

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CUENCAS Y TECNOLOGÍA FORESTAL



INFORME FINAL
PROYECTO RD-1312.1
EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE
TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS UTILIZANDO
EL METODO DE CUENCAS PAREADAS

M.C. Pedro Rivera Ruiz

Jiutepec, Morelos
Diciembre de 2013

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	III
INDICE DE CUADROS	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ALCANCES	1
3. OBJETIVO	2
4. MANUAL TÉCNICO DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS CON CUENCAS PAREADAS	3
ETAPA I: IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS EN LADERAS Y CAUCES MEDIANTE CUENCAS PAREADAS	4
ETAPA II: SELECCIÓN DEL SITIO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS	4
ETAPA III: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS AMBIENTAL	6
3.1. <i>Delimitación de las microcuencas y subdivisión en nanocuencas</i>	6
3.1.1. Descripción de las características morfológicas de la cuenca	8
3.1.1.1. Índice de forma	8
3.1.1.2. Coeficiente de compacidad (Kc)	9
3.1.1.3. Proporción de elongación	9
3.1.1.4. Curva Hipsométrica	9
3.1.1.5. Perfil longitudinal	10
3.1.1.6. Frecuencias altimétricas	12
3.1.1.7. Porcentaje de pendiente	13
3.1.2. Morfometría de la red de drenaje	14
3.1.2.1. Ordenes de las corrientes	15
3.1.2.2. La ley de bifurcación	16
3.1.2.3. Densidad de drenaje	17
3.1.2.4. Densidad hidrográfica	17
3.1.2.5. Pendiente media del cauce principal	18
3.2. <i>Descripción del medio físico</i>	19
3.2.1. Clima	19
3.2.2. Unidades de suelo	19
3.2.3. Uso de suelo	20
ETAPA IV REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN Y DISEÑO DE SITIOS DE AFORO (VERTEDORES)	23
4.1. <i>Análisis de la precipitación</i>	23
4.1.1. Precipitación anual	23
4.1.2. Probabilidad de lluvia	23
4.1.3. Periodo de retorno o frecuencia de la lluvia	24
4.2. <i>Estimación de escurrimientos para el diseño</i>	25
4.2.1. Escurrimiento medio	26
4.2.2. Escurrimiento máximo	27
4.2.2.1. Método racional	27
4.2.2.2. Método racional modificado	28
4.3. <i>Diseño del canal vertedor</i>	28
4.3.1. Corte A-A	31
4.3.2. Corte B-B	32
4.3.3. Corte C-C	33
4.3.4. Corte D-D	34
4.3.5. Corte F-F	35
ETAPA V: INSTRUMENTACIÓN	36
5.1. <i>Instalación de pluviómetro digital</i>	36
5.2. <i>Canal con vertedor de garganta larga</i>	38
5.2.1. Diseño del vertedor	40
5.2.2. Trazo del vertedor	42
5.2.3. Construcción del canal parshall	42
5.3. <i>Equipo de medición de los escurrimientos superficiales</i>	44
5.3.1. Caseta para equipo	44

5.3.2. Panel solar	44
5.3.3. Sensor ultrasónico	45
ETAPA VI REGISTRO DE INFORMACIÓN	47
4.1. Registro de lluvia (entradas)	47
4.2. Registro de escurrimientos (salidas).....	48
4.3. Registro de producción de sedimentos.....	50
ETAPA VII DEPURACIÓN Y FASE EXPLORATORIA.....	52
5.1. Análisis de precipitación	52
5.2. Análisis de eventos de escurrimiento	56
5.3. Análisis de la producción de sedimentos.....	57
ETAPA VIII EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	58
ETAPA IX: SEGUIMIENTO Y CONTROL	61
5. VIDEO “EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS UTILIZANDO CUENCAS PAREADAS”	62
6. BIBLIOGRAFÍA	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas que conforman la metodología de evaluación de impactos ambientales de tecnologías conservacionistas con cuencas pareadas.....	3
Figura 2. Evaluación de Impacto Ambiental y procesos de transformación del medio ambiente (Espinoza, 2001).....	4
Figura 3. Ubicación de las microcuencas seleccionadas para evaluar tecnologías conservacionistas en la cuenca del Lago de Pátzcuaro.....	5
Figura 4. Integración de sistemas físicos, biológicos y humanos en la dimensión ambiental (Espinoza, 2001).	6
Figura 5. Mapa de subdivisión en nanocuencas de las microcuencas pareadas de la cuenca del Lago de Pátzcuaro.....	7
Figura 6. Curvas hipsométricas características (extraído de Universidad de los Andes Venezuela, 2010).	10
Figura 7. Curvas hipsométricas de las microcuencas Ichupio y Malacate.	11
Figura 8. Tipo de caudales en base al perfil longitudinal.	12
Figura 9. Perfiles longitudinales de las microcuencas Ichupio y Malacate.....	13
Figura 10. Mapa de pendientes de las microcuencas Ichupio y Malacate.	14
Figura 11. Determinación de la orden de corrientes en una cuenca.....	15
Figura 12. Mapa de orden de corrientes de las microcuencas Ichupio y Malacate.	16
Figura 13. Mapa de edafología de las microcuencas pareadas de Ichupio y Malacate.....	19
Figura 14. Diagrama de flujo para generar una capa de uso de suelo y vegetación por microcuenca.	20
Figura 15. Mapa de cobertura de uso de suelo y vegetación de las microcuencas Ichupio y Malacate.....	21
Figura 16. Dimensiones del canal parshall para la microcuenca Ichupio obtenidos con el programa <i>msc Aforador</i>	29
Figura 17. Plano de diseño del canal parshall para la microcuenca Ichupio, Patzcuaro, Michoacán.....	30
Figura 18. Vista 3D con detalle del canal aguas abajo.	31
Figura 19. Vista del diseño en planta del canal parshall que muestra los 6 cortes que lo conforman.....	31
Figura 20. Vista del corte A-A del canal parshall.....	32
Figura 21. Vista 3D y dimensiones del Corte B-B del canal parshall.....	32
Figura 22. Acercamiento de planta de la caseta del canal parshall.....	33
Figura 23. Vista 3D y dimensiones del corte C-C del canal parshall.....	33

Figura 24. Acercamiento del corte A-A en la seccion de control del canal parshall.	34
Figura 25. Vista 3D y dimensiones del Corte D-D que incluye la caseta del canal parshall.....	34
Figura 26. Vista 3D y dimensiones del Corte F-F.	35
Figura 27. Partes que conforman el pluviómetro digital ONSET para registrar los eventos de lluvia.	37
Figura 28. Instalación del pluviómetro en la microcuenca Malacate.	37
Figura 29. Instalación del pluviómetro en la microcuenca Ichupio.	38
Figura 30. Limpieza del cauce para realizar el levantamiento topográfico.	39
Figura 31. Levantamiento topográfico del cauce.	39
Figura 32. Sección de un tramo del cauce de la microcuenca Malacate.	40
Figura 33. Diseño vertedor para la microcuenca Ichupio.....	41
Figura 34. Diseño de vertedor para la microcuenca Malacate.	41
Figura 35. Limpieza del cauce y trazo del vertedor para su construcción.	42
Figura 36. Serie de trabajos para la construcción del vertedor en la microcuenca Ichupio.....	43
Figura 37. Serie de trabajos para la construcción del vertedor en la microcuenca Malacate.....	43
Figura 38. Construcción de la caseta de la microcuenca Malacate.....	44
Figura 39. Construcción e instalación del panel solar.	45
Figura 40. Sensores ultrasónicos instalados en las microcuencas Ichupio y Malacate.....	46
Figura 41. Actividades de secuencia para extraer la información del pluviómetro digital.....	47
Figura 42. Vista de descarga de información del dataloger del pluviómetro digital.	48
Figura 43. Datos de precipitación diaria registrados del periodo de enero a diciembre de 2013 en la microcuenca Ichupio.	48
Figura 44. Obtención de información del sensor ultrasónico.....	49
Figura 45. Base de datos de la información del sensor ultrasónico archivada en el correo de <i>itelcel</i>	50
Figura 46. Precipitación diaria registrada en la microcuenca Ichupio durante el 2013.....	52
Figura 47. Precipitación diaria registrada en la microcuenca Malacate durante el 2013.....	53
Figura 48. Precipitación mensual registrada en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el 2013.....	53

Figura 49. Distribución mensual de eventos o días con lluvia registrados en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el 2013.	54
Figura 50. Distribución de eventos por rango de precipitación por microcuenca.	54

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Superficies de las nanocuencas que conforman las microcuencas Ichupio y Malacate.....	7
Cuadro 2. Parámetros físicos de las microcuencas Ichupio y Malacate requeridos para determinar las características morfológicas.....	8
Cuadro 3. Clasificación de orden de corriente de las microcuencas Ichupio y Malacate.....	15
Cuadro 4. Relación de bifurcación de las microcuencas Ichupio y Malacate.....	16
Cuadro 5. Densidad de drenaje de las microcuencas Ichupio y Malacate.	17
Cuadro 6. Densidad hidrográfica por microcuenca.....	18
Cuadro 7. Pendiente media del cauce principal de las microcuencas Ichupio y Malacate (incluye sus respectivas nanocuencas).	18
Cuadro 8. Uso de suelo y vegetación de las microcuencas Ichupio y Malacate.....	22
Cuadro 9. Ejemplo de cálculo de probabilidad de ocurrencia de la precipitación para el mes de agosto.....	24
Cuadro 10. Datos para cálculo de periodo de retorno de una estación tipo.	25
Cuadro 11. Periodos de retorno estimados por interpolación de los datos del Cuadro 10.....	25
Cuadro 12. Valores de coeficiente de escurrimiento de acuerdo a textura de suelo, topografía y vegetación.	26
Cuadro 13. Perfil del cauce de la microcuenca Ichupio.....	40
Cuadro 14. Precipitación (mm) diaria que se presentó durante el mes de septiembre de 2013 en las microcuencas Ichupio y Malacate.....	55
Cuadro 15. Información de los eventos de escurrimiento obtenida en la microcuenca Ichupio durante el 2013.....	56
Cuadro 16. Información de los eventos de escurrimiento obtenida en la microcuenca Malacate.....	56
Cuadro 17. Información de producción de sedimentos por evento de escurrimiento cuantificada por microcuenca durante el 2013.	57
Cuadro 18. Cuantificación de la producción de escurrimientos y sedimentos por evento, y degradación específica evaluada en la microcuenca Ichupio (con obras y prácticas de conservación) obtenidos en el 2013.....	58
Cuadro 19. Degradación específica, producción de sedimentos, escurrimientos y precipitación para la Microcuenca de Malacate (sin prácticas de conservación) obtenidos en el 2013.....	59

