área de la cuenca, en km^2 .
I_a	Coficiente de alargamiento, adimensional
L_m	Longitud máxima en la cuenca, en km
H_m	Ancho máximo en la cuenca, en km
K_c	Coficiente de compacidad, adimensional
P	Perímetro de la cuenca, en km
h	Elevación media de la cuenca, en m
D_d	Densidad de drenaje en km/km^2 .
L_t	Longitud de corrientes efímeras, perennes e intermitentes, en km.

La elevación media de la cuenca se obtuvo a partir del MDE, calculando el promedio de las elevaciones de los píxeles o celdas que integran al MDE delimitado por el parteaguas.

Una vez caracterizada la cuenca, se procedió a calcular el escurrimiento a la salida de la cuenca, que en este caso es el punto donde se encuentra el dique. Para ello como ya se mencionó se utilizó la fórmula racional, la cual considera que el gasto máximo o pico

(liquido), se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración.

La formula racional es:

$$Q_p = 0.278 * C * i * A$$

Donde:

Q_p es el gasto máximo o de pico, en m^3/s .

C es el coeficiente de escurrimiento, representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa.

i es la intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h

A es el área de la cuenca, en km^2 .

El coeficiente de escurrimiento, es sin duda el parámetro más difícil de determinar y la variable menos precisa del método racional. Así que se analizaron minuciosamente varias de las tablas que proponían coeficientes de escurrimiento para el método, y se revisaron las características físicas de la cuenca, para encontrar la mejor relación. De esta manera, con la información disponible sobre la cuenca y las variables que consideraban las tablas, se concluyó que se utilizaría la tabla de coeficientes de escurrimiento, propuesta por Chow (1994) (Tabla 4). Ya que en esta tabla, el coeficiente de escurrimiento está en función de las características de la superficie (uso de suelo y pendiente), y el periodo de retorno.

La importancia del periodo de retorno radica en que está asociado con la intensidad de la precipitación, es decir, un periodo de retorno pequeño significa intensidad de lluvia bajo y por ende poca erosión y mayor infiltración y un periodo de retorno alto indica una intensidad de lluvia fuerte, mayor erosión del suelo y menor infiltración.

Tabla 4. Coeficientes de escurrimiento para el método racional (Tomada de Chow 1994).

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre</i> (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

La intensidad media de la lluvia que utiliza el método racional debe ser para un tiempo igual al tiempo de concentración.

El tiempo de concentración se puede determinar de manera directa, durante una lluvia intensa, se puede colocar un trazador radioactivo en la divisoria de aguas de la cuenca y medir el tiempo. Pero también existen una gran variedad de formulas, sin embargo no todas son aplicables a nuestro caso debido a la información con que se dispone, además se tiene que cuidar que el resultado sea razonablemente aceptable.

Al analizar alrededor de 8 formulas tales como la formula de Kirpich (la más usada para el método racional, en México), la formula de la instrucción de carreteras 5.2-IC (formula de Temez), la formula de Bransby y Williams (Pigrim y Cordery, 1993), la fórmula del California Culverts Practice, la formula de Hathaway, la fórmula de la Federal Aviation Administration, la formula de la velocidad del SCS (Soil Conservation Service), y la formula de George Rivero (Monsalve, 2000). Se determinó que la fórmula de la Federal Aviation Administration daba resultados aceptables, además de que consideraba, (aparte de la longitud del cauce principal y su pendiente) el coeficiente de escurrimiento, el cual es función del periodo de retorno (ver tabla4). Con esta consideración se obtendrían gastos líquidos pico, donde el tiempo de concentración y coeficiente de escurrimiento estarían en función de los periodos de retorno considerados.

La fórmula del Federal Aviation Administration, se expresa como:

$$t_c = 1.8(1.1 - C) \frac{L^{0.5}}{S^{0.333}}$$

Donde:

t_c es el tiempo de concentración, en minutos

C es el coeficiente de escurrimiento del método racional.

S es la pendiente de la superficie, en %.

L es la longitud del cauce principal, en pies.

Para obtener la pendiente media de la superficie de la cuenca que se necesita en la fórmula anterior, se recurrió al MDE. Una vez delimitado el parteaguas con ayuda del programa ArcView 3.1, con este mismo, se convirtió a formato ráster con las mismas propiedades del MDE original. Después con la extensión Spatial Analyst con la función *derive slope* se obtuvo el mapa de pendientes de la cuenca (Fig. 36), y uno de los datos que arroja el mapa de pendientes es la pendiente media en grados, cuyo valor se transformó en porcentaje y decimales.

Cabe señalar, que también se determinó la pendiente media de la cuenca con los métodos tradicionales tales como: el método de Alvord, el método de Horton y el método de Nash. Tales métodos arrojaron los siguientes resultados:

Se tomó el valor arrojado por el SIG, puesto que es más preciso en el cálculo, ya que toma la pendiente de cada pixel (30x30 m) y calcula el promedio de las pendientes, dentro del área de la cuenca.

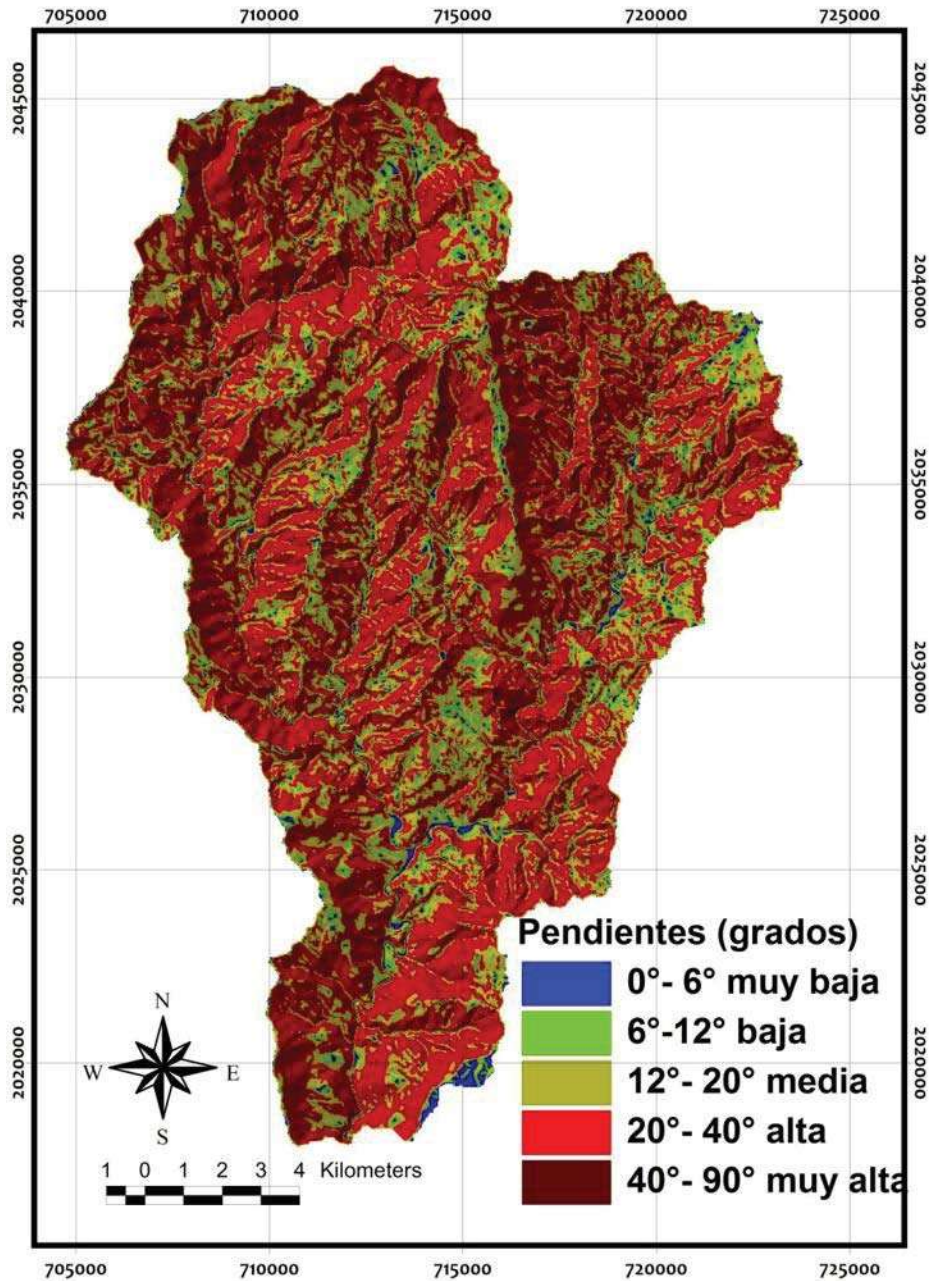


Figura 36. Mapa de pendientes de la cuenca del río Huahua. Nótese que prevalecen las pendientes altas con valores de 20 a 40°.

Tabla 5. Resultados de los métodos usados para el cálculo de la pendiente de la cuenca.

Método	Alvord	Horton	Nash	SIG
Pendiente (decimales)	0.42	0.29	0.42	0.40
Pendiente (%)	42	29	42	40

La pendiente del cauce principal es un parámetro importante para determinar el grado de respuesta de una cuenca. Para su obtención se utilizó el método de Taylor y Schwarz (Fig. 37), por medio de la formula:

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

Donde:

S es la pendiente media del cauce principal.

L es la longitud del cauce principal, en metros.

m es el numero de segmentos en que se divide el cauce principal.

l_m es la longitud horizontal de los tramos en que se subdivide el cauce principal.

S_m pendiente de cada segmento en que se subdivide el cauce principal.

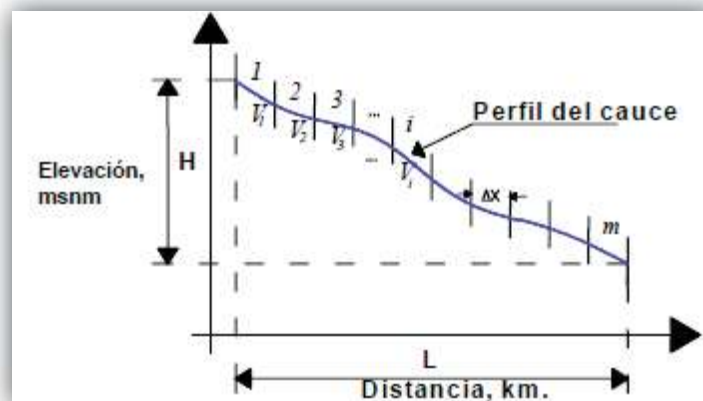


Figura 37. Método de Taylor y Schwarz. Fuente: CENAPRED, 2006.

Una vez determinado el tiempo de concentración, se procedió a calcular la intensidad media de la lluvia. Como se ha mencionado, la falta de registros y de estaciones hidrométricas cercanas (Fig. 38) en la cuenca es inminente. La precaria información de las estaciones hidrométricas más cercanas a la cuenca, nos limitó la elaboración de isoyetas para nuestro parteaguas. Por la razón anterior fue que se acudió a mapas de isoyetas asociados a diferentes periodos de retorno, para obtener laminas de lluvia para duraciones de 1 y 24 horas (ver anexo II). Estos mapas de isoyetas fueron tomados de la **Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Hidrometeorológicos**. Elaborada por el CENAPRED (noviembre, 2006).



Figura 38. Ubicación de las estaciones hidrométricas más cercana a la cuenca en estudio (Est. 16236 en Aguililla, est. 16217 en Lázaro Cárdenas y est. 16208 en Aquila)

Primeramente, con ayuda del programa Global Mapper se georreferenciaron la totalidad de los mapas, para después con el mismo programa importar en archivo *shp* el parteaguas de la cuenca, para obtener su ubicación exacta dentro de los mapas, y así determinar el valor de la isoyeta más cercana a la cuenca (Fig. 39). Las isoyetas nos proporcionan el valor de altura de precipitación para un periodo de retorno y duración de la lluvia determinados.

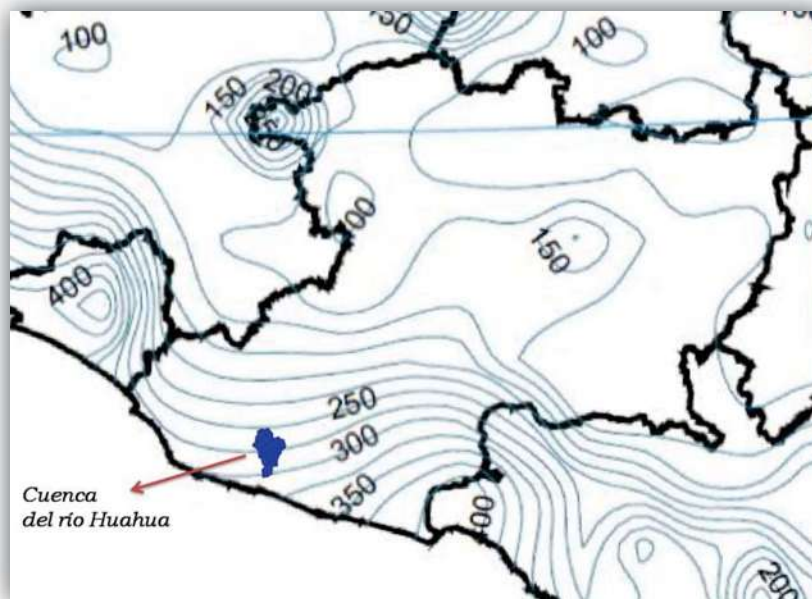


Figura 39. Recorte del mapa de isoyetas para la República Mexicana con periodo de retorno de 50 años y duración de 24 horas que muestra la ubicación de la cuenca en el mapa de isoyetas. Se muestra la ubicación exacta de la cuenca del río Huahua.

Según el valor del tiempo de concentración (t_c) se realizó una interpolación, entre los valores de la lamina de lluvia (hp) para una duración de 24 horas y 1 hora, para cada uno de los periodos de retorno considerados (2, 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años). Con los logaritmos de la duración de 1 hora y de 24 horas y la lámina de lluvia leída en los mapas de isoyetas y con ayuda de la ecuación de la línea recta, se obtiene el valor de la lámina de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración.

Ecuación general de la recta: $y = mx + b$

Pendiente de la recta: $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$

Al realizar un cambio de variables en la ecuación general de la línea recta, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$hp(t_c) = \frac{hp(24) - hp(1)}{\ln(24) - \ln(1)} * \ln(t_c) + hp(1)$$

Es decir, la lámina de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración es igual a la diferencia de las laminas de lluvia de una duración de 24 horas y de 1 hora, dividida entre la diferencia de los logaritmos naturales de 24 y 1 horas; multiplicado por el logaritmo natural del tiempo de concentración, mas la lamina de lluvia para una duración de 1 hora.

Finalmente, i se obtiene como:

$$i = \frac{hp(t_c)}{t_c}$$

Donde:

i es la intensidad de lluvia para un tiempo igual al tiempo de concentración, en mm/hr.

$hp(t_c)$ es la lamina de lluvia para el tiempo de concentración, en mm.

t_c es el tiempo de concentración, en horas.

Para determinar el gasto sólido, se utilizó la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS) (Wischmeier, 1978) desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, como método para identificar áreas con susceptibilidad a ser erosionadas, así como para obtener una tasa de pérdida de suelo a largo plazo. La cual se expresa:

$$E = 0.224 * R * K * LS * C * P$$

Donde:

E es el índice de erosión (kg/m^2) por evento (año, tormenta, etc.)

R es el índice de erosividad asociado a la lluvia en el sitio (adimensional).

K representa la erosionabilidad del suelo, la cual es función del tipo de suelo (adimensional).

LS es el factor que asocia la pendiente y longitud del cauce principal (adimensional).

C factor que toma en cuenta la cobertura vegetal (adimensional).

P factor que toma en cuenta las obras de protección contra erosión que existen en la zona (adimensional).

Factor R. conocido también como “factor de la precipitación”, expresa el efecto de erosividad por lluvia en un área (Fig. 40). Y se obtuvo con la siguiente expresión (CENAPRED, 2006):

$$R = 0.00576i^2(1.213 + 0.3865 \ln(i))$$

Donde:

i es la intensidad de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración.

Ya que la intensidad de lluvia está en función del tiempo de concentración y este en función del coeficiente de escurrimiento, y como se tiene un C para cada periodo de retorno, entonces también se obtuvieron valores de R , para cada periodo de retorno.



Figura 40. Impacto de una gota sobre suelo desnudo.

(Fuente: Manual de conservación de suelos y agua. Río Grande do Sul. Secretaría de Agricultura). La erosión por gotas de lluvia incrementa con la intensidad de la lluvia. Una suave y prolongada lluvia puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa.

Factor K. Expresa la vulnerabilidad por erosión hídrica de un suelo, es decir, representa el efecto de las propiedades y características del perfil del suelo, en la pérdida de este. El factor K se determinó con la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores del factor K. Fuente: CENAPRED, 2006.

Tipo de suelo	Factor K
Macizo Rocoso	0
Roca disgregada (100 < ϕ < 500 mm)	0.05
Gravas (3.5 < ϕ < 100 mm)	0.1
Arena gruesa (2.4 < ϕ < 3.5 mm)	0.2
Arena mediana (1.22 < ϕ < 2.4 mm)	0.23
Arena fina (0.075 < ϕ < 1.22 mm)	0.26
Arena limosa	0.30
Arena arcillosa	0.33
Limo arenoso	0.36
Arcilla arenosa	0.40
Limo	0.45
Arcilla	0.50

Para conocer el suelo que existe en la cuenca, se utilizó un mapa temático de tipos de suelo elaborado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para el estado de Michoacán, dicho mapa se elaboró con cartografía que ofrece el Consejo Nacional de Biodiversidad (CONABIO) y se encuentra en el documento Datos Fisiográficos del Estado de Michoacán.

Primero, con ayuda del programa Global Mapper georreferenciamos el mapa de tipos de suelo del estado, para después abrir nuestro parteaguas ya georreferenciado y ubicarlo exactamente en el mapa, después con el ArcView 3.1, se elaboraron los polígonos para cada tipo de suelo (Fig. 41).

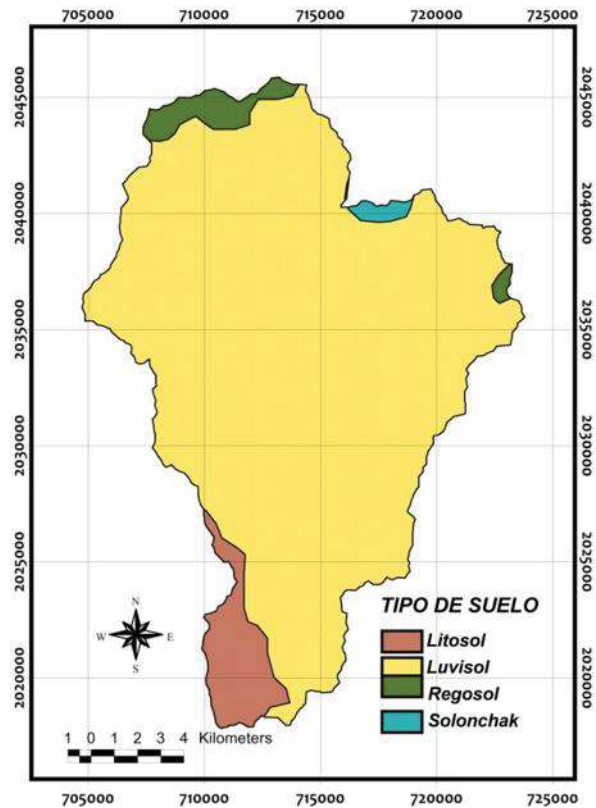


Figura 41. Mapa de tipo de suelo en la cuenca del río Huahua, modificado de SAGARPA. Poco más del 91% de la superficie de la cuenca, es suelo Luvisol.

La erosionabilidad del suelo, es una propiedad compleja, se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento durante una lluvia o por flujo superficial.

Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena.

Factor LS. También llamado “factor topográfico”, establece el aporte que hace el relieve a la erosión hídrica. Para su cálculo se utilizó la ecuación establecida por Wischmeyer y Smith, y modificada por la FAO (1977).

$$LS = \left(\frac{l}{22.1} \right)^m (0.065 + 0.04536S_p + 0.0065S_p^2)$$

Donde:

l es la longitud del cauce principal, en metros.

M es un factor que depende del valor de la pendiente.

S_p es la pendiente media del cauce principal, en %.

Y m , se selecciona con el siguiente criterio:

$$m=0.5, \text{ si } S_p \geq 5\%$$

$$m=0.4, \text{ si } 3\% \leq S_p \leq 5\%$$

$$m=0.3, \text{ si } 1\% \leq S_p \leq 3\%$$

$$m=0.2, \text{ si } S_p \leq 1\%$$

Ya que la pendiente del cauce principal es del 3%, m se tomó igual a 0.3.

Factor C. Este factor indica la capacidad de la vegetación para disminuir la fuerza erosiva. Y se determinó de la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores del factor C. Fuente: CENAPRED, 2006.

Cobertura vegetal en porcentaje (%)	Factor C
Bosques bien definidos ($\geq 97\%$)	0.02
$80\% \leq$ Cobertura vegetal $\leq 96\%$	0.2
$60\% \leq$ Cobertura vegetal $\leq 79\%$	0.3
$40\% \leq$ Cobertura vegetal $\leq 59\%$	0.4
$16\% \leq$ Cobertura vegetal $\leq 39\%$	0.5
$5\% \leq$ Cobertura vegetal $\leq 15\%$	0.6
Suelo desnudo $\leq 4\%$ de la cobertura vegetal	1.0

Para conocer la cobertura vegetal de la cuenca, se utilizaron imágenes de satélite del Google Earth, con las cuales se formó un mosaico (debidamente georreferenciado) dentro del cual se ubicó el parteaguas de la cuenca, y utilizando el ArcView 3.1 se elaboró un mapa de la cobertura vegetal en la cuenca, con el que se determinó el porcentaje de vegetación y de suelo desnudo, esto para la elección del factor C.

Factor P. Este factor cuantifica el impacto de las prácticas de protección contra erosión. Y se obtuvo de la siguiente tabla:

Tabla 8. Valores para el factor P. Fuente: CENAPRED, 2006

Tipos de obra de control de erosión	Factor P
Cuando más del 90 % de las laderas de la cuenca tienen terrazas	0.1
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 61 % y 90 %	0.2
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 41 % y 60 %	0.3
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 21 % y 40 %	0.4
El área de las laderas que tiene terrazas está entre 6 % y 20 %	0.5
Reforestación más del 90% del área de la cuenca	0.2
50 % < reforestación < 90%	0.3
30 % < reforestación < 49%	0.4
5 % < reforestación < 29%	0.5
Si existen presas de gaviones en las barrancas de la cuenca	0.3
Si existen desarenadores en las localidades a la salida de la cuenca	0.35
Si no existen obras de control de erosión en toda la cuenca	1.0

En la visita de campo que se hizo al área de estudio, se notó que la cuenca no cuenta con obras de control contra erosión, sin embargo la cuenca tiene una alta vegetación en las laderas (reconocido en campo y por imágenes de satélite del Google Earth), lo que se podría tomar de la tabla anterior como una reforestación de más del 90 % del área de la cuenca. Por esa razón el valor de P se consideró igual a 0.2.

El índice de erosión (E) calculado será un indicador de la concentración de sedimentos (C_s), que transporta el cauce.

Para calcular C_s : si el valor de E es mayor que 30, entonces C_s será igual a 0.6, y si E es menor que 30, se sustituye en la siguiente ecuación:

$$C_s = 0.00063E^2$$

Con los valores calculados del gasto líquido (Q_p) y la concentración de sedimentos (C_s), se calculó el gasto total que escurre sobre el cauce al final de la cuenca, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q_T = \frac{Q_p}{1 - C_s}$$

Donde:

Q_T es el gasto total que escurre sobre el cauce al final de la cuenca, en m^3/s .

Q_p es el gasto líquido, en m^3/s .

C_s es la concentración de sedimentos, adimensional.

Una vez determinado el gasto total, se calculó el gasto sólido, de la siguiente manera:

$$Q_s = Q_T - Q_p$$

Ya que se calculó el gasto total que circula por el cauce principal, se procedió a determinar el área hidráulica requerida para que el gasto circule adecuadamente sin desbordar.

Para obtener el área hidráulica permisible, se utilizó la ecuación de continuidad para el gasto, de la cual se despejó el área, de la siguiente forma:

$$v = \frac{Q}{A}; A = \frac{Q}{v}$$

Donde:

Q es el gasto total, en m^3/s .

v es la velocidad media del flujo, en m/s .

A es el área hidráulica requerida, en m^2 .

Y la velocidad se determinó como:

$$v = \frac{L}{3600 * t_c}$$

Donde:

L es la longitud del cauce principal, en m .

t_c es el tiempo de concentración, en horas.

Una vez calculado el gasto máximo de salida y las áreas hidráulicas requeridas, se procedió a caracterizar la inundación provocada aguas arriba por el dique-deslizamiento de La Huahua. Para esto, se tomaron en cuenta elevaciones de inundación registradas por los damnificados, observaciones directas en campo, y altitudes del MDE.

Del MDE y con el programa ArcView 3.1 se obtuvieron curvas de nivel a cada metro, con esta información se observó (en la zona del dique) que la cota en el fondo del río era de 98 msnm y la elevación tomada al nivel del espejo de agua con el GPS, el día de la visita fue de 115 msnm. Pero además, pudimos notar en el risco frente al depósito del dique, la marca que dejó el nivel que alcanzó el tirante de agua. Dicha marca estaba aproximadamente 2 metros por encima del nivel del lago en ese momento. Con esto se dedujo que el nivel alcanzado por el agua durante la obstrucción del río fue de 117 msnm. Con base en lo anterior, se ubicaron las curvas 98 hasta la 117, con lo que se conformó el área inundable, es decir el área inundada es la delimitada por la curva de nivel 117.

A través de los programas Global Mapper y ArcView 3.1, las curvas de nivel inferidas en el dique-deslizamiento se unieron a las curvas de inundación (98 a 117) obtenidas del MDE y se convirtieron en polígonos. El área de cada polígono fue obtenida con ayuda del programa ArcView.

Considerando que cada polígono representa una curva cerrada de un metro de variación altitudinal, a partir de la base de inundación de 98m y hasta la máxima de 117m. Se pudo calcular el área y volumen de inundación aguas arriba del dique-deslizamiento. Este cálculo permitió simular la inundación ocasionada por el deslizamiento el 4 de octubre de 2008.

Considerando que el deslizamiento activo continuará aportando material al dique, y este incrementará su espesor se tendría un escenario crítico de inundación aguas arriba del deslizamiento. Este escenario también se simuló con base en los cálculos de área-volumen de inundación.

Un aspecto medular en el desarrollo de este trabajo, y que es parte de la hipótesis del mismo, estribó en inferir el colapso probable del dique-deslizamiento a partir de la relación de las características geométricas y lito-estructurales de éste con el escurrimiento superficial. Para lo anterior, se determinó a partir del MDE y puntos GPS obtenidos en campo, la sección actual del cauce obstruida por el dique (vista en perfil). Los gastos calculados en el análisis hidrológico para distintos periodos de retorno, requieren de un área hidráulica necesaria para darles paso, entonces en la sección del río se determinó el nivel que alcanzaría el agua para cada gasto, es decir, se verificó si era suficiente el área hidráulica para dar desalojo a dicho escurrimientos. Con base en lo anterior, y observaciones hechas en campo en relación a geometría, litología y tamaño de los bloques que conforman el dique-deslizamiento, se realizó una evaluación cualitativa de la probabilidad de colapso de éste último.

Finalmente, para determinar el escenario y probable afectación por inundación aguas abajo del dique-deslizamiento, se compararon las secciones hidráulicas requeridas por los diferentes gastos calculados, con respecto a las secciones hidráulicas reales tanto de los bordos longitudinales construidos por Protección Civil, en la comunidad El Herradero, como la sección hidráulica del puente Huahua.

IV. GASTO HIDRÁULICO MÁXIMO EN EL DESLIZAMIENTO LA HUAHUA.

IV.1.- Características físicas de la cuenca Huahua.

De acuerdo con los resultados obtenidos podemos clasificar a la cuenca del río Huahua como grande (según la clasificación del CENAPRED, 2006). Con una superficie de 28,769 hectáreas, presenta una forma más o menos irregular y moderadamente alargada o achatada (Figura 42), lo que nos indica que es una cuenca con una evacuación rápida del flujo. La dirección de flujo del río principal es predominantemente N-S, en correspondencia con el alargamiento de su cuenca. El sistema de escurrimiento superficial constituye un patrón de drenaje de tipo dendrítico con buen desarrollo particularmente en los sectores norte y noreste de la cuenca.

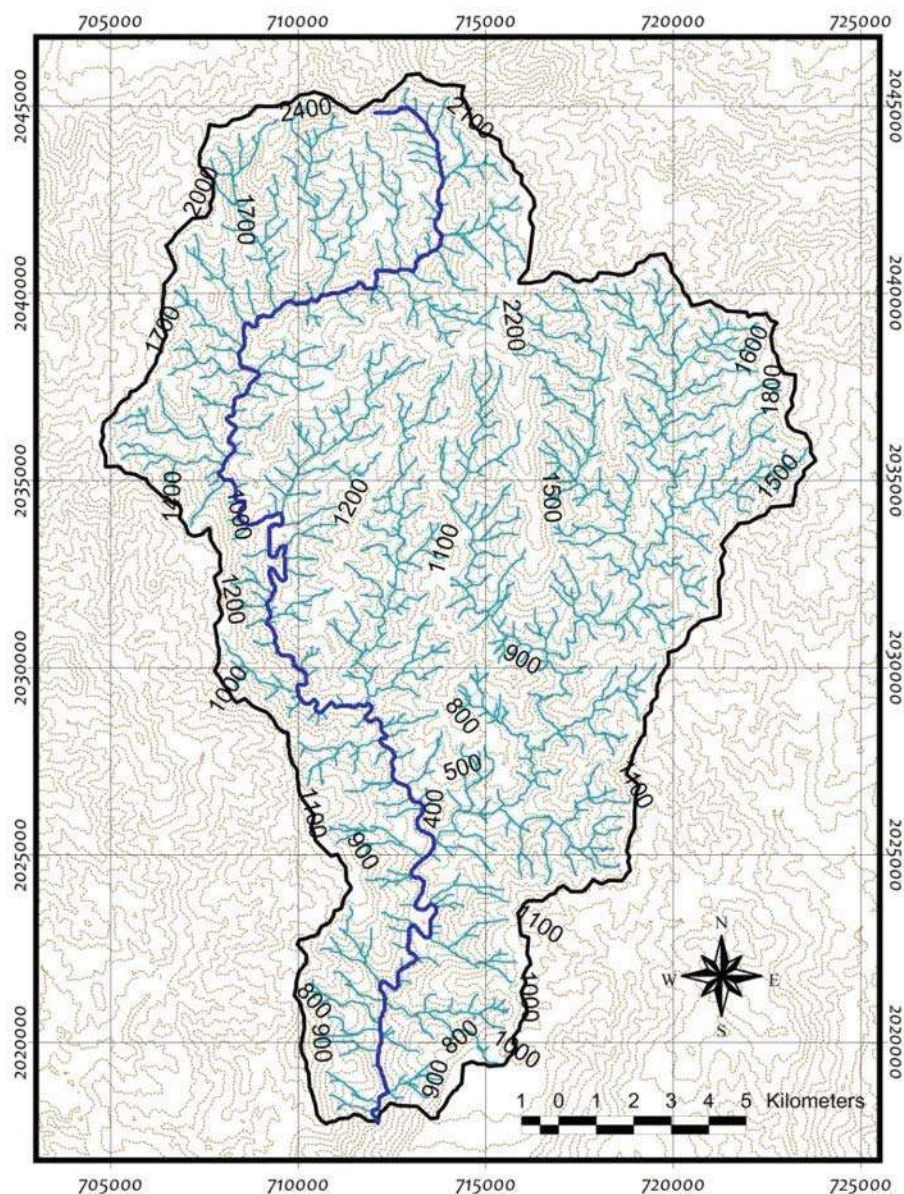


Figura 42. Cuenca del río Huahua, Aquila Mich. Se puede observar la topografía del terreno (curvas de nivel a cada 100 m), el río principal y las corrientes tributarias de la cuenca.