1. INTRODUCCIÓN

Para poder realizar una investigación sustentada y evaluar eficientemente los impactos ambientales que se logran con la implementación de las obras y prácticas, es necesario hacerlo continuamente por al menos tres años, periodo durante el cual se puede constatar y validar que las acciones que se han establecido están cumpliendo con el propósito que se establecieron que es el de disminuir la aportación de sedimentos al lago y propiciar la infiltración del agua de lluvia. Hatton et al. (2002), mencionan que el tiempo que tarda un ecosistema en responder a los programas de manejo varía dependiendo de la escala en la que se da este manejo. Así, por ejemplo, el impacto de la deforestación sobre el régimen hidrológico de una cuenca puede observarse en unos cuantos años si se trata de una microcuenca. Sin embargo, tratándose de una cuenca, los efectos de la deforestación pueden tomar varios años en manifestarse

El impacto de un programa (de reforestación, de obras y prácticas conservacionistas, de captación de agua de lluvia, etc.) en el corto, mediano y largo plazos debe ser evaluado continuamente, a fin de corregir cualquier desviación generada, ya sea por una mala implementación o por la aparición de efectos no previstos. Es por ello que se entra en una etapa de investigación y monitoreo que retroalimenta el proceso en su fase inicial. Este mecanismo de adaptar el esquema de manejo a las nuevas condiciones, se conoce como «manejo adaptativo» (Holling, 1973, 1978; Walters, 1986).

Durante el año 2012 el IMTA desarrolló un proyecto que contempló la instrumentación e instalación de vertedores de garganta larga para iniciar con la evaluación de impactos ambientales de tecnologías conservacionistas utilizando cuencas pareadas por medio de la cuantificación de los escurrimientos y la producción de sedimentos, de esta manera, quedaron plenamente instaladas y funcionando las microcuencas Ichupio (con prácticas conservacionistas) y Malacate (sin prácticas conservacionistas). Este proyecto surgió de la necesidad de generar el conocimiento y evaluar los impactos que se han logrado con el establecimiento de las prácticas y obras conservacionistas que se han venido estableciendo desde hace varios años en la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

De tal forma que siguiendo el protocolo propuesto por otros investigadores, es por eso que se decidió continuar con esta línea de investigación para de esta forma crear una base de datos con información precisa y robusta que permitirá describir con certeza el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento-erosión hídrica en microcuencas de la cuenca del Lago de Pátzcuaro, donde además, para este año se estará integrando el cuantificar la pérdida de nutrimentos del suelo en el escurrimiento para así generar información de las cantidades de nutrimentos que se transportan en el agua y que llegan al lago donde finalmente influyen en la eutroficación del mismo.

2. ALCANCES

Ante el crecimiento demográfico, han aparecido nuevos fenómenos relacionados con el uso del agua; dado que todo lo que hacemos repercute en el medio ambiente y no hay acciones materiales humanas que estén exentas de influir positiva o negativamente dentro de la cuenca, como la contaminación, los drenajes, la basura, los pozos, la extracción o depósito de materiales, líquidos o sólidos. En la cuenca del Lago de Pátzcuaro, se han implementado tecnologías conservacionistas en los recursos agua, suelo, bosque sin cuantificar los impactos ambientales que se han logrado con el establecimiento de éstas acciones, por lo que se hace necesario evaluar.

Ante esta problemática el presente informe se conforma de un Manual Técnico con el Proceso Metodológico para la Evaluación de Impactos Ambientales de Tecnologías Conservacionistas de Agua, Suelo, Bosque a Nivel de Microcuenca utilizando el Método de Cuencas Pareadas, contiene los conceptos, los pasos a seguir para establecer una microcuenca instrumentada, las necesidades de construcción y equipamiento e instrumentación que se requiere, además, del análisis de resultados obtenidos de eventos de escurrimiento en relación con producción de sedimentos y de pérdida de nutrimentos a nivel de microcuenca.

El proceso que se propone se basa en los siguientes aspectos:

- Asegurar que el proceso de evaluación sea destinado a identificar y corregir con anticipación los impactos ambientales negativos derivados del manejo inadecuado de cuencas.
- Asegurar que los recursos y elementos ambientales susceptibles de ser afectados se describan y evalúen considerando todas las medidas destinadas a su protección.
- Y alcanzar una evaluación amplia y acertada de los recursos ambientales involucrados en las cuencas, para lograr un equilibrio en el proceso de toma de decisiones. De ahí la importancia de incluir el análisis desde las primeras etapas del proceso.

3. OBJETIVO

Elaborar un Manual Técnico que contenga el proceso metodológico para evaluar los impactos en materia de control de pérdida de suelo, retención de azolves, infiltración de lluvia y pérdida de nutrimentos, como resultado de la aplicación o no aplicación de tecnologías conservacionistas a nivel de microcuenca.

4. MANUAL TÉCNICO DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS CONSERVACIONISTAS CON CUENCAS PAREADAS

El Manual se integra por nueve etapas que considera realizar actividades a nivel de gabinete y campo. Las etapas se presentan en el siguiente diagrama de flujo (Figura 1):

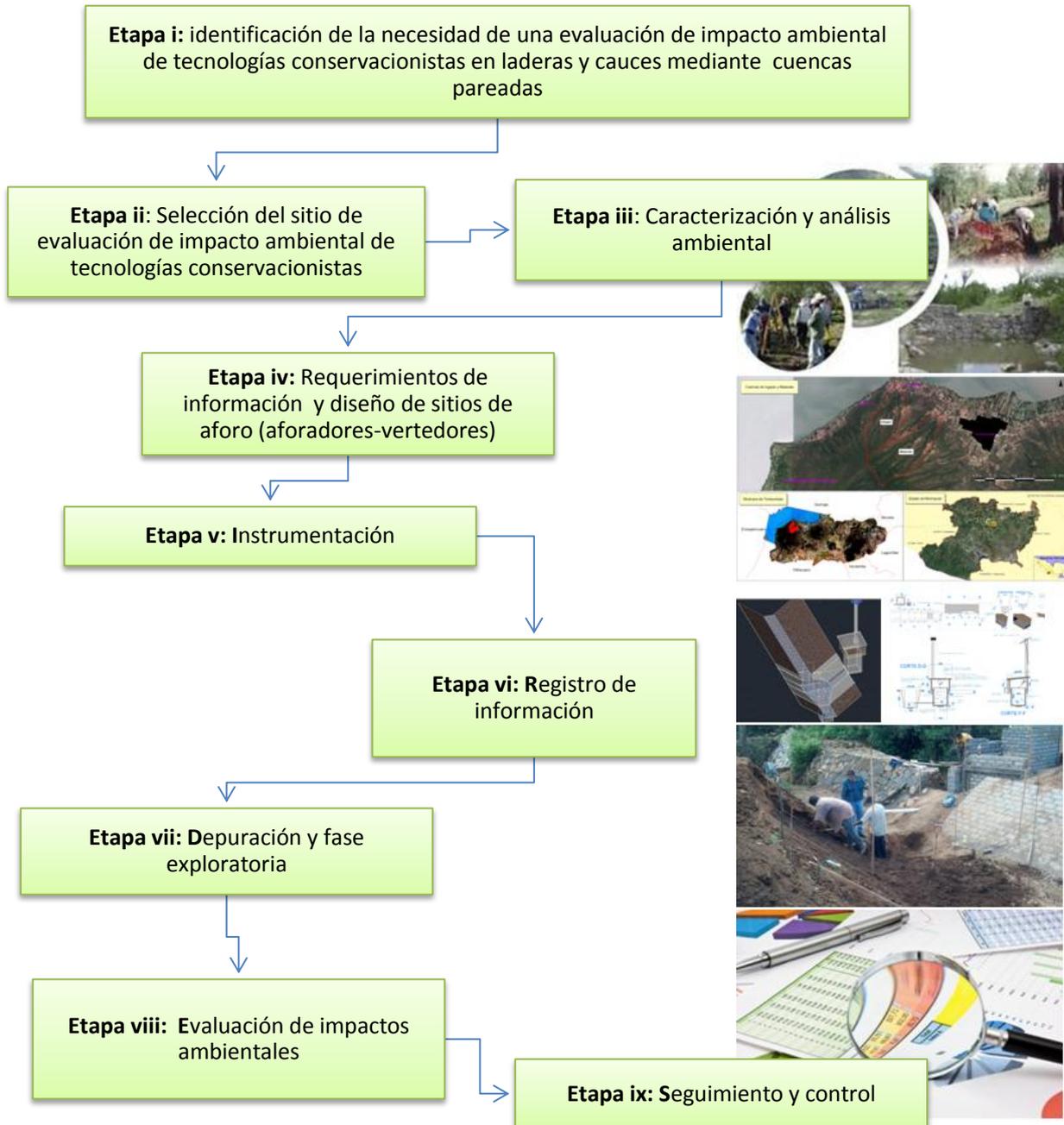


Figura 1. Etapas que conforman la metodología de evaluación de impactos ambientales de tecnologías conservacionistas con cuencas pareadas.

El procedimiento que se debe seguir para establecer cuencas pareadas se compone de diferentes etapas, mismas que a continuación se describen y para ejemplificar su aplicación se considera su ejecución en microcuencas de la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Etapa I: Identificación de la necesidad de una evaluación de impacto ambiental de tecnologías conservacionistas en laderas y cauces mediante cuencas pareadas

La evaluación de impacto ambiental permite comparar las situaciones ambientales existentes con aquellas que surgirían como resultado del desarrollo de una acción en particular. La comparación sirve para identificar tanto los impactos positivos y los beneficios ambientales que surgen de realizar el proyecto que se está evaluando, como aquellos de carácter negativo que deben manejarse para evitar la degradación del medio ambiente (Figura 2).