Con base en la geometría de la cuenca Huahua y propiedades intrínsecas a su geología, tipo y uso de suelo; se obtuvieron índices y parámetros morfométricos (Tabla 9) que permiten una mejor descripción física de ella.

Tabla 9. Índices y parámetros morfométricos de la cuenca del río Huahua.

Morfometría	Resultado	Clasificación
Area (km ²):	287.69	Grande
Perimetro (km):	89.82	-
Longitud cauce principal. (km):	48.95	Largo
Ancho medio cuenca (km):	10.29	-
Pendiente media cuenca:	0.4	Moderada a fuerte
Elevacion media (msnm):	1378	Alta
Altitud minima (msnm):	83	-
Altitud maxima (msnm):	2678	-
Desnivel altitudinal(msnm):	2595	Alto
Coficiente de forma(Kf):	0.37	Moderadamente achatada
Coficiente de compacidad (Kc):	1.48	Oval redonda a oval oblonga
Indice de alargamiento (Ia):	1.47	Moderadamente alargada
Coficiente de masividad (Km):	4.79	Muy montañosa
Orden de corrientes:	7	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	2.21	Media
Numero de escurrimientos:	1608	Alto
Densidad de corrientes (corrientes/km ²):	5.59	Alta
Pendiente del cauce principal:	0.03	Suave
Sinuosidad del cauce principal:	1.78	Moderada

Como puede observarse en la figura 42 y parámetros de la tabla 9. El relieve en la cuenca es muy abrupto lo que se refleja en su pendiente media, esta es del 40%, lo que es un indicador de la rapidez con que se concentra el agua de lluvia en los lechos fluviales, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando la velocidad del escurrimiento superficial.

El desnivel altitudinal nos da cuenta de la variación climática en la cuenca (ver figura 4), por lo que existen diversidad de ecosistemas y una variación en la precipitación y temperatura.

La curva hipsométrica (Figura 43), además de proporcionarnos la elevación media y mediana de la cuenca, nos da el porcentaje de área acumulada igualada o excedida para una cota determinada. En este caso el 32% del área se encuentra por encima de la altura media y podemos interpretar que se trata de un río maduro desarrollado en una cuenca con pocos valles y cumbres escarpadas, por lo que es susceptible a presentar inestabilidad de ladera o deslizamientos en sus bordos.

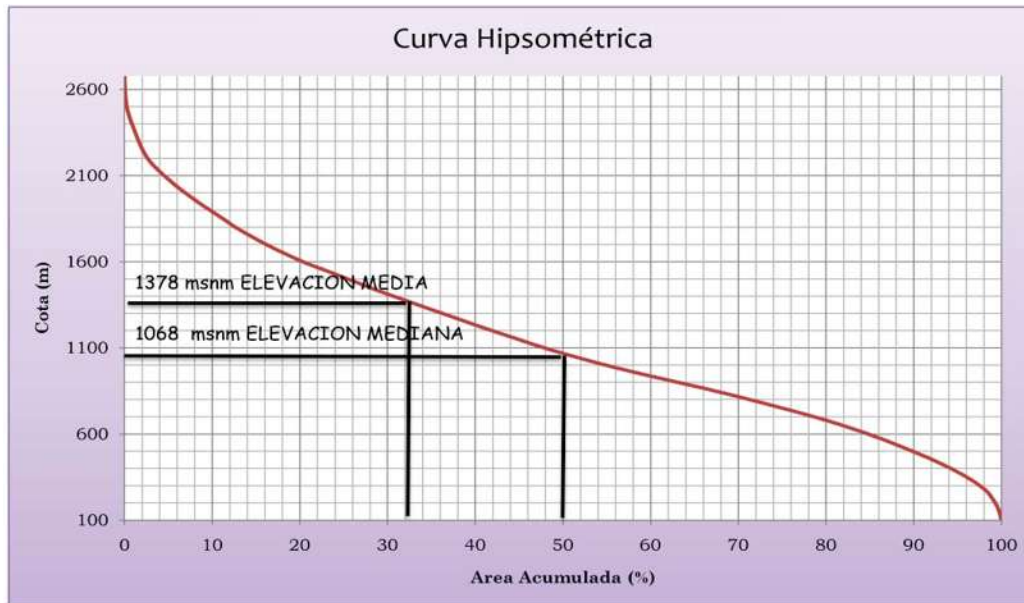


Figura 43. Curva hipsométrica de la cuenca del río Huahua.

En cuanto a su sistema de drenaje (Fig.42), la cuenca tiene un alto grado de bifurcación y de corrientes lo que se refleja en su alto valor en la densidad de drenaje y de corrientes, lo que indica un muy buen drenaje de la cuenca. Además del cauce principal, podemos mencionar que es moderadamente sinuoso y largo, con una pendiente baja (Fig. 44), lo cual se reflejará en un mayor tiempo de concentración.

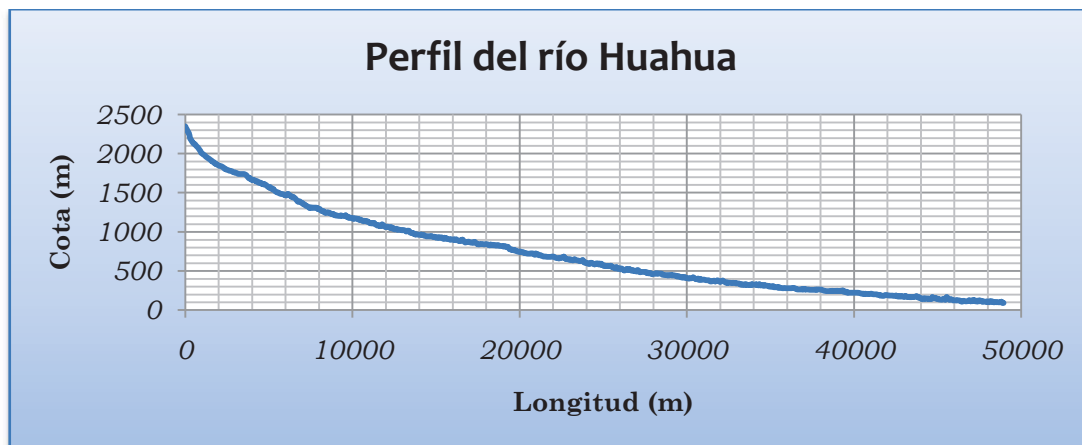


Figura 44. Perfil del cauce principal.

IV.2.- Cálculo del escurrimiento (Método racional).

✚ Coeficiente de escurrimiento.

Debido a que la superficie de la cuenca del río Huahua se compone en su mayoría de bosque de pino-encino y selva, y la pendiente media de la superficie es del 40%, se utilizaron los coeficientes encerrados por el recuadro en la tabla 4, para distintos periodos de retorno.

Los valores obtenidos para el coeficiente de escurrimiento que utiliza la fórmula racional, en función del periodo de retorno son:

Tabla10. Coeficientes de escurrimiento para el método racional.

COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO USADOS EN EL METODO RACIONAL							
Periodo de retorno (años):	2	5	10	25	50	100	500
Coeficiente de escurrimiento:	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58


 *Altura de precipitación para diferentes periodos de retorno.*

Como ya se mencionó anteriormente en cualquier análisis hidrológico, la precipitación juega un papel fundamental y en gran medida es causa de avenidas súbitas, desbordamiento de ríos y por consecuencia de inundaciones.

Para obtener las láminas de lluvia para los distintos periodos de retorno, y calcular la intensidad de lluvia necesaria y obtener el gasto líquido con la fórmula racional, se utilizaron los mapas de isoyetas proporcionados por el CENAPRED, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla11. Láminas de lluvia para duraciones de 1 y 24 horas, para distintos periodos de retorno en la cuenca.

Láminas de lluvia		
Duración		
Tr	1 h	24 h
(años)	hp(mm)	hp(mm)
2	45	95
5	78	150
10	105	210
25	115	240
50	135	275
100	150	300
250	165	350
500	170	375
1000	180	390
2000	190	400

 *Tiempo de concentración.*

Aplicando la fórmula del Federal Aviation Administration, se computaron los siguientes resultados:

Tabla 12. Tiempos de concentración para cada periodo de retorno analizado.

Federal Aviation Administration			
Tr	C	tc (min)	tc (hrs)
2	0.35	158.38	2.64
5	0.39	149.94	2.50
10	0.41	145.71	2.43
25	0.45	137.27	2.29
50	0.48	130.93	2.18
100	0.52	122.48	2.04
500	0.58	109.81	1.83

Las intensidades de lluvia, para cada tiempo de concentración fueron:

Tabla 13. Resultados de la intensidad de lluvia.

Tr (años)	Duración		ln tc	hptc (mm)	i (mm/h)
	1 h <i>hp(mm)</i>	24 h <i>hp(mm)</i>			
2	45	95	0.971	60.27	22.83
5	78	150	0.916	98.75	39.52
10	105	210	0.887	134.32	55.31
25	115	240	0.828	147.55	64.50
50	135	275	0.780	169.37	77.62
100	150	300	0.714	183.68	89.98
500	170	375	0.604	170.00	92.89

✚ *Cálculo del gasto máximo de salida.*

Con la ayuda de una tabla en Excel para simplificar operaciones y facilitar el cálculo del gasto líquido máximo, se obtuvieron estos resultados:

Tabla 14. Gasto máximo líquido.

Tr (años)	Duración		hp tc (mm)	i (mm/h)	C <i>adimensional</i>	A cuenca (km ²)	Qp (m ³ /s)
	1 h <i>hp(mm)</i>	24 h <i>hp(mm)</i>					
2	45	95	60.27	22.83	0.35	287.69	639.14
5	78	150	98.75	39.52	0.39	287.69	1232.58
10	105	210	134.32	55.31	0.41	287.69	1813.58
25	115	240	147.55	64.50	0.45	287.69	2321.21
50	135	275	169.37	77.62	0.48	287.69	2979.71
100	150	300	183.68	89.98	0.52	287.69	3742.13
500	170	375	170.00	92.89	0.58	287.69	4308.73

La tabla siguiente muestra los valores de los coeficientes que intervienen en la Formula Universal de Pérdida de Suelos, para el cálculo del factor de erosión.

Tabla 15. Valores de los factores que intervienen en la FUPS.

Factor	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
R=	7.27	23.69	48.70	67.65	100.46	137.67	147.32
K=	0.4						
C=	0.02						
LS=	2.575						
P=	0.2						

Nótese que el factor R toma distintos valores, puesto que está en función de la intensidad de lluvia la cual es distinta para cada periodo de retorno.

El criterio que se tomó para determinar el factor K, es que poco más del 91% se trata de suelo luvisol crómico (ver figura 41), suelo que se caracteriza por tener un enriquecimiento de arcilla (Fig. 45) con pequeños porcentajes de arena, esto se corroboró en la visita a la zona de estudio, haciendo pruebas “in situ” del suelo. De acuerdo a lo anterior, de la tabla 6 se tomó como tipo de suelo: **arcilla arenosa**.

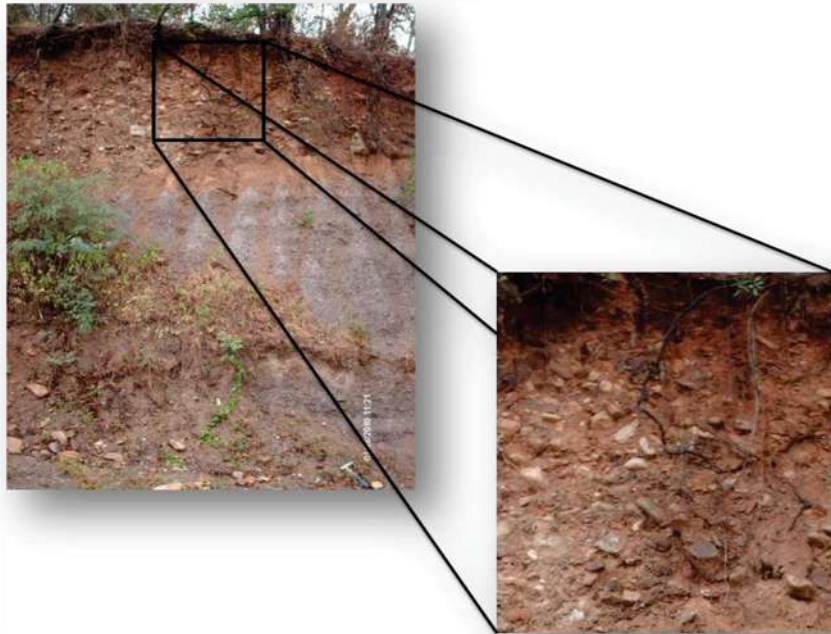


Figura 45. Tipo de suelo existente en la cuenca del río Huahua.

Debido a que poco más del 96% de la cuenca (ver figura 46), se encuentra cubierta por vegetación, compuesta por bosques bien definidos de pino y encino, además de selva, y las partes de suelo descubiertas corresponden a pastizales, estratos rocosos o agricultura de temporal se consideró el factor *C* igual a 0.02.