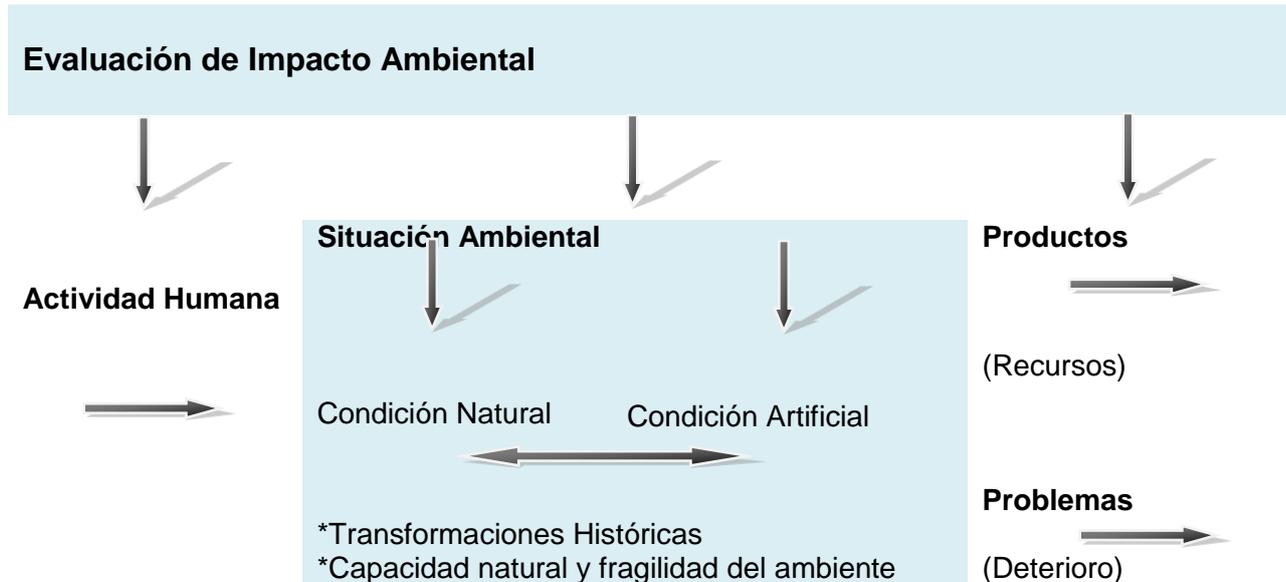


Figura 2. Evaluación de Impacto Ambiental y procesos de transformación del medio ambiente (Espinoza, 2001).

De acuerdo con García-Oliva F. (2012) en la evaluación de proyectos ambientales, la variabilidad temporal constituye uno de los principales problemas asociados con la variación de la precipitación. Este problema lo presentan sitios cuya cantidad y distribución de lluvia durante el año depende de fenómenos aleatorios, tales como los ciclones, huracanes, etc. Para evitar este tipo de problemas se ha implementado el método de cuencas pareadas que consiste en medir dos cuencas durante varios años para poder definir mediante regresiones el tipo de relación que hay entre ambas.

Posteriormente, se aplica el manejo sobre una de ellas y se estima su valor previo al proyecto utilizando las regresiones elaboradas con la parcela no manejada. El problema de este método es que puede ser costoso, ya que hay que estar midiendo ambas unidades durante varios años, tanto antes como después del manejo.

Etapa II: Selección del sitio de evaluación de impacto ambiental de tecnologías conservacionistas

Se seleccionan dos microcuencas preferentemente contiguas, una de ellas corresponde a la microcuenca de evaluación para este caso donde se han establecido prácticas y obras conservacionistas. La otra es la microcuenca "testigo" que corresponde a la microcuenca donde no se han realizado acciones y obras conservacionistas. Es importante que estas unidades hidrográficas se localicen cerca de

algunas poblaciones y que además sean accesibles, de lo contrario los costos de instrumentación y seguimiento podrían elevarse.

Por otro lado, para ubicar el sitio de salida de cada microcuenca se debe hacer en gabinete primeramente una aproximación de acuerdo a la información cartográfica que se disponga. Pero para definir el sitio final donde se establecerá el vertedor de salida, se debe complementar mediante recorridos de campo ya que es necesario que el sitio final reúna algunos criterios técnicos que son los siguientes:

- Que el cauce presenta un tramo más o menos recto con una longitud de al menos 40 metros.
- Que la pendiente del cauce sea uniforme y no sea mayor del 2.5%.
- Que las secciones del cauce sean similares y uniformes en el tramo de llegada.

Una vez que en campo se define el sitio final de acuerdo a cumplir con los criterios anteriores, se procede a ubicarlo con el apoyo de un GPS, para posteriormente ubicarlo en los planos topográficos y con el apoyo de las curvas a nivel se delimita el parteaguas de cada microcuenca.

Para el caso de la cuenca de Pátzcuaro se seleccionaron dos microcuencas cercanas una de la otra, se eligieron porque en una de ella se establecieron obras y prácticas conservacionistas y en la otra no.

En la Figura 3 se presenta la ubicación de las microcuencas pareadas donde se visualiza sus caminos de acceso y poblaciones, ya que es indispensable su pronto acceso para la toma de información y para la constante vigilancia y cuidado de los equipos e instrumentos que se van a colocar.

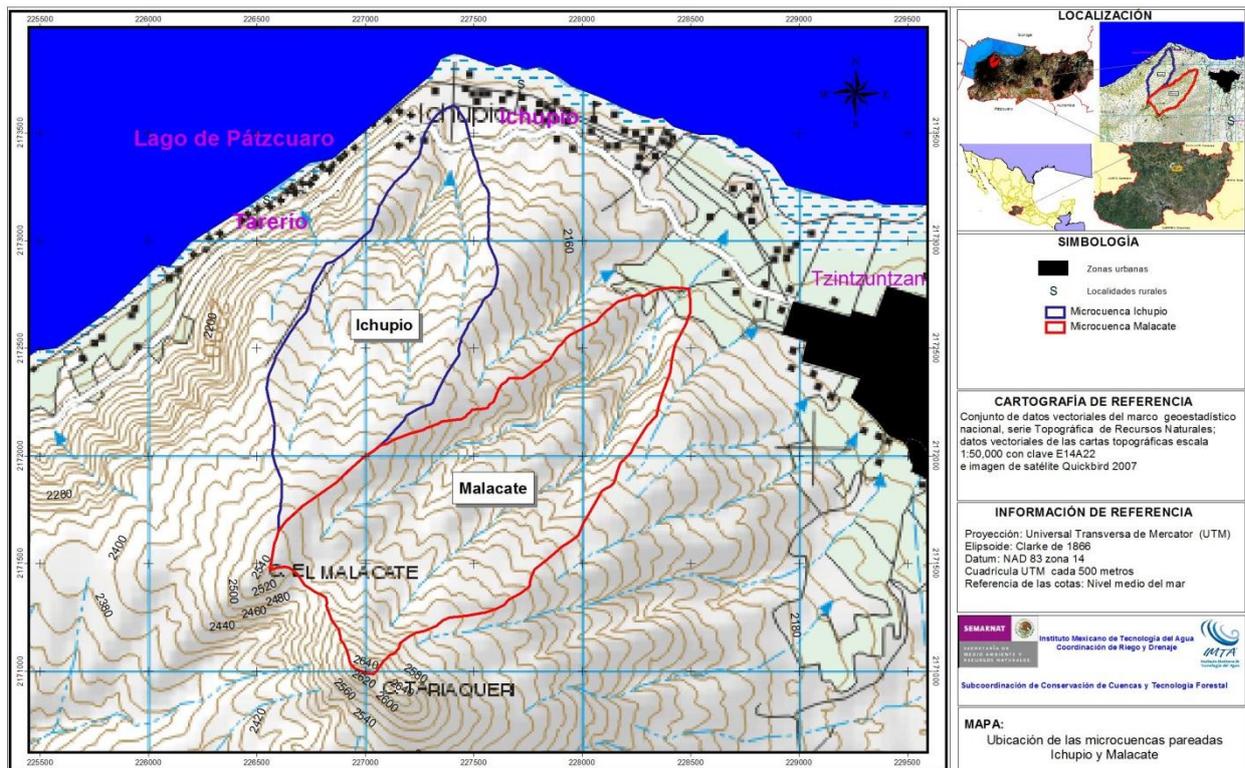


Figura 3. Ubicación de las microcuencas seleccionadas para evaluar tecnologías conservacionistas en la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Etapa III: Caracterización y Análisis ambiental

En esta etapa, lo que se busca es asegurar que los recursos y elementos ambientales que se encuentran en las microcuencas que son susceptibles de ser afectados, se describan y evalúen.

Con la caracterización se determina su situación actual, considerando que el ambiente es un complejo sistema natural o transformado en el que vive la humanidad, con todos sus aspectos sociales y biofísicos y las relaciones entre ellos. Y es por eso que los sistemas que se encuentran en la cuenca interactúan entre sí, y es que siempre los recursos que encontramos en una cuenca son aprovechados de distintas formas por sus habitantes por lo que no pueden desligarse unos de los otros (Figura 4).