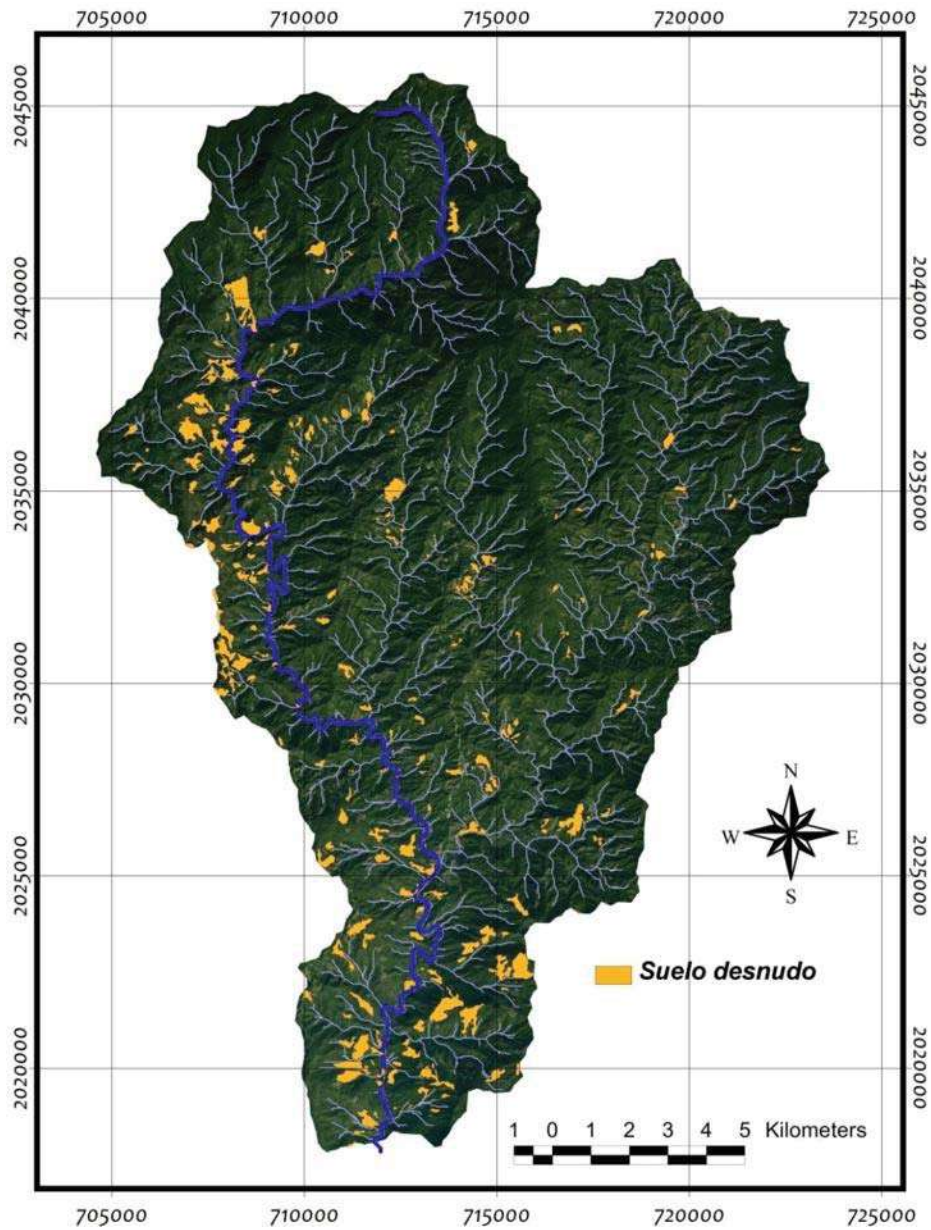


Figura 46. Mapa que muestra la cobertura vegetal en la cuenca.

Una vez obtenidos el factor de erosión (E) y la concentración de sedimentos (C_s), se calculó el gasto total (Q_T) con el cual, al restarlo al gasto líquido (Q_p) se obtuvo el gasto sólido (Q_s).

Tabla 16. Gasto solido.

Tabla 17. Resultados del gasto total máximo en el dique de deslizamiento.

Tr	1 h	24 h	hp tc	i	C	A cuenca	Qp	E	Cs	Qs	Qt
(años)	hp(mm)	hp(mm)	(mm)	(mm/h)	adimensional	(km ²)	(m ³ /s)	kg/m ²	adimensional	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2	45	95	60.27	22.83	0.35	287.69	639.14	0.006711	2.8376E-08	1.81E-05	639.14
5	78	150	98.75	39.52	0.39	287.69	1232.58	0.021862	3.0111E-07	0.000371	1232.58
10	105	210	134.32	55.31	0.41	287.69	1813.58	0.044937	1.2722E-06	0.002307	1813.58
25	115	240	147.55	64.50	0.45	287.69	2321.21	0.062423	2.4549E-06	0.005698	2321.22
50	135	275	169.37	77.62	0.48	287.69	2979.71	0.092699	5.4137E-06	0.016131	2979.73
100	150	300	183.68	89.98	0.52	287.69	3742.13	0.127036	1.0167E-05	0.038047	3742.17
500	170	375	170.00	92.89	0.58	287.69	4308.73	0.135939	1.1642E-05	0.050163	4308.78

De la tabla anterior podemos decir que el gasto sólido es pequeño, lo cual se constató en campo, ya que el agua del cauce principal es cristalina (Fig. 47). Y el gasto total a la salida de la cuenca, es decir, en el embalse que forma el dique para un periodo de retorno de 100 años, sería de casi 4 millones de litros por segundo, volumen bastante grande como para provocar un desbordamiento del río o la ruptura del dique, cuestiones que se analizarán más adelante.

Puede notarse también, índices de erosión relativamente pequeños, pues la cuenca está cubierta por una espesa vegetación, aunque cuenta con pendientes muy pronunciadas. Los gastos líquidos con valores relativamente grandes, concuerdan con las alturas de precipitación y la gran extensión de la cuenca.



Figura 47. Apariencia del agua en el río Huahua (baja concentración de sedimentos). Esta imagen muestra además, el punto de desborde en el dique-deslizamiento del actual cuerpo de agua.

V. CARACTERIZACIÓN DE LA INUNDACIÓN PROVOCADA POR EL DESLIZAMIENTO.

V.1.- Deslizamiento La Huahua.

La inundación en la comunidad de La Hujera, en el municipio de Aquila, fue originada por el emplazamiento del cuerpo de un dique de deslizamiento, en el cerro La Hujera (Fig. 48), el día 4 de octubre de 2008. Con base en la clasificación de Varnes (1978), este deslizamiento se clasifica de tipo traslacional, debido a que el desplazamiento del cuerpo inestable es hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. El factor que detonó este deslizamiento es aún incierto, sin embargo, es posible que se encuentre relacionado con la sismicidad frecuente de la región. Por otra parte, estudios en proceso consideran que una deformación lenta y continua desarrollada en lutitas en la base de la ladera, favoreció el fracturamiento y colapso de rocas cristalinas subyacentes (calizas y conglomerados de calizas) ubicadas en la cima de la ladera.



Figura 48. Deslizamiento traslacional del Cerro La Hujera, conocido como deslizamiento La Huahua. Se puede observar la parte deslizada del cerro.

En cuanto a la geometría del deslizamiento (Fig. 49), se tiene que cuenta con las siguientes dimensiones: desnivel de 780m comprendido entre el pie y corona del deslizamiento, ancho de 200 y 450m en el depósito y corona, respectivamente del deslizamiento, y finalmente longitud total de 1,400 m. El depósito del deslizamiento que conformó el dique, se encuentra constituido por una mezcla de bloques de calizas de hasta 10m de diámetro, bloques menores de calizas y conglomerados, así como detritos, gravas y limos formados a partir de los niveles de lutitas.

Con base en lo anterior y con la geometría de la ladera, podemos asegurar que los factores que condicionaron la inestabilidad se encuentran en la litología frágil e intemperizada que conforma el cuerpo de la ladera, así como la gran elevación y pendiente de ésta última.

Es muy importante hacer mención, que este deslizamiento se encuentra en un **estado activo**, lo cual significa que, no se descarta la posibilidad de que se siga aportando material al dique hasta ahora formado.

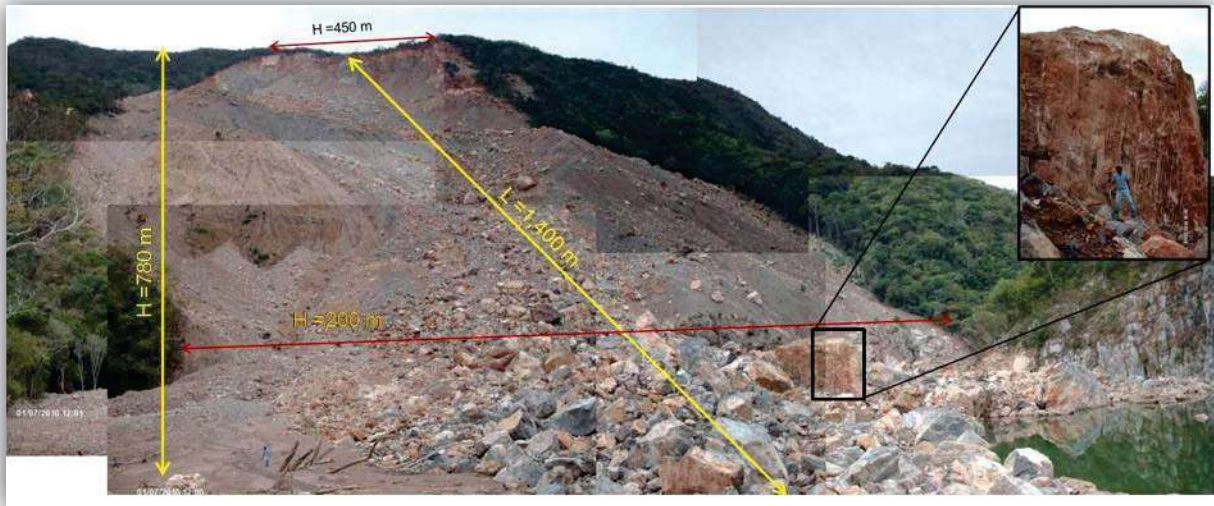


Figura 49. Geometría del deslizamiento.

V.2.- Polígono de inundación.

Las rocas y sedimentos que cayeron ladera abajo y conformaron el depósito (dique), obstruyeron el paso del flujo en el río generando el remansamiento del agua, la magnitud de este fue la de alcanzar un tirante de aproximadamente 19 m por encima del nivel normal del cauce y una longitud de inundación aguas arriba de más o menos 2 km.

La inundación provocada por el dique-deslizamiento de La Huahua, quedó definida por un polígono de 202,400.52 m² (20.24 Has), (Figs. 50 y 51), y un cuerpo de agua de aproximadamente 1, 833,038.65 m³. Estos datos de acuerdo a cálculos realizados en este trabajo, con herramientas de SIG, hojas de cálculo de Excel y AutoCAD 2008.

Este análisis resulta muy interesante, pues se puede ver (gráficamente) la longitud que alcanzó el remanso, provocado por el tapón, instantes después del deslizamiento del cerro.

Cabe mencionar que el remanso, pudo haber tomado una mayor longitud, hacia aguas arriba, sin embargo, lo importante es hacer notar, que la dimensión del polígono de inundación fue tal, que llegó hasta el poblado de la Hujera; el cual fue totalmente inundado.

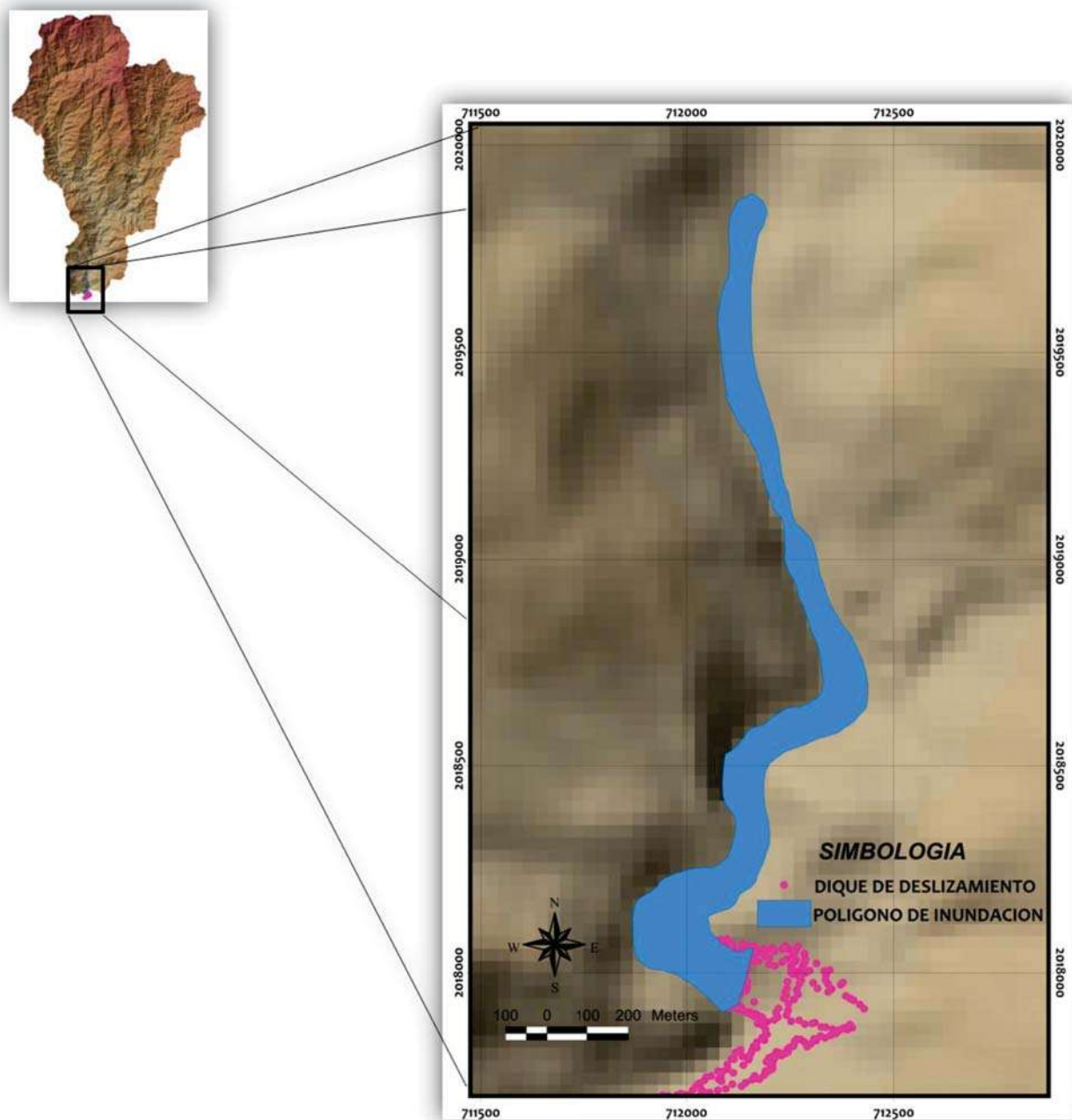


Figura 50. Polígono de inundación provocado por el deslizamiento. Los puntos rosas (levantados con el GPS) representan el contorno del depósito del deslizamiento. El remanso fue tal que alcanzó al poblado de la Hujera inundándolo por completo.

V.3.- Volumen de inundación.

Con la topografía de la zona, obtenida a partir del MDE, se observó que la cota más baja en el embalse es de 98 msnm, lo que nos dice que la elevación del nivel de agua fue de 19 metros, ya que la cota que alcanzó el tirante cuando se formó el tapón fue de 117 msnm. Con información de las áreas delimitadas por cada curva de nivel y su cota, obtuvimos la grafica de la figura 52, que muestra la variación del volumen de agua, con respecto a la elevación del terreno. Esta grafica es importante porque nos da idea de la magnitud de la inundación que se tendría si el dique fuera de una mayor elevación. Situación que no está alejada de la realidad debido al constante depósito del material, gracias al estado activo del deslizamiento.

Por ejemplo, si se presentara el deslizamiento de la parte inferior de la ladera y el dique alcanzara la cota de 166 msnm, aguas arriba se formaría un cuerpo de agua de aproximadamente 30 millones de m³. Con consecuencias bastante severas tanto para las poblaciones asentadas por debajo de esa altura topográfica, como para las poblaciones localizadas aguas abajo, debido a la alta probabilidad de colapso del dique.



Figura 51. Vista del lago formado por el dique. Se puede notar algunos fragmentos de rocas en el embalse, lo que indica poca profundidad del embalse actualmente. Fotografía tomada el 7 de enero del 2010

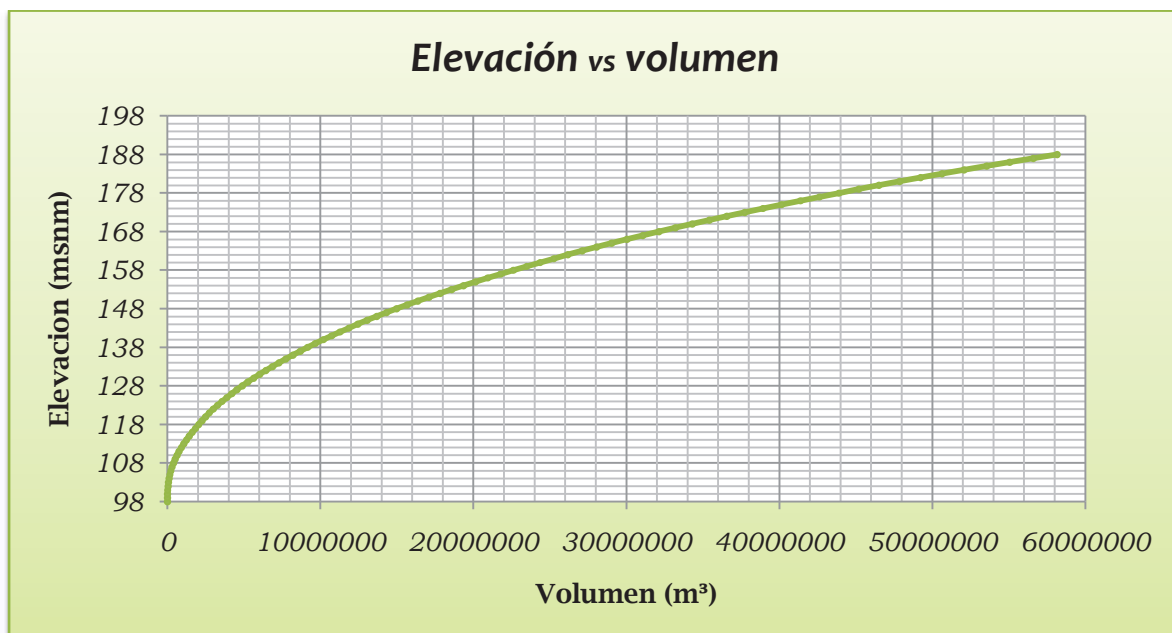


Figura 52. Gráfica de la variación del volumen embalsado con respecto a la elevación.

V.4.- Afectación.

La inundación provocada por el dique-deslizamiento afectó a 56 personas del poblado La Hujera, constituyendo ésta la afectación directa. El nivel de la inundación llegó hasta los techos de casas, escuela e iglesia de dicha comunidad. Debido a que los muros de las construcciones fueron hechos con adobe, el reblandecimiento de éste último a consecuencia de la inundación provocó el colapso de la estructura. Por otra parte, también fueron afectadas varias hectáreas de cultivos, bosques de selva baja y vegetación riparia. En la siguiente imagen se puede observar el alcance de la inundación.

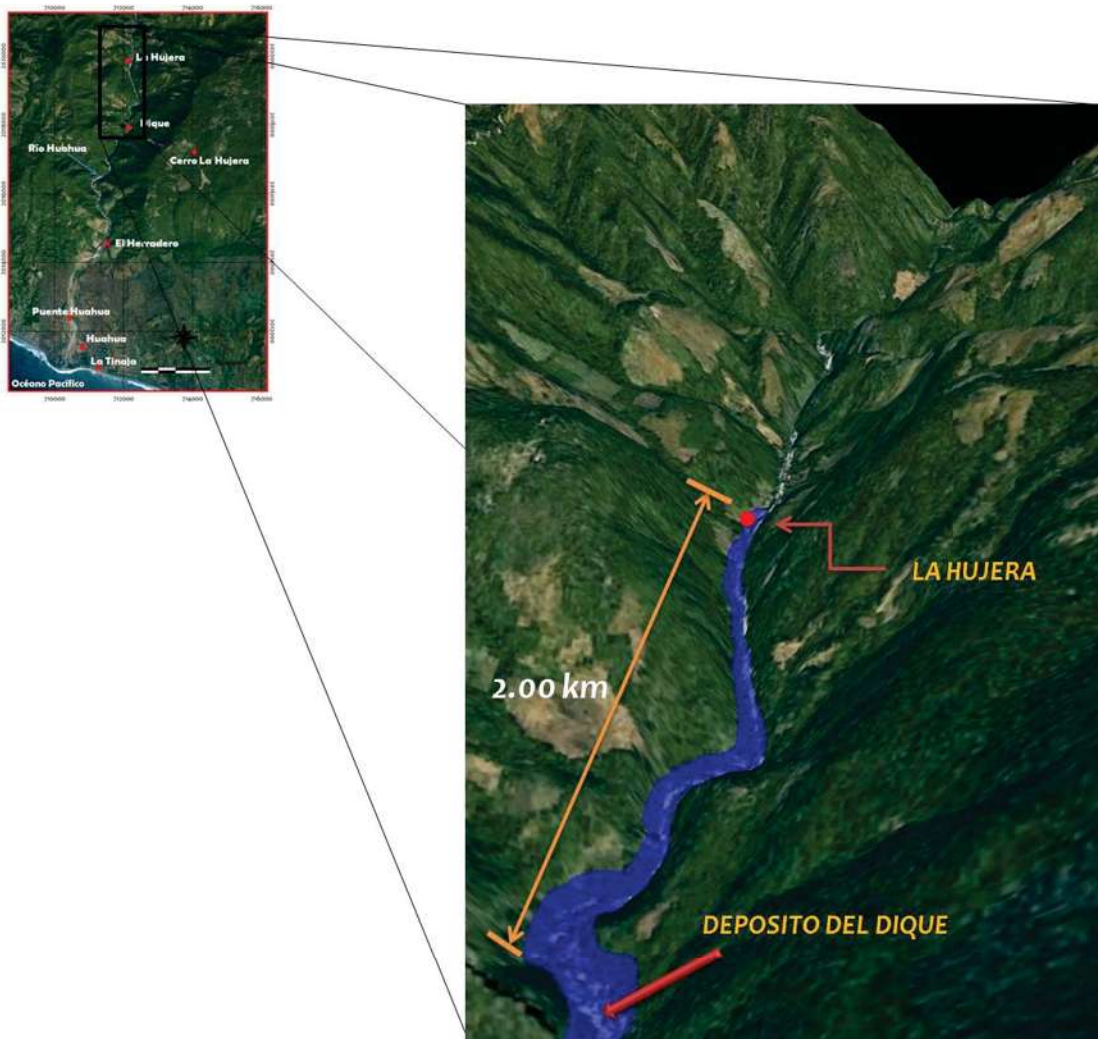


Figura 53. Afectación del polígono de inundación, aguas arriba del dique-deslizamiento.

Otro tipo de afectación que comúnmente no se considera, estriba en el incremento de la presión de poro en materiales inundados que conforman la base de laderas adenañas al polígono de inundación. Este efecto es potencialmente peligroso debido a que incrementa la susceptibilidad de colapso o deslizamiento en dichas laderas, pudiendo desarrollarse nuevos diques-deslizamientos.

Es necesario señalar que aunque son pocos los casos de este tipo de fenómenos en México, es importante que éstos sean estudiados y analizados con detalle pues su impacto inmediato es severo, y a largo plazo el daño puede ser mayor.

VI. PROBABILIDAD DE COLAPSO DEL DIQUE-DESLIZAMIENTO.

VI.1.- Geometría y estructura del dique-deslizamiento.

El análisis de la probabilidad de colapso se realizó de forma cualitativa con base en los siguientes aspectos del dique-deslizamiento: dimensión, orientación, permeabilidad, y escurrimiento superficial:

- 1) Dimensión. El dique-deslizamiento presenta un ancho de 210m en dirección norte-sur, un espesor de aproximadamente 30m desde el fondo del río hasta el punto más elevado del depósito, y un volumen de 600,000 m³ (estimación gruesa) (Figs. 54 y 55). Lo anterior nos indica que las dimensiones del dique-deslizamiento son relativamente grandes, y que fácilmente podría soportar el empuje hidrostático del cuerpo de agua recién formado.



Figura 54. Vista del depósito (dique) desde aguas abajo del río.

- 2) Orientación. Debido a que el deslizamiento La Huahua se desarrolló con una dirección SE-NO, de forma totalmente opuesta a la dirección del río, que en ese punto es de NO-SE; el emplazamiento del dique-deslizamiento se desarrolló de forma paralela al eje del río. Esto tiene dos implicaciones importantes: por una parte, el frente del emplazamiento constituye la superficie de contacto con el cuerpo de agua recién formado; y por otra, el empuje hidrostático se presenta con una dirección paralela a la dirección del deslizamiento, por lo que su fuerza es contrarrestada en cierta medida, por el resto del cuerpo de deslizamiento.



Figura 55. En esta fotografía: con la línea punteada se indica el límite del depósito y la salida que ha encontrado el agua, para seguir su curso.

VI.2.- Escurrimiento superficial.

- 3) Permeabilidad. Considerando que la permeabilidad de un depósito depende del tamaño de los bloques y granos que lo conforman, podemos asegurar que el dique-deslizamiento presenta una permeabilidad media-alta, debido a que es formado en su mayoría por grandes bloques de conglomerados y calizas (Figs., 49 y 56), que llegan alcanzar hasta los 10m de altura y poco más del doble de ancho. Esta permeabilidad media-alta puede ser verificada en campo a través de la observación de varios flujos de bajo gasto que se desarrollan al interior del cuerpo del dique. Con base en lo anterior, podemos establecer que la permeabilidad media-alta del dique reduce la probabilidad de colapso del mismo, debido a que el acomodo de las rocas permite el flujo de agua, y el peso de los grandes bloques de rocas complica al embalse ejercer su empuje de volteo y arrastre.



Figura 56. Tipo de rocas que conforman el dique de deslizamiento.

- 4) Al relacionar los gastos calculados para diferentes periodos de retorno y la respectiva área hidráulica requerida para desalojarlos, se puede notar que no hay problema para darle salida al escurrimiento superficial. La figura siguiente muestra la sección hidráulica del cauce, en el punto donde se encuentra alojado el dique y el nivel que alcanzaría el tirante de agua, para darle paso a un gasto de $4308.78 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a un periodo de retorno de 500 años. El área hidráulica requerida para desalojar este gasto es de 580 m^2 , la cual se desarrollaría a partir de la sección del escurrimiento actual y sobre una parte de la superficie del dique-deslizamiento (Fig. 57).

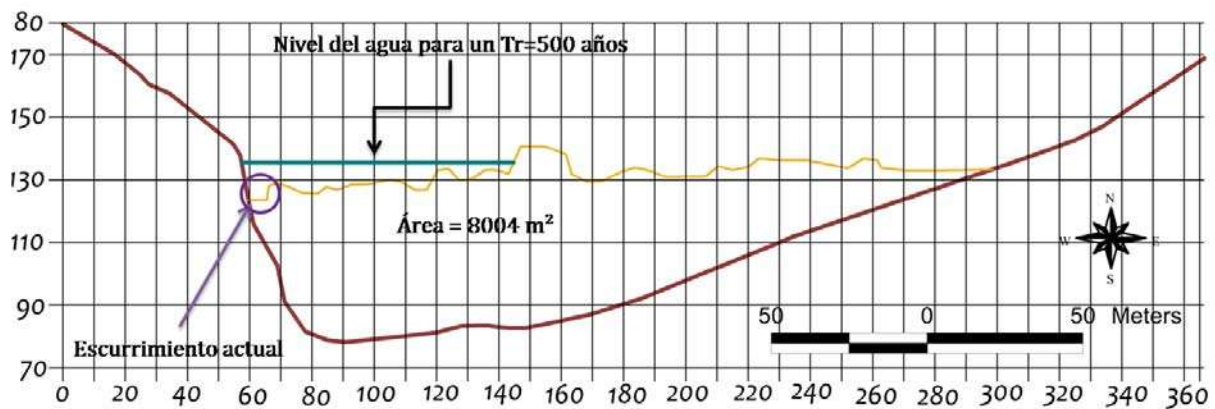


Figura 57. Sección transversal del cauce obstruido por el depósito. Nivel que alcanzaría el río para desalojar un gasto con periodo de retorno de 500 años.

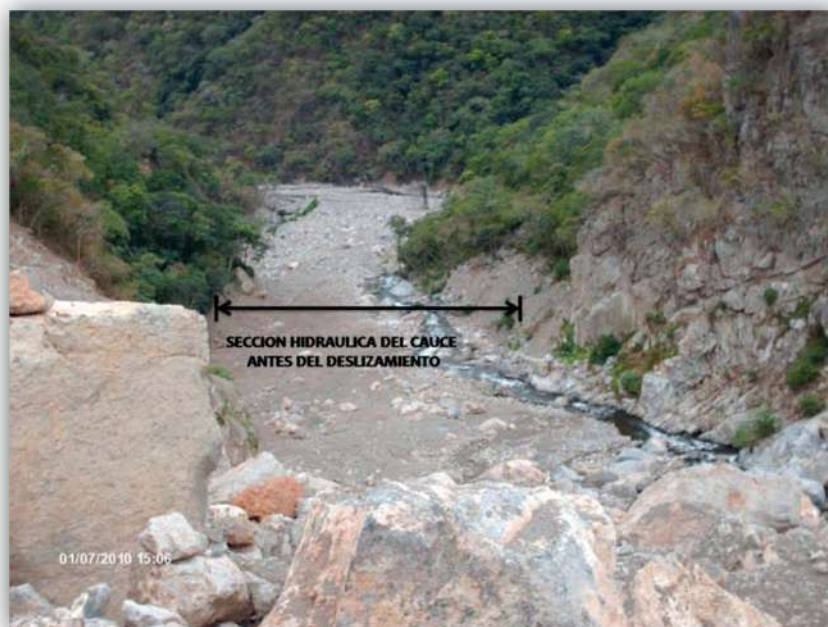


Figura 58. Vista del escurrimiento aguas abajo desde la parte superior del dique deslizamiento. Se compara la sección hidráulica del cauce antes del deslizamiento y el escurrimiento actual.

VI.3.- Probabilidad de colapso.

En síntesis, bajo la situación actual del dique-deslizamiento y de su relación con el cuerpo de agua formado por el remanese del río La Huahua, se tiene que la probabilidad de colapso repentino del dique es muy baja, pues por una parte la presión hidrostática es bien soportada por el dique y resto del cuerpo del deslizamiento; y por otra, el dique es un cuerpo relativamente permeable que permite el flujo de agua tanto al interior como en superficie, por lo que la presión hidrostática tenderá a disminuir con el tiempo.

Finalmente, el escurrimiento superficial generado por precipitaciones de largo periodo de retorno, será evacuado a través de secciones hidráulicas que se conformen de manera natural sobre la superficie del dique. Esta situación generaría erosión y remoción de materiales finos del cuerpo del dique por lo que favorecería aun más la permeabilidad del mismo.

V.4.- Inundación aguas abajo.

Ya se demostró que los gastos calculados en el análisis hidrológico, no tienen mayor problema para librar el dique (Fig. 56). El problema viene a 3.5 km aguas abajo, en la comunidad del Herradero (ver figura 2), donde la sección hidráulica del cauce delimitada por bordos longitudinales construidos por Protección Civil resulta insuficiente para darle salida e incluso a un gasto para un periodo de retorno de 2 años que corresponde a $639.14 \text{ m}^3/\text{s}$.