La dimensión ambiental debe analizarse, en un sentido amplio, tanto en sus aspectos naturales (como el suelo, la flora, la fauna) como de contaminación (aire, agua, suelo, residuos), de valor paisajístico, de alteración de costumbres humanas y de impactos sobre la salud de las personas

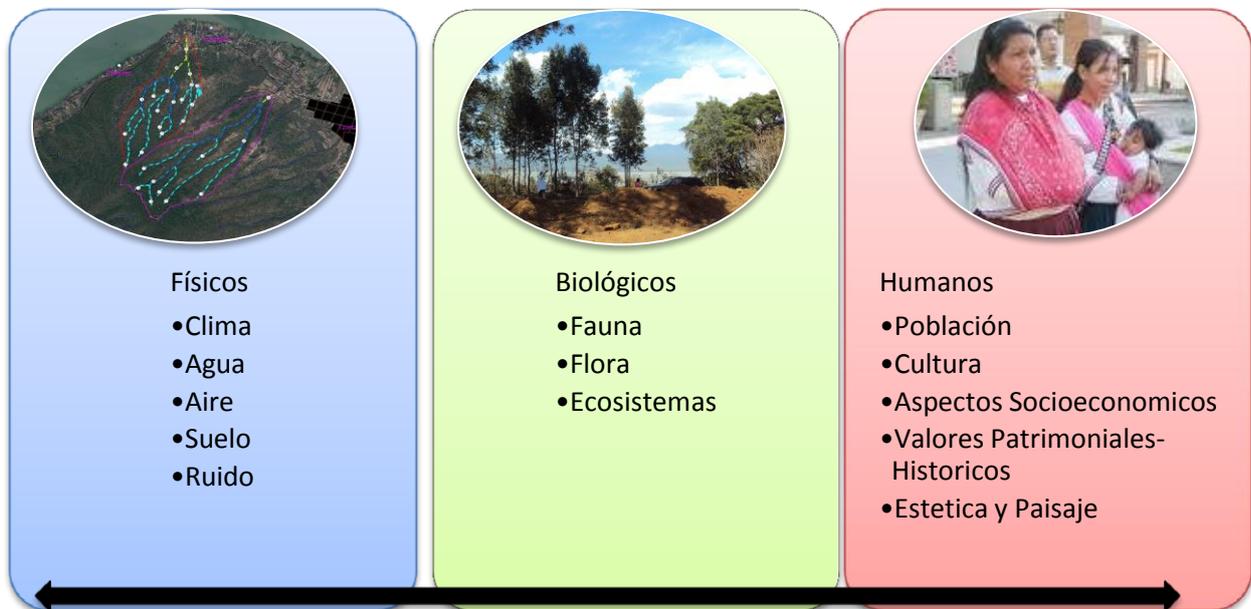


Figura 4. Integración de sistemas físicos, biológicos y humanos en la dimensión ambiental (Espinoza, 2001).

Para realizar ésta etapa primero se caracteriza el medio físico de las microcuencas pareadas. En los siguientes apartados se presenta la descripción y el cómo se calculan los parámetros para llevar a cabo la caracterización física.

3.1. Delimitación de las microcuencas y subdivisión en nanocuencas

Como se mencionó, una vez que se define el punto de salida a partir de ahí se delimita cada una de las microcuencas. Sin embargo, para efectos de conocer las distintas unidades de escurrimiento que conforman cada microcuenca, éstas se subdividen en nanocuencas debido a que algunos procesos asociados al recurso agua (escurrimiento, la calidad del agua, la erosión hídrica y la producción de sedimentos) se analizan por medio de estas unidades hidrográficas.

Microcuenca	Nanocuenca	Superficie	
		ha	Porcentaje respecto a su microcuenca
	G-G	3.71	3.64
Malacate	I-A	77.62	52.01
	I-B	61.12	40.95
	I-C	3.71	2.49
	I-X	6.79	4.55
		149.25	

3.1.1. Descripción de las características morfológicas de la cuenca

De acuerdo con el Departamento Técnico de Administración del Medio Ambiente (2012), la morfometría de cuencas hidrográficas y de drenajes es una herramienta que permite determinar características de forma y comportamientos en el entorno. Estas cobran importancia para asegurarse de que las características de las cuencas de interés son altamente semejantes y por lo tanto el efecto de un manejo diferente en una de ellas se verá reflejado en la producción de escurrimiento y sedimentos a la salida de las cuencas.

A continuación se describen algunos de los parámetros físicos que se determinan para las microcuencas pareadas donde se toma como base información esencial como: el área de la cuenca, el perímetro, la longitud del cauce principal, longitud de cauces, número de cauces, etc.

La información de cada microcuenca se presenta en el siguiente Cuadro 2.

Cuadro 2. Parámetros físicos de las microcuencas Ichupio y Malacate requeridos para determinar las características morfológicas.

Nombre y Unidades del parámetro	Valor del parámetro por microcuenca	
	Microcuenca Ichupio	Microcuenca Malacate
Superficie (km ²)	1.02	1.49
Longitud del cauce principal (km)	2.27	2.32
Perímetro (km)	4.77	5.76

3.1.1.1. Índice de forma

Es un índice que permite establecer la tendencia morfológica general; a través de la relación que existe entre el largo de la cuenca y su ancho; ambas magnitudes son en línea recta y en promedio. Una cuenca tiende a ser alargada si el factor de forma tiende a cero, mientras que su forma es redonda en la medida que el factor forma tiende a uno, por consiguiente aquellas cuencas con formas alargadas, tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación de la cuenca más rápida y un mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base.

La fórmula para calcular el Índice de Forma es:

$$If = \frac{A}{Lc^2}$$

Donde I_f es el Índice de forma (adimensional), A es el área de la cuenca expresada en km^2 y L_c representa la longitud del cauce principal (km^2).

Las Microcuencas Ichupio y Malacate presentan un índice de forma de 0.2 y 0.28 respectivamente, lo que indica que son alargadas, este tipo de forma influye en una alta velocidad de su flujo de agua.

3.1.1.2. Coeficiente de compacidad (K_c)

El coeficiente de compacidad es una relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia con la misma superficie de la cuenca. Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similaridad con formas redondas, y se clasifica dentro de rangos que se muestran a continuación (FAO, 1985):

Clase K_c1 : Rango entre 1 y 1.25. Corresponde a forma redonda a oval redonda

Clase K_c2 : Rango entre 1.25 y 1.5 Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga

Clase K_c3 : Rango entre 1.5 y 1.75 Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

El coeficiente de compacidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_k = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}}$$

Donde C_k es el Coeficiente de compacidad (adimensional), A es el área de la cuenca expresada en km^2 y P es el perímetro de la cuenca expresado en km .

Considerando el valor de coeficiente de compacidad que se obtiene para ambas microcuencas que es de 1.32, se tiene entonces que las microcuencas Ichupio y Malacate tienen forma oval oblonga.

3.1.1.3. Proporción de elongación

Este es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, su tendencia a ser de forma alargada, en relación a su longitud axial, y al ancho máximo de la cuenca. Aquellas cuencas que presentan valores mayores o cercanos a uno, presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada, que la de aquellas donde la proporción entre largo y ancho de la cuenca. Al igual que el índice anterior proporciona una idea de la dinámica rápida o lenta del agua en los drenajes y su potencial erosivo o de arrastre.

Se determina mediante la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L_c}$$

Donde P_e es la proporción de elongación (adimensional), A es el área de la cuenca expresada en km^2 y L_c es la Longitud del cauce principal (km).

El cálculo de la proporción de elongación arrojó que las microcuencas Ichupio ($P_e=0.50$) y Malacate ($P_e=0.59$) no tienen una forma completamente alargada ni redonda, esto se debe a que en la parte alta son más anchas.

3.1.1.4. Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica se define como la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, se construye colocando en el eje de las abscisas las longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca (en km^2 o en porcentaje) comprendidas entre curvas de nivel consecutivas hasta alcanzar la superficie total, y en el eje de las ordenadas se coloca la cota de las curvas de nivel consideradas.

Esta curva representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca; también podría verse como la variación media del relieve de la cuenca. El gráfico es adimensional es muy útil en hidrología para el estudio de similitud entre dos cuencas, cuando ellas presentan variaciones de la precipitación y de la evaporación con la altura. Las curvas hipsométricas también han sido asociadas con las edades de las cuencas (Universidad de los Andes Venezuela, 2010).

La Figura 6 presenta de manera gráfica las curvas hipsométricas características de una cuenca joven, madura y en etapa senil.

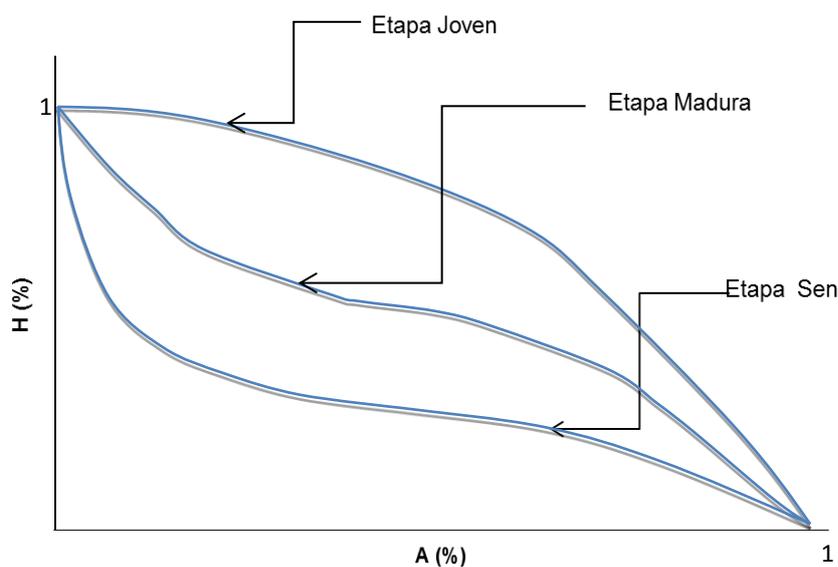
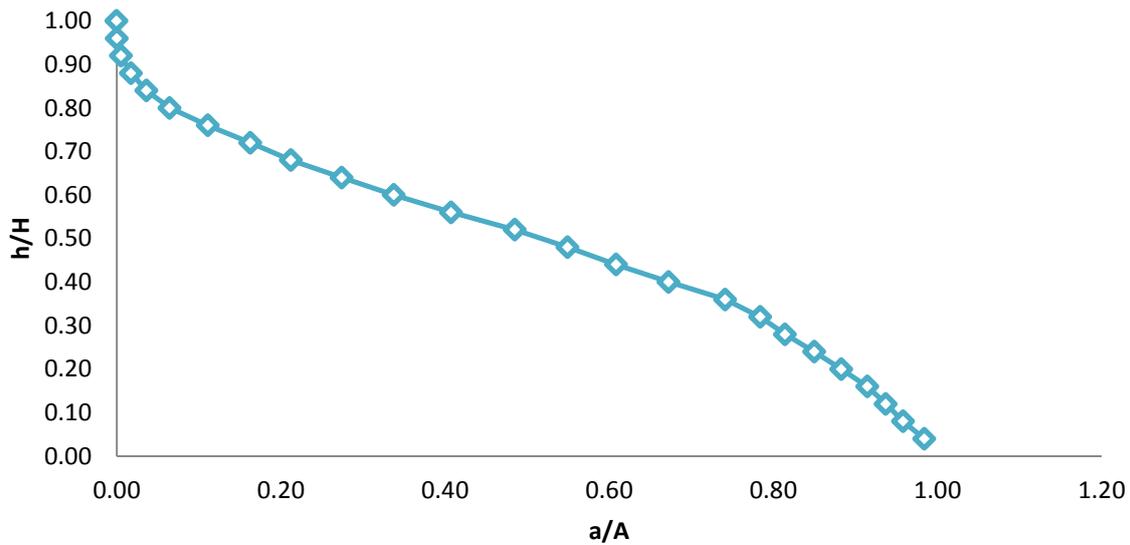


Figura 6. Curvas hipsométricas características (extraído de Universidad de los Andes Venezuela, 2010).

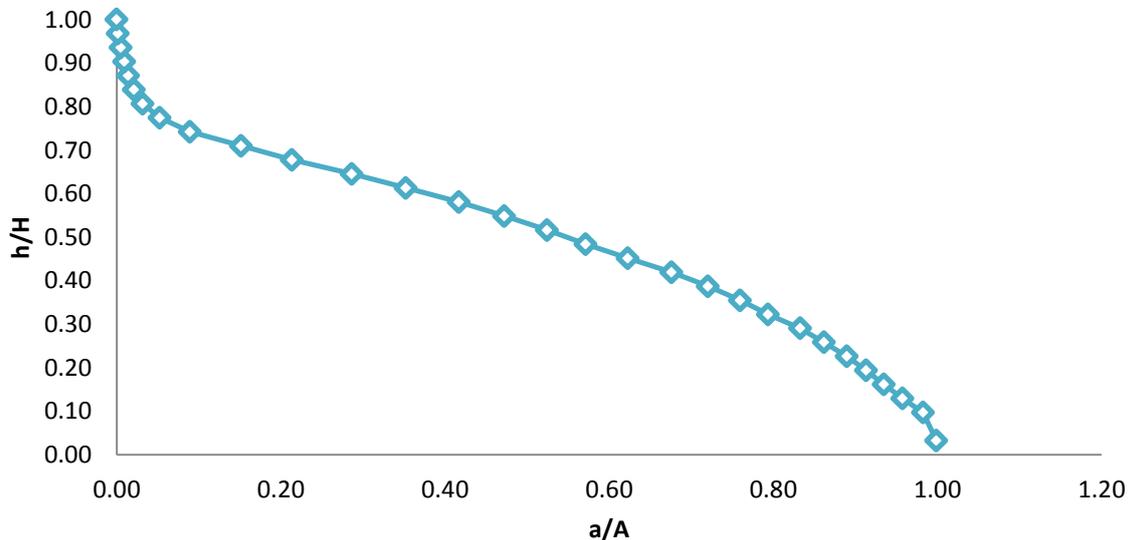
Siguiendo la metodología se obtuvieron las curvas hipsométricas de las dos microcuencas y se presentan en la Figura 7. Al realizar la comparación con la Figura 6 se concluye que ambas microcuencas se encuentran en una etapa madura.

3.1.1.5. Perfil longitudinal

El perfil longitudinal reflejará la pendiente de cada tramo, que es determinada por las condiciones impuestas por el tramo aguas arriba. En general los perfiles longitudinales de los ríos presentan forma cóncava con una pendiente que va disminuyendo desde zonas con mayor erosión hasta zonas de mayor sedimentación de las zonas bajas.



Curva Hipsométrica de la Microcuenca Ichupio



Curva Hipsométrica de la Microcuenca Malacate

Figura 7. Curvas hipsométricas de las microcuencas Ichupio y Malacate.

La pendiente del cauce disminuye a medida que aumenta la superficie de la cuenca vertiente. También ocurre que para una misma superficie vertiente, la pendiente del cauce guarda una estrecha relación con el tamaño de los materiales de arrastre, de tal modo que tramos altos y de gran pendiente tendrán asociados tamaños de materiales grandes, mientras que tramos bajos se asocian a materiales pequeños.

De tal modo que la disminución de la pendiente aguas abajo explica en gran medida porque sucede la sedimentación.

Hay varias explicaciones que justifican la reducción de tamaño de los materiales de arrastre aguas abajo, fundamentalmente los procesos de abrasión en los que el tamaño del sedimento va disminuyendo a medida que aumenta la distancia del cauce debido a la meteorización, fricción y desgaste. Unido a esto se da un proceso de clasificación natural de sedimentos por tamaños llegando más lejos los de menor tamaño.

La pendiente tiende a ser mayor en tramos que discurren sobre sustratos duros por su resistencia a la erosión. También se pueden dar cambios bruscos de pendiente “Knickpoint” en zonas de confluencia de ríos, cambios geológicos y procesos erosivos generados por actividades humanas.

Cabe mencionar que la pendiente es quizás una de las variables principales en el proceso de ajuste o adaptación del cauce ante cambios del régimen de caudales. Hay gran cantidad de variables determinadas por la pendiente del cauce, entre ellas tenemos como más importantes: el caudal, la carga de sedimentos, tamaño del sedimento, geología del terreno; también se usan para estudios de prefactibilidad de proyectos hidroeléctricos, ubicación de posibles sitios susceptibles de avalanchas, etc.

El gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del río principal es denominado perfil longitudinal. Con base en la forma del perfil altimétrico del río se pueden inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica, se ha observado que en cuencas con pendientes altas el cauce principal tienden a tener hidrógramas con gastos más elevados y más cortos que cuencas con pendientes menores, por efecto de la inclinación de la pendiente presentan caudales más altos como se observa en la Figura 8.

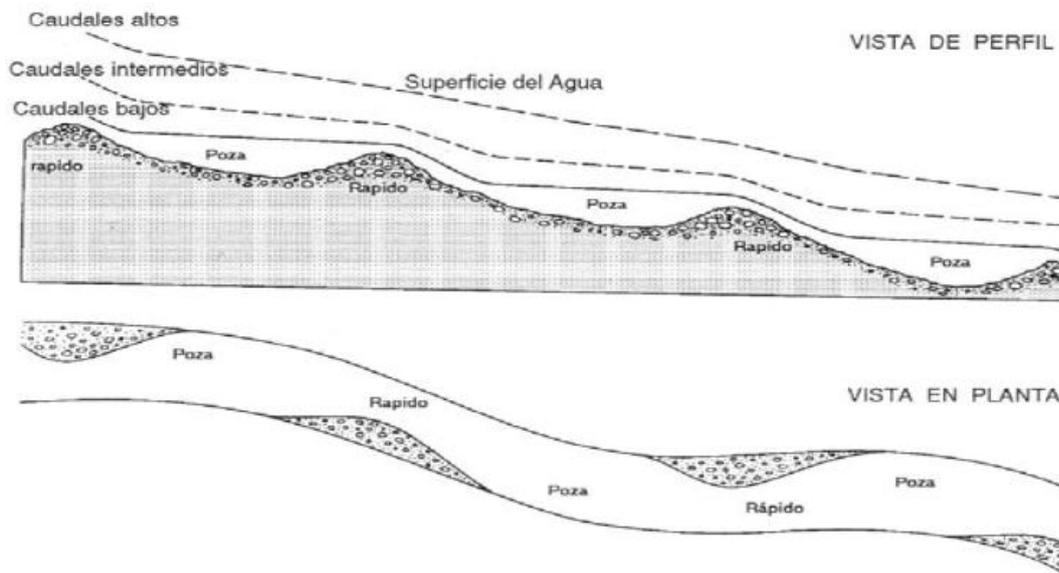


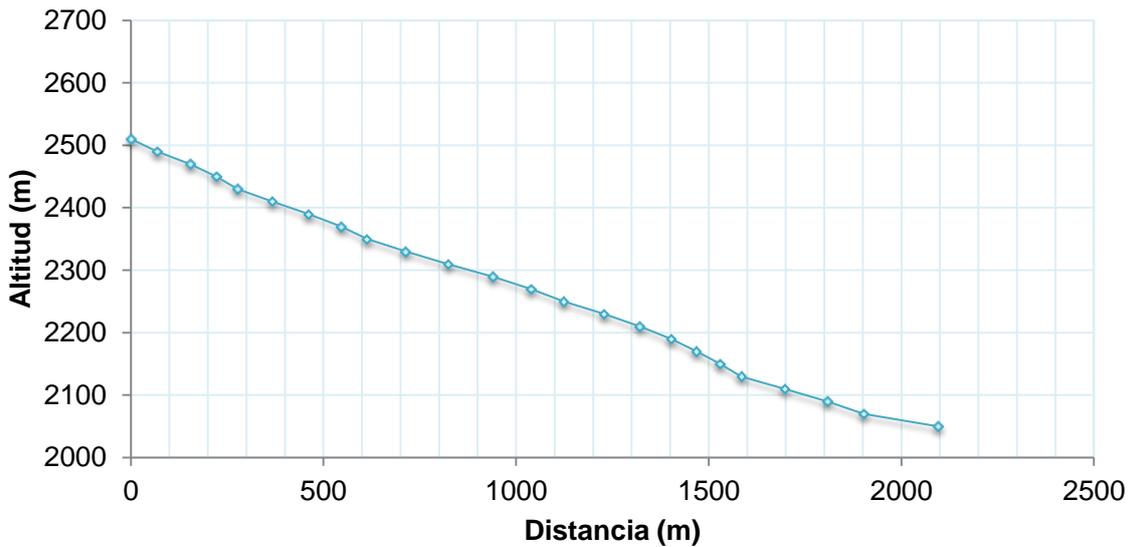
Figura 8. Tipo de caudales en base al perfil longitudinal.

Se obtuvo el perfil longitudinal en ambas microcuencas y estos se presentan en la Figura 9. Al comparar los perfiles entre las microcuencas, se deduce que los caudales que se producen son gastos elevados, también se observa un alto grado de pendiente, aunque es un poco más pronunciado en la microcuenca Ichupio que en la microcuenca Malacate.