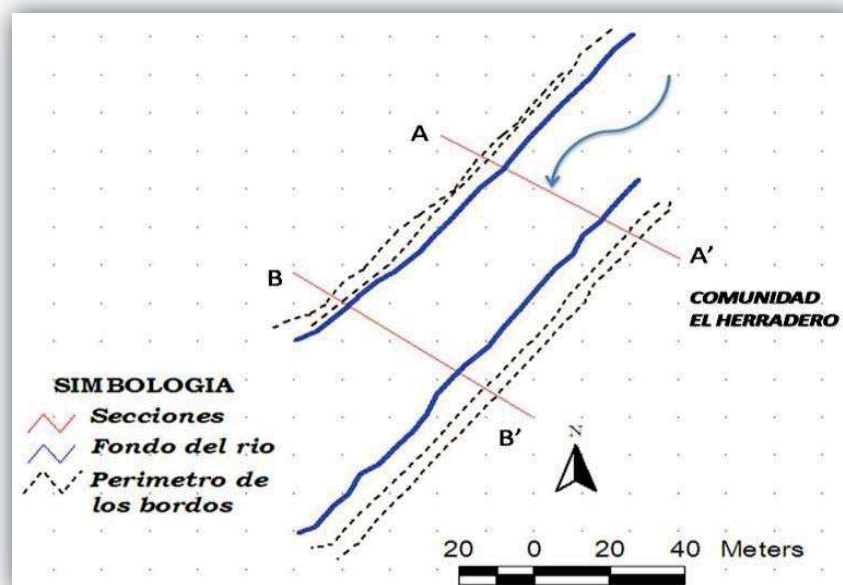


Figura 59. Vista en planta de los bordos longitudinales, en El Herradero.

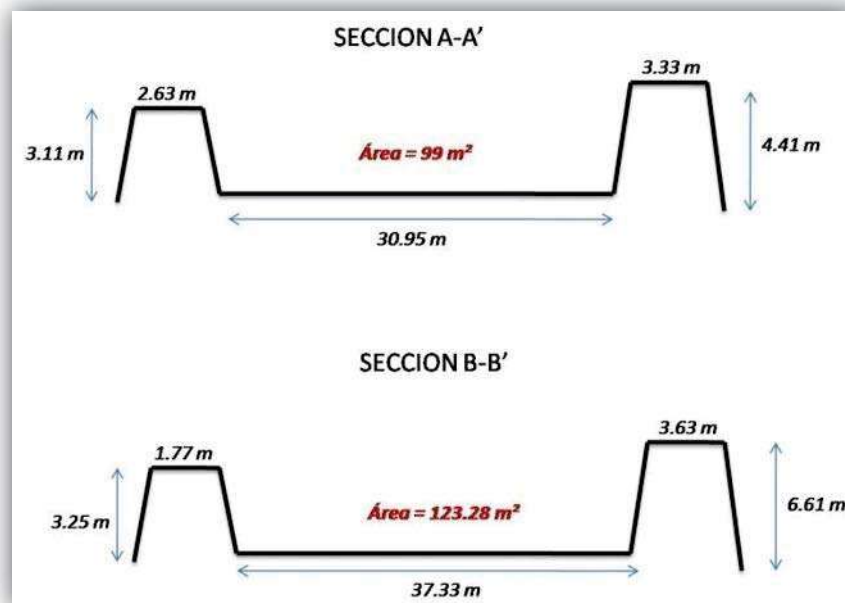


Figura 60. Perfil de dos secciones transversales de los bordos en El Herradero.

El análisis hidrológico de la cuenca, nos arrojó valores de escurrimiento para distintos periodos de retorno, como se muestran en la siguiente tabla. Cabe señalar que los caudales obtenidos son tomando en cuenta como salida de la cuenca, el dique de deslizamiento que se encuentra unos 3.5 km aguas arriba de la ubicación de los bordos, lo que nos proporcionaría tal vez un gasto mayor, dejando de lado los errores de cálculo del método racional.

Tabla 18. Área hidráulica requerida para desalojar los caudales obtenidos en el análisis hidrológico.

Tr (años)	Qt (m³/s)	v m/s	Ah m²
2	639.14	5.150834	124.0844
5	1232.58	5.441021	226.5352
10	1813.58	5.598732	323.9269
25	2321.22	5.943269	390.5627
50	2979.73	6.230847	478.2218
100	3742.17	6.660561	561.8395
500	4308.78	7.429087	579.9881

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el área hidráulica requerida para darle paso a un gasto con periodo de retorno de 2 años, es de 124.1 m². Dicha área es mayor que el área hidráulica del cauce delimitada por los bordos construidos, lo que pone en grave riesgo de inundación a esta comunidad, además que esta se encuentra ubicada aun dentro de la llanura de inundación del cauce y a la misma elevación topográfica.

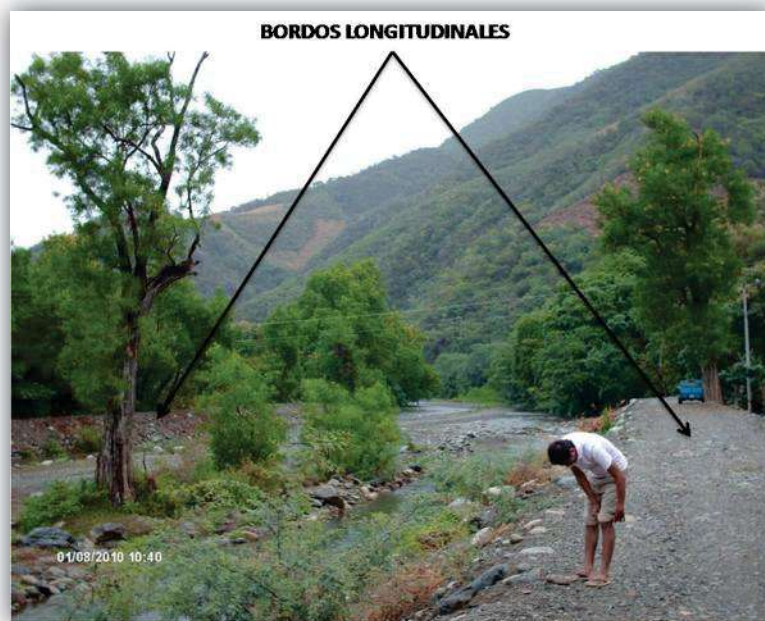


Figura 61. Bordes longitudinales construidos por Protección Civil en El Herradero.

A una distancia aproximada de 2.3 km aguas abajo de la comunidad El Herradero (Figura 64), se encuentra construido el puente Huahua ($18^{\circ}11'22.15''N$ $103^{\circ}00'38.84''O$), el cual forma parte de la autopista “La Costera”. Además de analizar los bordos longitudinales en el Herradero, también se consideró importante verificar la sección hidráulica en el puente, y así corroborar si es suficiente, para dar paso a los caudales calculados en el análisis hidrológico.

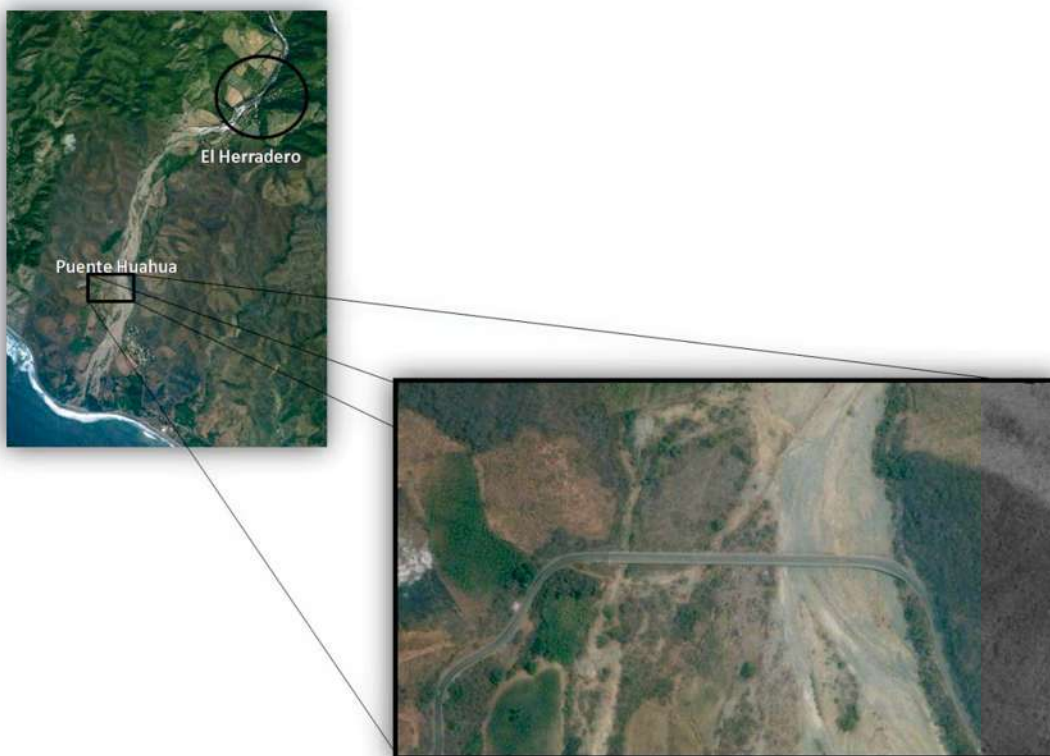


Figura 62. Ubicación del puente Huahua.

Gracias a la visita y al equipo de topografía, se logró hacer el levantamiento del perfil del puente (Fig. 63). Con esto se obtuvo un área hidráulica total de 1367.29 m² (Tabla 19), considerando la suma de las áreas parciales delimitadas por las pilas y la base del puente.

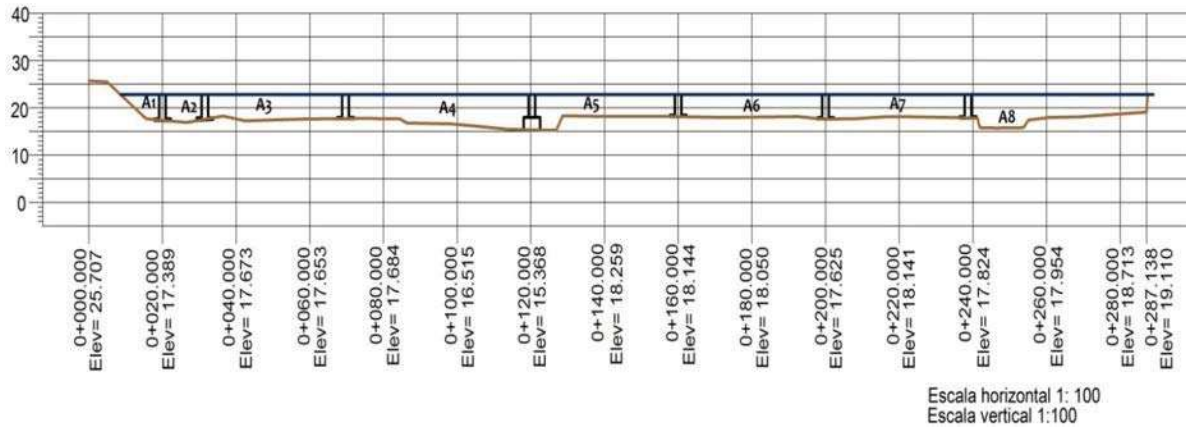


Figura 63. Perfil del puente Huahua, se muestran las pilas y la base del puente.

Tabla 19. Área hidráulica total en el perfil del puente del río Huahua.

Simbología	Área (m ²)
A1	35.7614
A2	53.4602
A3	186.8277
A4	294.7245
A5	188.3026
A6	180.6033
A7	177.323
A8	250.288
Σ=	1367.2907

De esta manera al comparar, el área hidráulica del puente y el área hidráulica requerida para los caudales calculados en la tabla 18. Se demuestra que no existe problema alguno para dar salida a un gasto con periodo de retorno de 500 años, a expensas de analizar mayores gastos.



Figura 64. Vista lateral del puente Huahua, Aquila Mich.

No está demás, mantener un monitoreo y/o control de las pilas del puente, cuidando sobre todo la socavación, como puede apreciarse (Fig. 64) la tercer pila, muestra un grave problema de socavación, pues la base de la pila esta casi totalmente descubierta.

El análisis anterior nos lleva a proponer medidas y soluciones para la problemática que se vive en esta región del municipio de Aquila, Michoacán. Sobre todo para reubicar a estas comunidades que tienen riesgo de inundación y la mejor manera de tratar el asunto del dique de deslizamiento, sin tomar medidas excesivas y/o muy costosas.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Con base en la hipótesis planteada para el desarrollo del presente trabajo y en los resultados obtenidos previamente descritos, se concluye que el dique-deslizamiento si pone en peligro de inundación a las rancherías localizadas aguas arriba, debido a que el volumen del cuerpo de agua y extensión de inundación, son función directa de la altura del dique-deslizamiento y del tirante de agua alcanzado durante precipitaciones de largo periodo de retorno. Por ejemplo, la cota que alcanzaría la lamina de agua, en el dique-deslizamiento, para un caudal con periodo de retorno de 500 años, se encuentra por encima de la cota sobre la cual se encuentran las viviendas de la comunidad de La Hujera.

Por otra parte, bajo las condiciones actuales del dique se concluye que su probabilidad de colapso instantáneo es muy baja, debido a que es integrado por grandes bloques de rocas que le infieren estabilidad ante el empuje hidrostático, además de contar con el soporte adicional del resto del cuerpo del deslizamiento.

Sin embargo, considerando exclusivamente el escurrimiento superficial a la altura del dique-deslizamiento, y comparando el área hidráulica requerida de éste con la disponible en las comunidades aguas abajo del dique de deslizamiento, son vulnerables ante una crecida del río, ya que la comunidad del Herradero se encuentra sobre la llanura de inundación del río y los bordos longitudinales construidos por las autoridades de Protección Civil a la altura de la comunidad son deficientes para darle paso a los caudales máximos calculados. En la comunidad de Huahua, el riesgo es relativamente menor, pensando en que, a la altura en que se encuentra la comunidad el río tiene una mayor área hidráulica, aunque es importante mencionar que estas viviendas están dentro del delta que forma el río en su contacto con el mar, y el río puede cambiar de curso repentinamente e introducirse en dicha Tenencia.

Los bordos longitudinales construidos en El Herradero para proteger la zona de un posible desprendimiento del dique o incremento del nivel del río son deficientes, ya que el área hidráulica formada por estos resulta insuficiente para darle salida a un gasto e incluso para un periodo de retorno de 2 años, lo que provocaría un desbordamiento del río y por consiguiente la inundación de la comunidad. Según versiones de los habitantes los bordos tenían una altura de aproximadamente 8 metros desde el fondo del río hasta la cresta de estos, cuando fueron construidos, un año después cuando se realizó la visita la altura de los bordos tenían como máximo una altura de 4 metros lo que ha reducido el área hidráulica del cauce, no se entiende con qué criterio se construyeron dichos bordos, ya que el agua ha erosionado las paredes de los bordos y esto aunado al arrastre de sedimentos del cauce han ido reduciendo considerablemente la sección hidráulica del cauce.