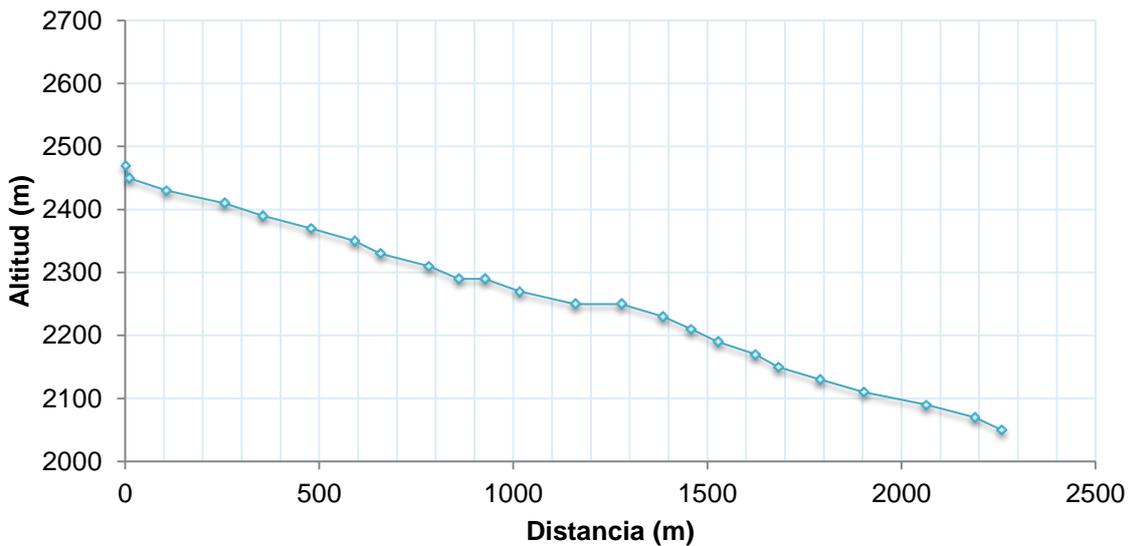
3.1.1.6. Frecuencias altimétricas

La elevación media de la cuenca es una característica fisiográfica que resulta del promedio entre el valor de elevaciones de cierto número de puntos dentro de la cuenca; tiene especial interés en zonas montañosas pues nos puede dar una idea de la climatología de la región, basándonos en un patrón general climático de la zona. La elevación promedio está referida al nivel del mar.

Para conocer la altitud media se puede realizar por medio de modelos digitales de elevación, y mediante un SIG como el ArcView se obtienen los datos estadísticos de la capa *grid* de altitud de cada una de las microcuencas. Es así como se obtuvo la altitud media de la microcuenca Ichupio que es de 2,286 msnm, mientras que en la microcuenca Malacate es de 2352.87 msnm.



Perfil longitudinal de la microcuenca Ichupio



Perfil longitudinal de la microcuenca Malacate

Figura 9. Perfiles longitudinales de las microcuencas Ichupio y Malacate.

3.1.1.7. Porcentaje de pendiente

MOPT (1991) establece cinco categorías de pendiente: considera pendiente plana de 0° a 1° que corresponde a pendientes menores de 1.74%, pendiente suave en el rango de 1° a 3° (1.74%-5.24%), moderada de 5° a 15° (8.74%-26.74%) y pendiente fuerte mayor de 15° (26.74%).

Para conocer la pendiente en porcentaje de la microcuenca, primero se obtiene el modelo de elevación digital con pixel de 10m a partir de las curvas de nivel equidistantes cada 20 metros en el SIG ArcGis9 o ArcView donde se interpola; al archivo *grid* resultante se le calcula su pendiente promedio aplicando el programa ArcGis9 y su Tan^{-1} para convertir a radianes y finalmente se multiplica por 100 para obtener en porcentaje.

De acuerdo con los datos estadísticos de porcentaje de pendiente obtenidas a partir de la capa de formato *grid*, las microcuencas tienen una pendiente media calificada como moderada (microcuenca Ichupio de 18.0% y la microcuenca Malacate de 22.4%), sin embargo, se encuentran valores extremos que indican la presencia de pendientes muy abruptas sobretodo en la parte alta de ambas microcuencas, lo cual se observa a detalle en el mapa de la Figura 10.

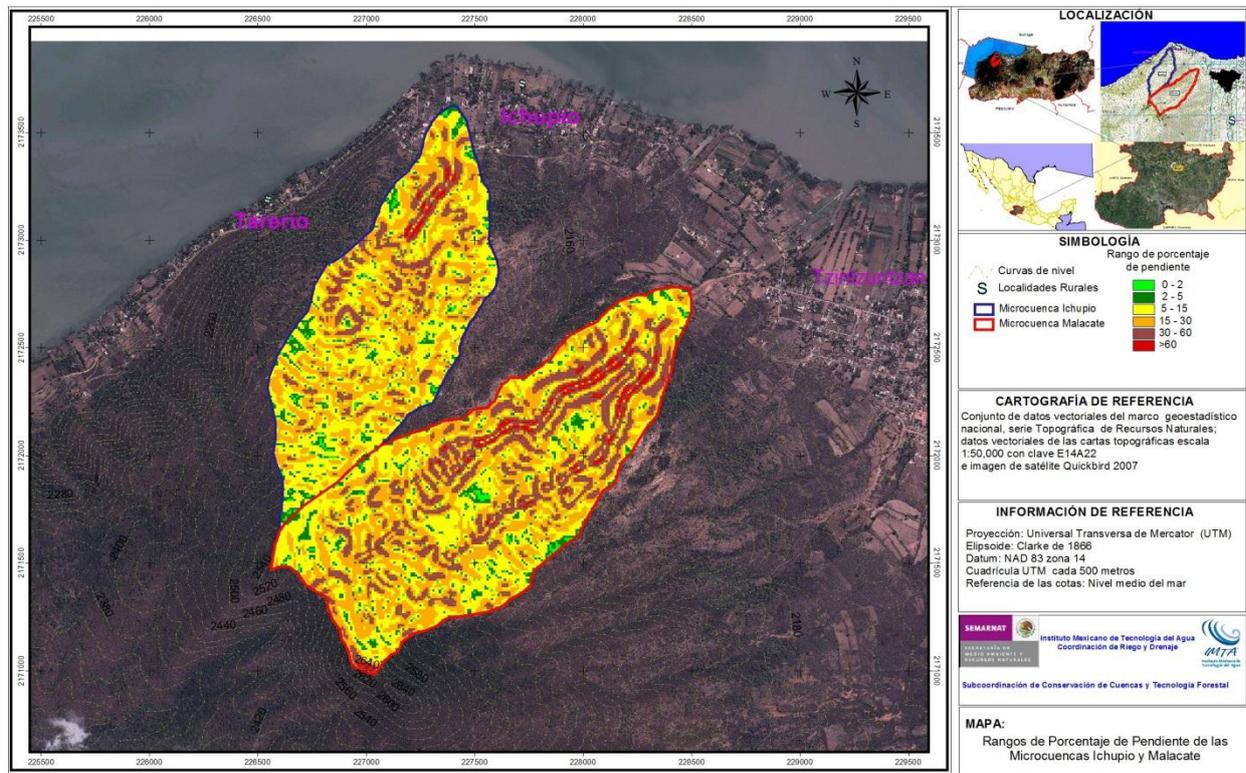


Figura 10. Mapa de pendientes de las microcuencas Ichupio y Malacate.

3.1.2. Morfometría de la red de drenaje

Las características de la red de drenaje de una cuenca dan a conocer la dinámica de la regulación hídrica en una unidad hidrográfica en particular. Esta caracterización se sujeta a la disponibilidad de información y limitantes técnicas, como la ausencia de información de gastos, de niveles de sedimentación, de dimensiones de secciones de cauces, etc., que podrían enriquecer el conocimiento sobre los arroyos y ríos más importantes. Las características de la red de drenaje permiten deducir la interacción entre el sistema fluvial y otras características ambientales de la cuenca tales como geología, tipos de pendiente y relieve, suelos predominantes e impermeabilidad, vegetación dominante y uso de suelo, entre otro.

A continuación se describen algunos de los parámetros que se determinan en las microcuencas pareadas, como son la altitud mínima y máxima del cauce principal, además de clasificar el orden de corrientes y contabilizar el número de corrientes por orden, así como, conocer la longitud por orden de corrientes.

3.1.2.1. Ordenes de las corrientes

Es el nivel de importancia de una corriente o un río que aumenta a medida que tiene más afluentes con orden menor, hasta llegar a una corriente mayor. Este indicador también permite definir la disponibilidad de agua combinado con el régimen de los cauces, ya que a medida que una corriente aumenta su orden indica un aumento en el número de sus tributarios, hasta llegar al nivel de base a una corriente de orden mayor.

Para obtener el orden de las corrientes, la red hídrica se subdivide en los diferentes cursos del agua asignando valores numéricos de la siguiente manera: Los cauces nacientes de la red se les asignan el valor 1. Cuando se unen dos o más cauces de orden 1, implica que la red de drenaje aumenta de magnitud por lo que a partir del lugar de confluencia se le asigna el valor 2. En el lugar de encuentro entre dos cauces de orden 2 implica que la magnitud de la red de drenaje vuelve a ascender por lo que el valor numérico correspondiente a partir de allí es 3. Así se procede sucesivamente hasta finalizar con la jerarquización de la red de drenaje. En ejemplo de aplicación se muestra en la Figura 11 que para el caso la cuenca es de orden 4.



Figura 11. Determinación de la orden de corrientes en una cuenca.

En la Figura 12 y Cuadro 3 se presenta la clasificaciones de corrientes de las microcuencas Ichupio y Malacate; se obtuvo que la microcuenca Ichupio se considera una microcuenca de 4^{to} orden mientras que la microcuenca Malacate de 3er orden. La microcuenca Ichupio tiene dieciséis corrientes de primer orden, cinco de segundo y dos de tercer orden. La microcuenca Malacate únicamente tiene siete corrientes de primer orden, dos de segundo orden y una corriente de tercer orden.

La microcuenca de Ichupio tiene el doble de corrientes que Malacate en todos los ordenes de la clasificación.

Cuadro 3. Clasificación de orden de corriente de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Microcuenca	Número de corrientes de acuerdo a su orden			
	1	2	3	4
Malacate	7	2	1	0
Ichupio	16	5	2	1

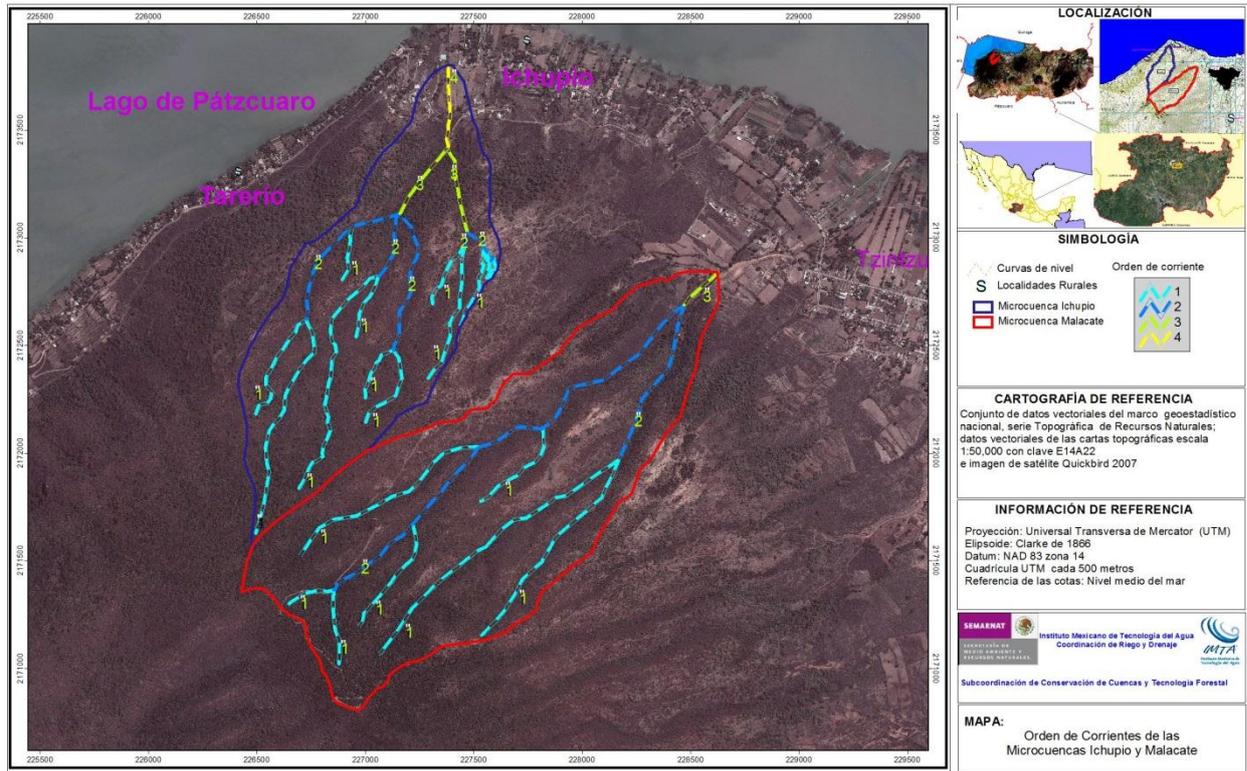


Figura 12. Mapa de orden de corrientes de las microcuencas Ichupio y Malacate.

3.1.2.2. La ley de bifurcación

Se establece a partir de la relación existente entre el número de segmentos de un orden dado y los de orden inmediatamente superior. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{N_U}{N_{U+1}}$$

Donde N_U son las corrientes del orden de interés y N_{U+1} las corrientes del orden siguiente.

La relación de bifurcación permite comprender algunas variaciones geológicas que se producen en el territorio de la cuenca, fundamentalmente cambios importantes en el sustrato rocoso y de los grupos de suelos dominantes. Las cuencas cuya relación de bifurcación permanece constante, indican homogeneidad en las características geológicas anteriores. La relación de bifurcación generalmente es entre 3 y 5 cuando son cuencas con variaciones considerables en sus características geológicas.

Las microcuencas Ichupio y Malacate presentan una relación de bifurcación de 2.57 y 2.75, respectivamente (Cuadro 4), lo que indica que el material geológico no presenta grandes variaciones.

Cuadro 4. Relación de bifurcación de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Microcuenca	Estimación de la relación de bifurcación			Relación de bifurcación media
	1°/2°	2°/3°	3°/4°	
Malacate	3.50	2.00		2.75
Ichupio	3.20	2.50	2.00	2.57

3.1.2.3. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se refiere a la longitud de ríos o corrientes por unidad de área. Principalmente se utiliza para determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca en cada uno de sus sectores, asumiendo directa proporcionalidad entre la densidad y la disponibilidad de agua en un área determinada. En este caso, se aplica para los cauces principales de cada microcuenca.

La densidad de drenaje se obtiene a partir del cociente entre la longitud de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca, expresados en kilómetros y el área total de la cuenca o microcuenca expresada en kilómetros cuadrados. Se calcula con apoyo de la siguiente expresión:

$$Dd = \frac{Lc}{A}$$

Donde Lc es la longitud de corrientes de diferente orden y A es el área de la cuenca en (km^2).

La densidad de drenaje también expresa las características geoecológicas del territorio de la cuenca. Los factores que controlan la densidad de drenaje son: la litología del sustrato, la permeabilidad del suelo y la capacidad de infiltración, la cobertura vegetal y tipo de la misma. Estas características deben evaluarse en forma global ya que una alta densidad de drenaje expresa materiales geológicos friables, suelos relativamente impermeables o escasa cobertura vegetal. Constituye por lo tanto un indicador del potencial de erosividad intrínseco al territorio en estudio.

Los materiales geológicos duros y resistentes tales como el granito, gneiss, arenisca y cuarcitas, tienden a originar BAJAS DENSIDADES de drenaje. Esto es debido a que la erosión fluvial es difícil dadas las características de los materiales que son poco erosionables. En materiales blandos, tales como margas y arcillas, las cuencas por pequeñas que sean, pueden suministrar la escorrentía suficiente como para erosionar el cauce. Los materiales muy permeables, como las arenas o las gravas tienden a originar bajas densidades de drenaje, dado que la infiltración es grande. Una roca débil producirá mucha menos densidad de drenaje en un clima húmedo, donde una espesa cobertura vegetal protege el material subyacente que en una región árida, donde no existe dicha cobertura.

En el Cuadro 5 se presenta la densidad de drenaje para cada microcuenca.

Cuadro 5. Densidad de drenaje de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Microcuenca	Longitud de corrientes de diferentes ordenes (km)	Superficie (km^2)	Densidad de drenaje (km de cauce por km^2)
Malacate	7.36	1.02	7.22
Ichupio	7.95	1.49	5.32

3.1.2.4. Densidad hidrográfica

La densidad hidrográfica es la relación que existe entre el número de corrientes y el área de drenaje. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{N_c}{A}$$

Donde N_c es el número de corrientes de diferentes órdenes y A es el área de la cuenca en (km^2).

La microcuenca Ichupio presenta mayor densidad hidrográfica que la microcuenca Malacate por una diferencia de 2.55 cauces por km^2 como se visualiza en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Densidad hidrográfica por microcuenca.

Microcuenca	Numero de corrientes de diferentes ordenes	Superficie (ha)	Superficie (km ²)	Densidad hidrográfica (cauces por km ²)
Malacate	10	101.94	1.02	9.81
Ichupio	24	194.25	1.94	12.36

3.1.2.5. Pendiente media del cauce principal

Establece la inclinación promedio que tienen las corrientes o ríos desde su nacimiento hasta su desembocadura, o en algunos casos, hasta su salida de la cuenca. Se convierte en una base para determinar aspectos importantes como la capacidad de arrastre de sedimentos de distintos tamaños, área de posible inundación en crecidas, tiempo de concentración, etc.

La pendiente media del cauce principal de la cuenca se puede estimar mediante la fórmula siguiente:

$$P = \left[\frac{H}{L} \right] * 100$$

%P = Pendiente media

H = Desnivel entre la zona de emisión y el sitio MÁS ALEJADO de la cuenca (m)

L = Longitud a lo largo del cauce entre la zona de emisión y el sitio MÁS ALEJADO (m)

El porcentaje de pendiente del cauce principal de la microcuenca Ichupio es de 20.34%, por tanto, es 2.19% más que el porcentaje de la microcuenca Malacate ya que su pendiente media es de 18.15%. La mayoría de las nanocuenas tienen cauces con una pendiente media de 19% al 27%, a excepción de las nanocuenas que prácticamente se ubican en la salida, como la G-F en la microcuenca Ichupio y la I-C en la microcuenca Malacate, cuyo porcentaje de pendiente es menor a 10% (Cuadro 7).

Cuadro 7. Pendiente media del cauce principal de las microcuencas Ichupio y Malacate (incluye sus respectivas nanocuenas).

Microcuenca	Nanocuenca	Longitud del cauce (m)	Altura msnm (m)		Pendiente media (%)
			Max	Min	
Ichupio	G-A	1,271.79	2,432.66	2,149.08	22.30
	G-CA	825.89	2,380.58	2,212.43	20.36
	G-D	323.09	2,143.20	2,081.45	19.11
	G-EA	547.00	2,312.27	2,162.30	27.42
	G-EB	168.23	2,160.07	2,082.25	46.26
	G-F	31.62	2,079.00	2,076.00	9.49
Malacate	I-A	1,976.72	2,479.95	2,098.29	19.31
	I-B	1,986.07	2,501.86	2,098.29	20.32
	I-C	187.18	2,092.29	2,079.64	6.76
Ichupio		2,267.26	2,512.73	2,051.47	20.34
Malacate		2,321.91	2,501.26	2,079.81	18.15

Nota: Las nanocuenas G-B, G-CB, G-G y I-X no cuentan con un cauce definido.