Recomendaciones:

1. Para un mejor análisis hidrológico, principalmente para la determinación de caudales máximos, se recomienda instrumentación de la cuenca, colocar una red de estaciones hidrometeorológicas o pluviométricas en puntos estratégicos, de manera que tengan registros diarios de lluvia.
2. Colocar una sección de control o de aforo en el embalse formado por el dique y registrar el nivel del tirante de agua de manera diaria, para conocer el gasto en ese punto.
3. Para la conversión de la precipitación en escurrimiento adoptar un modelo de simulación hidrometeorológico lluvia-escurrimiento, o en todo caso aplicar un método como el de isócronas que consiste en la aplicación del método racional en sectores de áreas relativamente pequeñas y limitadas por una línea (isócrona), de tal manera que una gota de lluvia caída en el lugar más alejado de cada sector, utiliza el mismo tiempo para recorrer la distancia entre isócronas. Así se obtienen caudales máximos parciales por cada sector que al totalizar definen el caudal máximo deseado, para el tiempo y área que se calcula.
4. Para prevenir una posterior inundación en la comunidad de la Hujera, por causa del incremento en el caudal del río, se recomienda reubicar las viviendas en una zona que se encuentre por encima de la cota 125 como mínimo.
5. Para el desgaste del dique, se recomienda evitar el uso de explosivos ya que podrían generar un nuevo deslizamiento del cerro y acrecentar el volumen del tapón.
6. Es necesario realizar la caracterización a detalle del deslizamiento, para conocer con certeza factores condicionantes y detonantes, y con base en ello, establecer la probabilidad de un nuevo derrumbe e incremento de la altura y volumen del dique.
7. En la comunidad del Herradero, los bordos de protección que se construyeron han sido erosionados de manera evidente. Se propone construir nuevos bordos considerando el área hidráulica que se necesita para desalojar un gasto con periodo de retorno de 100 años como mínimo. Además de que se construyan muros de contención tipo gavión o algún tipo de bordo perimetral poco susceptible al efecto erosivo del agua.
8. Sería conveniente también aplicar la misma protección que en El Herradero en la comunidad de Huahua, por lo propenso de que el río cambie de curso o en caso de una gran avenida. Ya que según sus habitantes el río ha logrado adentrarse entre sus viviendas.
9. Implementar algún sistema de alerta temprana contra inundaciones, el que mejor se adapte a las necesidades y presupuesto de la tenencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

A Review of Earthquake Hazards of the West Coast: Report for WCRC by John **Benn**, 1992.

Arvizu, Gustavo. *El deslizamiento en el río Grijalva, Chis.*, 13 de noviembre de 2009, 25 pp.

Bonnard, Ch., (2004), *La Buzza di Biasca*. Contribution au Dict. Historique de la Suisse.

Bonnard, Ch., *Technical and human aspects of historic rockslide dammed lakes and landslide dam breaches*. Soil Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.

CENAPRED, (2004), Secretaría de Gobernación, *Inundaciones*, serie fascículos, 1ª edición octubre 2004, México, D.F., 53 pp.

CENAPRED, (2006), Secretaría de Gobernación. *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos*. Serie: Atlas nacional de riesgos. 1ª edición, noviembre 2006. Pág. 485.

Centeno-García, E., (1994). *Tectonic evolution of the Guerrero Terrane, Western, Mexico*. PhD. Dissertation (university of Arizona), 220. (unpublished).

Chow, Ven Te., Maidment, David R., Mays, Larry W., (2000). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Colombia, enero del 2000. Pág. 511.

Costa, J. E. and **Schuster**, R. L., (1988). The Formation and Failure of Natural Dams, Geological Society of America Bulletin, 100: 1054-1068.

FAO, (1997). Conservation Guide no.1, 1997. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion (Arnoldus H. M. J). pp 99-124.

FAO (2000), Synthesis Report. En FAO (2000). Land-Water Linkages in Rural Watersheds Electronic Workshop 18 September, 27 October 2000. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agl/watershed/>

Farías, de Reyes Marina., (2005). *APUNTES DE HIDROLOGÍA Módulo II: Análisis hidrológico*. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Agosto, 2005., 30 pp.

González, Sofía., (2009). *Introducción al riesgo de inundaciones*. Curso de formación de inspectores: La inspección y la evaluación de daños en edificios por inundaciones. Septiembre del 2009.

Hernández-Madrigal VM, Mora-Chaparro JC, y Garduño-Monroy VH, 2010. Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico. Landslides Journal, En edición.

Makino, Takeo y **Funaki**, Yasuro (2002). *The Linkages between Climate Change, Flooding and Landslides, and Agriculture: An Overview*

Monsalve, Germán (1999). *Hidrología en la ingeniería*, Editorial Alfaomega, 2ª edición, México D.F., 1999, 382 p.

Mora Juan Carlos (2008). Año Internacional de la Tierra. *Ciencias de la Tierra para la sociedad*, julio de 2008. No 3.

OMM/UNESCO, (1974), “Glosario hidrológico internacional”, WMO/OMM/BMO, No. 385, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.

Ordaz M., (1996). Revista prevención No. 14 “Algunos conceptos del análisis de riesgo”, SEGOB, CENAPRED, México, pp. 6-11.

Parry M.L. y **M.S. Swaminathan** (1992), “*Effects of Climate Change on Food Production*”, in I.M.Mintzer (ed.), *Confronting Climate Change, Risk, Implications and Responses*, Cambridge University Press, United Kingdom.

Pilgrim, D.H y **Cordery** (1993). Flood Runoff. In: Handbook of Hidrology. D.R Maidment (Ed.), pp 9.1-9.42. McGraw-Hill.

Raizis, Erwin., (1959). Landforms of México: Cambridge, Mass, mapa con texto escala 1:3000,000

SAGARPA., *Datos fisiográficos del estado de Michoacán.*

Sánchez, F. Javier. (2004). *El ciclo hidrológico*. Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España), 5 pp, <http://web.usal.es/~javisan/hidro>.

Schuster Robert L., **Bucknam** Robert C., and **Mota** Manuel Antonio. *Evaluación de la estabilidad de un dique de deslizamiento de tierra inducido por el huracán Mitch en el rio la lima, sierra de las minas, Guatemala oriental*. Departamento de Gobernación del los Estados Unidos. Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2001.

Sedlock R., F. Ortega-Gutierrez., and R.S. Speed., (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico . Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 pp.

Sisa, Camargo Augusto., (2005). *Hidrología urbana*. Universidad del Norte, mayo de 2005, pág. 48-117.

Varnes DJ, 1978. Slope movements: type and processes. In Landslides Analysis and Control (Ed. E. B. Eckel). Transp. Res. Board, Spec. Rep. 176. Pp. 11-33.

West Coast Regional Council: Natural Hazards Review 2002, DTec Consulting Ltd., Christchurch (the DTec Report). LANDSLIDES & LANDSLIDE DAM HAZARDS. Pag (30-49).

Wischmeier, W. H. y **D. D. Smith.**, (1978). Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook No. 537. 58 p.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

Aparicio, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México, 2007. 304 p.

Barrera, José Luis. *Inundaciones en las grandes ciudades*. Noviembre-diciembre 2007, pág. 52 y 53.

Barros Juan Fernando, Pacheco Ramón, Gómez Paula. *Sobre la modelación matemática del rompimiento de presas de tierra y naturales. Casos Mantaro (Perú, 1974) y Josefina (Ecuador, 1993)*. XII Congreso Nacional de Hidráulica e Hidrología. Cali, agosto del 27 al 29 de 1998.

Becerra Beatriz., “*Aplicación de SIG para evaluar el riesgo de inundaciones en La Piedad Michoacán*”. Tesis de licenciatura, Facultad de Biología UMSNH, Morelia Mich., 2007.

Blaikie Piers., Cannon Terry., David Ian., Wisner Ben. *Vulnerabilidad el entorno social, político y económico de los desastres*. Primera Edición: Julio de 1996. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina 1996. 290 pp.

CEPAL, *Los efectos socioeconómicos de las inundaciones y deslizamientos en Venezuela en 1999*. 14 de febrero de 2000. Distribución limitada: LC/MEX/L.421.

Chang, Luis., Alva Jorge. *Deslizamientos y aluviones en el Perú, marzo de 1991*. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima Perú. Laboratorio Geotécnico Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.

Clérici, C y Garcia Préchac, F. *Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de La Plata*. Agrociencia (2001) vol. V N° 1 pág. 92-103.

Concha, E. Gilberto. *Caracterización y evaluación de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa*. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, FICT. Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Guayaquil, Ecuador.

CONSEJO DE RECURSOS MINEROS. *Monografía Geológico-Minera del estado de Michoacán*, 1ª edición, México D.F., 1995, 176 pp.

Facultad de Ingeniería Departamento de Hidráulica. Universidad Nacional del Nordeste cátedra: Hidrología. *Guía del trabajo practico n° 1. Determinación de las características físicas de la cuenca*. Pág. 1-12

Ferrer Carlos. *Represamientos y rupturas de embalses naturales (lagunas de obturación) como efectos cosísmicos: algunos ejemplos en los andes venezolanos*. Vol (40), 1999. Pag. 119-131.

Fuentes Junco José de Jesús Alfonso. *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional pico de Tancítaro*. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, Julio 2004.

Garduño-Monroy V. H., Corona-Chávez P., Israde-Alcántara, I., Menella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B., Chiesa, S. *Carta Geológica de Michoacán escala 1:250000*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas UMSNH, 1ª edición. Morelia, Mich., junio 1999. 111 p.

González del Tánago Marta. *Tema 9: escorrentías*. Unidad docente de hidráulica e hidrología. Departamento de ingeniería forestal e.t.s. de ingenieros de montes. Universidad politécnica de Madrid.

Hutchinson J. N., Kojan E. *El deslizamiento de tierras de Mayunmarca el 25 de abril de 1974*. Mayo- junio de 1974. No. De serie 3124/RMO.RD/SCE. París, febrero de 1975.

Irurtia Carlos., Cruzate Gustavo. *Aplicación de la ecuación universal de predicción de pérdidas de suelo en la provincia de Buenos Aires*. Instituto de Suelos del INTA.

Marin Carraza, Ernesto. *Predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica en la microcuenca Concordia, municipio de Armadillo de los Infante*. Referencia: Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de postgrados. 1991.

Martín, Juan P. *Ingeniería de ríos*. Editorial: Alfaomega, tercera reimpresión. México, abril 2008. 331 p.

Miller B.G.N., Cruden D.M. *Landslide dams, Peace River lowlands, Alberta*. Géó Edmonton 2008.

Nanía Leonardo S. *La cuenca y los procesos hidrológicos, apuntes de clase*. Curso Académico 2002-03. UNIVERSIDAD DE GRANADA. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Nanía Leonardo S. *Métodos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de caudales, apuntes de clase*. Curso Académico 2002-03. UNIVERSIDAD DE GRANADA. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Ollero Alfredo. *Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico*. Universidad del País Vasco, Facultad de Filología y Geografía e Historia. Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología. 1997.

Róder Jan., Villavicencio Raymundo., Zarazua Patricia. *Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo "USLE" en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida "Sierra de Quila", 2006*. Avances en la investigación científica en el CUCBA. XVII Semana de la Investigación Científica.

Rodríguez Armanda S., Santos María A., Santos A. D. and Rocha Fernanda. *Dam-Break Flood Emergency Management System*. Water Resources Management 16: 489–503, 2002.© 2003 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. (Received: 18 May 2001; in final form: 18 October 2001). Pag (489-503).

Sánchez F. Javier. *Hidrología superficial (I): Medidas y tratamientos de los datos*. Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España), <http://web.usal.es/~javisan/hidro>. 6 pp.

Sánchez F. Javier. *Hidrología superficial (II): Hidrogramas*. Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España), pp 5, <http://web.usal.es/~javisan/hidro>.

Sánchez F. Javier. *Hidrología superficial (III): relación precipitación-escorrentía*. Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España). 17 pp., <http://web.usal.es/~javisan/hidro>.

Sánchez F. Javier, **Precipitaciones**. Dpto. Geología- Univ. Salamanca (España), junio 2008. , pp 5. <http://web.usal.es/~javisan/hidro>.

Secretaría de Planeación y Desarrollo Estatal Michoacán. *El Reto del Desarrollo del Municipio de Aquila 2002-2008*.

Tomo I componente biofísico Hidrología. Corporación SUNA HISCA. Pág. 132-167

Universidad de Oriente, San Miguel El Salvador, centro América. *Aspectos hidrológicos, capítulo V*, pág. 101-113.

es.wikipedia.org/

ANEXOS.

ANEXO I. Eventos que han generado los mayores daños por inundación en México (1943-2004).

Año	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada	Daños Totales (Millones de dólares)	Gastos o Lluvia	Descripción
1943	Lluvias de invierno	Sinaloa	27	600	0.14	14,376 m ³ /s, río Fuerte, estación Huilites.	Se desbordaron 11 ríos, los más importantes fueron: el Tamazula, Humaya, Fuerte, Sinaloa y Culiacán. La parte norte del estado quedó aislada por tierra y sin comunicación por vía telefónica y telegráfica. Dos puentes ferroviarios, algunos tramos del ferrocarril Sud-Pacífico, varias carreteras y casas fueron dañadas. Hubo deslizamiento de tierras. Las pérdidas en la agricultura fueron cuantiosas.
1949	Lluvias de invierno	Sinaloa y Sonora	10	159,000	10.20	5,265 m ³ /s, río Yaqui, estación El Aguila. 10,000 m ³ /s, río Fuerte, estación Huilites. 6,390 m ³ /s, río Mayo, estación Tres Hermanos.	Se desbordaron los ríos Yaqui, Fuerte y Mayo. Más de 35 localidades quedaron inundadas. Al menos 9,000 casas fueron dañadas. Dos puentes y varias carreteras quedaron dañadas. Se perdieron cientos de cabezas de ganado. Muchas localidades quedaron aisladas (se suspendió el servicio de telegrafo y teléfono). El servicio del ferrocarril Sud-Pacífico fue cancelado temporalmente por daños en las líneas férreas. La presa Álvaro Obregón que estaba en construcción, fue destruida casi en su totalidad.
1955	Huracanes Gladys, Hilda y Janet	Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí, Yucatán y Quintana Roo	110		7.5*	4,002 m ³ /s, río Tempool, estación Tempool. 4,810 m ³ /s, río Tampacán, estación Pujal.	Los huracanes afectaron principalmente la cuenca del río Pánuco. Inundaciones en las zonas bajas de la ciudad de Tampico, con una altura de 3.30 m sobre la media marea. La capacidad de la presa San José, en el estado de San Luis Potosí, fue rebazada. No se presentó falla en la cortina. Parte de la ciudad de San Luis Potosí se inundó. Un puente que conduce a los poblados de Mezquique y Ahualulco resultó dañado. El desbordamiento del río Santiago destruyó una gran cantidad de viviendas en el poblado de Soledad Diez Gutiérrez. En Tampico y Ciudad Madero se contabilizaron cerca de 6,010 casas destruidas o dañadas. El área inundada se estimó en 6,400 km ² aproximadamente. 20,000 cabezas de ganado perdidas.
1959	Ciclón de Manzanillo	Colima y Jalisco	1500	1,600		S/R	3 barcos mercantiles se fueron a la deriva con todo y su flota. 25% de las casas fueron totalmente destruidas en Chihuahán, carreteras dañadas y trenes descarrilados.
1960	Lluvias de invierno	Sonora, Sinaloa y Chihuahua	3	96,000	18.82**	1,397 m ³ /s, río Yaqui, estación La Junta 4,556 m ³ /s, río Yaqui, estación El Novillo. 15,000 m ³ /s, río Fuerte, estación Huilites.	Se desbordaron los ríos Yaqui, Fuerte, Mayo, Bavispe, Humaya, Tamazula, Culiacán y Papigochic. Cerca de 60 localidades quedaron inundadas, las más importantes fueron Los Mochis, Navojoa, Culiacán y Navolato. El nivel del agua alcanzó 4 metros de altura. 500 casas fueron dañadas en Navojoa. La zona más devastada fue la región del río Fuerte. El ferrocarril Sud-Pacífico sufrió daños, así como 2 puentes y algunas carreteras. 206,550 Ha agrícolas perdidas. En el Valle del Yaqui, Sonora, 15,000 Ha quedaron afectadas.
1967	Huracán Beulah	Tamaulipas, Nuevo León, Yucatán y Quimana R.		25,000	500.00	178 m ³ /s, río Sta. Catalina, estación Monterrey	

Año	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada	Dafios Totales (Millones de dólares)	Castos o Lluvia	Descripción
1967	Huracán Katrina	Guerreo, Península de Baja California, Sonora y Nayarit	15	30,000		3,881 m ³ /s río Balsas estación Santo Tomás 1,170 m ³ /s río Turbato, estación Las Adunatas. 1,400 m ³ /s río La Unión. 3,550 m ³ /s, río Tecpan. 20,000 m ³ /s; río Balsas; presa El Infiernillo.	El gasto de 20,000 m ³ /s, registrado en la presa El Infiernillo, ha sido el máximo histórico en la República Mexicana.
1968	Huracán Naomi	Colima, Sinaloa, Durango, Coahuila, Sonora y Chihuahua	10	50,000		500 mm, en 24 h, cuenca del río Baluarte 14,140 m ³ /s, río Baluarte, estación Baluarte. 16,000 m ³ /s; río Acaponeta, estación Acaponeta.	Fueron afectados los ríos Presidio, Baluarte, Acaponeta y Nazas. En muchas estaciones hidrométricas sobre estos ríos se registraron gastos máximos históricos, en algunos casos fueron mayores que los correspondientes a la envolvente mundial de Creager. 60,000 Ha de cultivo afectadas Severas inundaciones en Torreón, Gómez Palacio, Chihuahua y ciudades en Jalisco y Sinaloa. Carreteras y zonas agrícolas dañadas.
1976	Huracán Liza	Baja California Sur y Sonora	600	10,000	3.10	180 mm, en 4 h 950 m ³ /s, arroyo el Cajoncito.	Se calculó un gasto de 950 m ³ /s con una duración de 7.5 h. Inundación en la Ciudad La Paz debido a la falla de un bordo de protección sobre el arroyo El Cajoncito.
1982	Huracán Paul	Sinaloa	0	256,800	114.60	335 mm en 24 h, Mulegú, B. C. S.	Daños económicos en casas habitación, infraestructura rural, infraestructura carretera, electricidad, telefonía, agricultura, ganadería, avicultura, industria y comercio. Por la relevante participación de Sinaloa en la agricultura nacional, las pérdidas provocadas por el ciclón incidieron negativamente en la producción nacional de varios cultivos.
1985	Lluvias de invierno	Nayarit	0	47,927	16.40	4,497 m ³ /s río Acaponeta. 2,589 m ³ /s río San Pedro. 350 mm en 24 h, en Monterrey.	Las pérdidas se dieron básicamente en viviendas dañadas, afectación de carreteras, bordes y zonas de cultivo.
1988	Huracán Gilbert	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila	225	139,374	766.00	342 mm en 24 h, en San Carlos, Tamaulipas. 1,900 m ³ /s río Santa Catarina, estación Puente Zaragoza. 5,880 m ³ /s río San Juan, estación Itehuajale. 900 m ³ /s, río Pesqueira, estación Los Hornos. 6,900 m ³ /s río Patos!, estación Cabezones. 730 m ³ /s río Pabillo, estación Linares Sur. 1,086 m ³ /s río Camacho, estación Linares Norte. 2,258 m ³ /s, río Camacho, estación San Fernando.	Gilbert tocó suelo mexicano, en Quintana Roo, como categoría 5, provocando vientos de hasta 300 km/h en Cuzumel con oleaje de hasta 5m de altura. Posteriormente lo hizo, en Tamaulipas, como categoría 4. Fue en esta parte del país donde se registraron los mayores daños por precipitación pluvial (Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas). Este huracán causó el 50% de las pérdidas del sector agrícola del país en ese año. Adicionalmente, resultaron seriamente dañadas amplias zonas turísticas, agrícolas y boscosas. En la cuenca del río Santa Catarina se produjo una inundación súbita. Se calcula que el huracán Gilberto provocó, en paso por la República Mexicana, una precipitación total acumulada de aproximadamente 90,000 millones de m ³ .

Año	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada	Daños Totales (Millones de dólares)	Castos o Lluvia	Descripción
1990	Lluvias de invierno	Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Chihuahua		40,000	\$50.85	11,720 m ³ /s, río Fuerte, estación Huites.	Se desbordaron los ríos Sinaloa, Mayo, Batopilas y Urique. El río Fuerte desahujó 2,150 millones de metros cúbicos en 5 días.
							En Sinaloa 120 comunidades quedaron inundadas. En la sierra Tarahumara quedaron inundadas 33 localidades. En la Paz, el 40% de las calles fueron destruidas por la lluvia.
1992	Lluvias de invierno	Veracruz e Hidalgo	139	50,000	\$90.70	400 mm en 24 h, Tantzabaca, S. L. P.	En el estado de Sonora, 50,000 Ha. cultivadas quedaron totalmente dañadas, mientras que en Sinaloa se perdieron 2,712 millones de dólares en ganado.
							Se desbordaron los ríos Santiago, San Pedro, Acaponeta, y Amezca.
1992	Lluvias de invierno	Nayarit	64	100,000,00	\$70.00	10,000 m ³ /s, río Santiago, presa Aguamielpa.	Se inundaron más de 70 localidades, algunas de las cuales fueron Tecuala y Tuxpan (las más afectadas), Santiago Ixcuintla, Bahía de Bandejas y San Blas. 104,000 Ha. agrícolas sufrieron daños y varias carreteras fueron destruidas.
							Se desbordaron los ríos Tijuana y Tecate, en Baja California, así como los arroyos El Carrizo y Matanuco, en Baja California Sur. En el río Tijuana se presentó una inundación súbita.
1993	Lluvias de invierno	Baja California Sur	33	10,000	\$32.00	100 mm en 4 h, cuenca del río Tijuana. 316 mm en 15 horas, cuenca del arroyo Miraflores.	Los sistemas de comunicación y las zonas de agricultura fueron severamente dañadas. Cierre de aeropuertos, 45% de la ciudad inundada.
							Se desbordaron los arroyos Miraflores y El Tule. Asimismo, se produjeron avenidas súbitas en varios ríos.
1993	Lluvias de invierno	Baja California Sur	3	10,000	\$63.40	632 mm, en 24 h	Hubo interrupción de servicios públicos y daños en la infraestructura de puentes, carreteras, tuberías y embarcaciones.
							El río Pánuco registró el gasto máximo de los últimos 20 años (hasta ese entonces) El estado de Veracruz resultó dañado por inundaciones con un elevado costo económico. No hubo pérdida de vidas.
1993	Huracán Cent	Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí y Tamaulipas	40	97,943		427 mm en 24 h, Tantzabaca, San Luis Potosí	En el estado de Hidalgo: 35 municipios afectados; 4,425 viviendas afectadas; 18 carreteras; 68 caminos; 38 puentes; 35 ríos desbordados; 23 sistemas de agua potable; 67,600 Ha. de cultivo y 361 comunidades incomunicadas.
							En el estado de San Luis Potosí se perdió un 80% de las cosechas. Así como una gran cantidad de cabezas de ganado.
							En el estado de Tamaulipas se inundaron 22 municipios, 17 colonias en la ciudad de Tampico y 11 colonias en Altamira

Año	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada	Daños Totales (Millones de dólares)	Castos o Lluvia	Descripción
	Huracán Ismae	Sonora, Sinaloa y Baja California Sur	200	24,111		197 mm en 24 h, A. Ruiz, Sinaloa.	La lluvia provocó la inundación de algunas áreas por espacio de varias semanas. En Sonora resultaron destruidas 6,827 casas por el efecto del viento. 40 embarcaciones fueron hundidas.
1995	Huracán Opal	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo	23	26,874	410.40	245 mm en 24 h, en Campeche. 100 mm en 24h, en Tapilulapa, Tabasco. 297 mm en 24 h, en Martínez de la Torre, Veracruz.	Se desbordaron los ríos Coahuila y Usamacinta. En Cd. del Carmen el 90% de las casas fueron dañadas. 300 reses perecieron en Campeche. Se dañaron varios puentes y carreteras. En Yucatán más de 200 embarcaciones sufrieron deterioro.
	Huracán Roxanne	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo	13860*			204 mm en 25 h, en Tabasco. 200 mm en 10 h, en Misantla.	Se desbordaron los ríos Nautla, Colipa, Actopan, Misantla y Bobos. Vientos máximos de 185 km/h y ráfagas de 215 km/h. La característica particular de este huracán fue su trayectoria irregular ya que regresó y provocó mayores daños. 331 casas dañadas totalmente.
1997	Huracán Pauline	Guerrero y Oaxaca	228	8,500	447.80	340 m ³ /s, arroyo El Camarón, Acapulco. 411.2 mm en 24 horas, estación Aeropuerto, Acapulco.	54,000 casas dañadas; 122,282 hectáreas de cultivo dañadas y 80,000 Ha. de bosques y selva perdidas en Oaxaca. Hubo 20 puentes y carreteras dañadas. Hubo 350 deslizamientos de tierra e interrupción de los servicios públicos.
1998	Lluvias	Chiapas	229	28,753	603.00	498 mm en 96 h, estación Arriaga, Chiapas. 342 mm en 24 h, estación Margaritas, Chiapas. 220 mm en 24 h, estación Arriaga, Chiapas.	Se debieron reparar 209 sistemas de abasto de agua potable en comunidades rurales. Igualmente se realizaron trabajos de limpieza y desazolve de alcantarillas en comunidades rurales y cabeceras municipales. Se encauzaron 18 ríos en la región. El 50% de los caminos rurales quedaron afectados. La vía ferroviaria sufrió 47 cortes, 8 puentes colapsaron y 15 km de vía fueron completamente destruidos.
1999	Depresión Tropical 11	Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco	387	1,904,000	807.50	420 mm en 24 h, estación Tenango, Puebla. 382 mm en 24 h, estación La Laguna, Puebla. 212 mm en 24 h, estación Martínez de la Torre, Veracruz. 102 mm en 24 h, presa La Esperanza, Hidalgo	20 colonias inundadas, cierre parcial de carretera Ensenada-Jilpana, parálisis urbana, pérdidas por 600 mdp en el sector industrial. En el caso de Puebla, los sectores con mayores daños fueron: sistema de transporte, generación de energía eléctrica, suministro de agua potable, vivienda y agricultura. En el caso de Veracruz, los sectores con mayores afectaciones fueron: agricultura, vivienda, transporte y comunicaciones y agua y saneamiento. Para el caso de Tabasco, los sectores con mayores afectaciones fueron en este orden los siguientes: vivienda, agua y saneamiento, ganadería, transporte y comunicaciones e industria manufacturera.

Año	Evento	Estado	Muertes	Población afectada	Datos Totales (Millones de dólares)	Gastos o lluvia	Descripción
2000	Huracán Keith	Quintana Roo, Chiapas, Tamaulipas y Nuevo León	9		38.78	140 mm en 24 h, Chetumal, Q. Roo, 366.5 mm en Sabinas, Tamaulipas	La presa "Las Animas" recibió 64.8 millones de m ³
	Huracán Juliette	Sonora y Baja California Sur	9	38,730	184.15	400 mm en 24 h, estación Santa Gertrudis, 392 mm en 24 h, estación San Bartolo, 387 mm en 24 h, estación Capuano, 385 mm en 24 h, estación Santa Anita, 360 mm en 24 h, estación Yéneca, 380 mm en el valle del Yaqui, 327 mm en el valle de Guaymas, 1,658 m ³ /s, arroyo Matapé, presa Punta de agua.	Población afectada: 22,365; 18,873 viviendas dañadas; 273 escuelas dañadas; 1,451 Ha. de cultivo dañadas; 46,506 km de caminos afectados.
2001	Lluvias	Varios estados	95	126,954	42.30	S/R	14,702 viviendas dañadas; 18 escuelas dañadas; 10,000 Ha de cultivo dañadas; 800 km de caminos afectados. En Cuernavaca 175 mil estudiantes de nivel básico sin clases por un par de días, habilitación de 912 albergues, pérdidas de cosechas no cuantificadas (plátano, maíz y tabaco), deslaves en la carretera Omespec-Iguala a la altura del km 7. En Jalisco daños en instalaciones de varios hoteles. También se reportaron daños en Michoacán, Veracruz, Chiapas y Guerrero.
	Huracán Isidore	Yucatán, Campeche	4	500,000	870.07	25.9 mm en 24 h, en Becamchen, Yucatán, 236.5 mm en 24 h, en Palizada, Campeche, 227.7 mm en 24 h, en Campeche, Campeche, 204.5 mm en 24 h, en Cacaluta, Chiapas, 777 mm en 96 h, en Campeche, 680 mm en 96 h, en Chiapas, 904 mm en 96 h, en Yucatán, 381.5 mm en 96 h, en Tabasco.	Los daños causados por el huracán "Isidore" son superiores a los que ocasionó "Gilbert" en 1998. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuantificó un total de 5,500 postes caídos. La Secretaría de Educación Pública (SEP) estima que más de 536,000 alumnos yucatecos de todos los niveles educativos fueron afectados en un total de 2,254 escuelas. En Campeche, la cifra de alumnos afectados fue de 238,000, correspondientes a 1,240 escuelas de todos los niveles educativos.
2002	Huracán Ketna	Nayarit, Jalisco	2	374,500	122.15	250 mm en 24 h, estación Cuicatlan, Colima, 125 mm en 24 h, estación Carrillo, Querétaro, 116 mm en 24 h, CRC Hgo-Querétaro, Querétaro, 105.5 mm en 24 h, estación El Pueblo, Querétaro, 97.9 mm en 24 h, estación Cortazar, Guanajuato, 93.6 mm en 24 h, estación Pajaritos, Nayarit, 82.2 mm en 24 h, estación Capomal, Nayarit, 79 mm en 24 h, estación P. Coborca, Durango, 78.1 mm en 24 h, estación Peña del Águila.	Población afectada \$25,952; 33,444 viviendas dañadas; 376 escuelas dañadas; 203,434 Ha de cultivo dañadas; 741 km de caminos afectados.
	Lluvias de verano	Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas	14	256,301	194.13		Aunque se registraron valores de lluvia elevados, el principal problema fue que durante el mes de septiembre la lámina de precipitación acumulada fue muy grande, por lo que la capacidad de los ríos y arroyos fue superada. 258,301 personas afectadas; 18,139 viviendas dañadas; 339 km de caminos afectados; 154,324 hectáreas afectadas.
2004	Frete Frio no. 49	Coahuila	38	6,692	13.60	55.9 mm en 24 h, Piedras Negras	1,623 viviendas dañadas; 11 escuelas afectadas; daños en la distribución de agua potable; 480 vehículos dañados; 1 puente. Daños al sector agrícola y pecuario.

S/R Sin registros de lluvia ni gasto.

* Cuantificación de datos correspondiente solo a la ciudad de Tampico.

** Cuantificación de daños correspondiente solo al estado de Veracruz.

† Sólo en Veracruz.

Fuente: fascículo Inundaciones 1999, revista Prevención, informes de la serie Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México e información propia del Área de Estudios Socioeconómicos.

ANEXO II. Mapas de isoyetas para la República Mexicana.