3.2. Descripción del medio físico

3.2.1. Clima

La fuente de información para este apartado pueden ser estudios previos en el área de estudio o bien la base de información cartográfica de recursos naturales de INEGI, donde se puede obtener la cobertura nacional de clima, sin embargo si se puede obtener información detallada de precipitación y evaporación se podrían estimar la evapotranspiración potencial y hacer una nueva clasificación en base a la topografía y de acuerdo a la clasificación climática de Koppen modificada por Enriqueta García.

El tipo de clima que predomina en ambas microcuencas es el C(w2) que se caracteriza por ser un clima templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 14°C y 20°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente de 22°C, con precipitación anual de 800 a 1,200 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

3.2.2. Unidades de suelo

La fuente de información para este apartado pueden ser estudios previos que se hayan realizado en el área de estudio o bien la base de información cartográfica de recursos naturales de INEGI, donde se puede obtener la cobertura de edafología de cartas en escala 1:50,000.

En el caso de las microcuencas con apoyo de las cartas edafológicas de INEGI se identificó que se encuentran dos unidades de suelo (Figura 13) que son las siguientes:

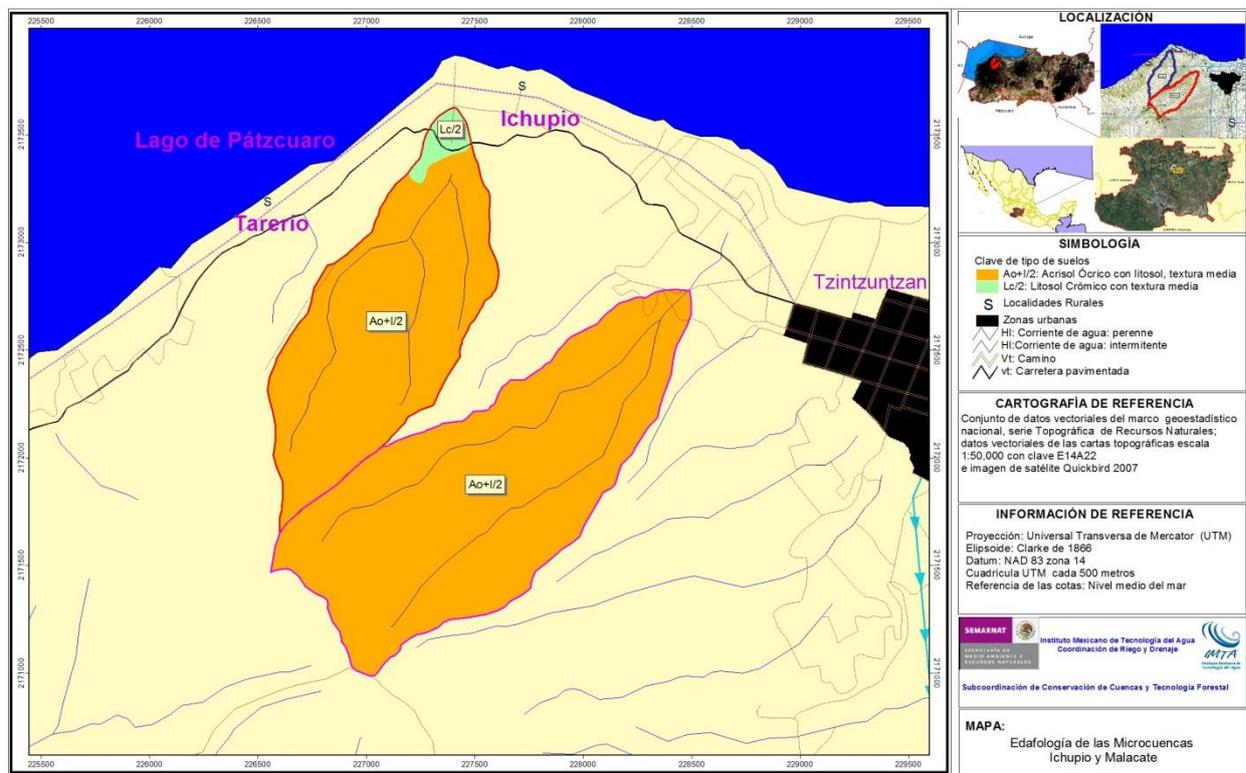


Figura 13. Mapa de edafología de las microcuencas pareadas de Ichupio y Malacate.

Ao+I/2: Es un suelo Acrisol órtico con Litosol, de textura media. El Acrisol órtico se caracteriza por ser un suelo ácido de clima húmedo, con un subsuelo arcilloso y pobre en general. Por su parte el Litosol es un suelo que tiene menos de 10 cm de espesor.

Lc/2: Es un suelo Luvisol crómico de textura media. Son suelos con mucha arcilla acumulada en el subsuelo. Se diferencian de los Acrisoles en que son más fértiles en general. Este suelo cuando está húmedo es de color pardo oscuro a rojo poco intenso (rojizo).

3.2.3. Uso de suelo

El uso de suelo actual es considerado un indicador importante para identificar el deterioro de la vegetación, debido a que muestra el desplazamiento de las actividades humanas hacia áreas de vegetación natural. El detalle en este tipo de cobertura es importante porque refleja las diferentes condiciones de exposición del recurso suelo, debido a que la vegetación actúa frenando la acción directa del escurrimiento y haciendo la función de soporte mecánico para la retención del suelo.

El uso actual de suelo y vegetación se cuantifica mediante recorridos de campo e interpretación de imágenes de satélite (imágenes QuickBird) procesadas con el visor Google Earth en el cual se realiza la digitalización de polígonos de acuerdo al uso actual del suelo obtenido previamente; se recomienda manejar una escala 1:5,000 ya que se trata de superficies poco extensas por tratarse de microcuencas. Posteriormente se procesan los polígonos en los softwares Carta Linx y ArcView 3.2 para obtener como producto final la distribución espacial de las categorías de uso. En el esquema de la Figura 14 se presenta el proceso a seguir para obtener el mapa de uso de suelo.

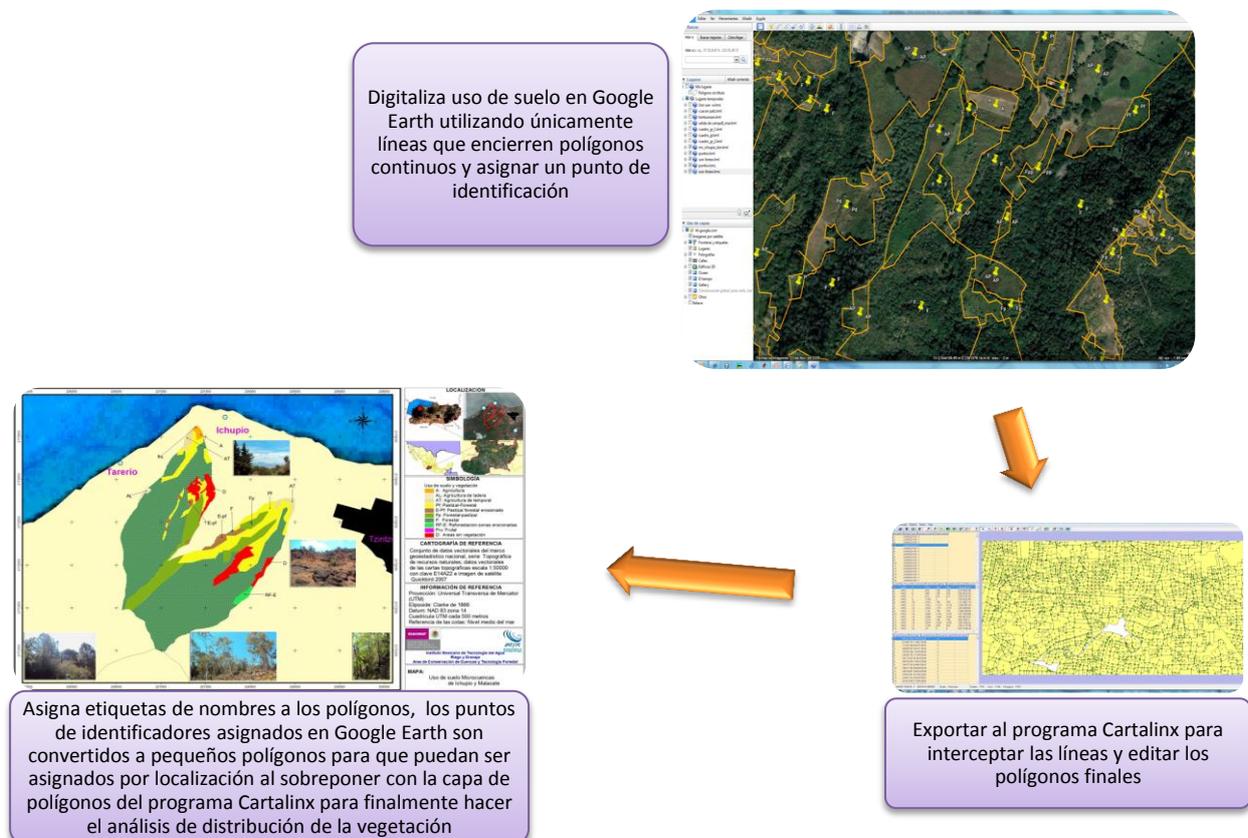


Figura 14. Diagrama de flujo para generar una capa de uso de suelo y vegetación por microcuenca.

En la Figura 15 se presenta el mapa que contiene los usos de suelo identificados en las microcuencas Ichupio y Malacate, y los cuales se obtuvieron siguiendo la metodología mencionada anteriormente.

En ambas microcuencas la categoría de uso de suelo predominante es forestal; con 73.61 ha en la microcuenca Ichupio y con 91.39 ha en la microcuenca Malacate. Las áreas con presencia de pastizal pueden considerarse como un indicador de disturbio ambiental, debido a que el pastizal es una etapa de regeneración natural que se presenta precisamente despues de un desastre natural, deforestación o un incendio.

Los pastizales en las microcuencas se agruparon en tres categorías: a) Pastizal-Forestal (Pf) que domina en 24.86 ha en la microcuenca Malacate, asi como en 10.72 ha en la microcuenca Ichupio; b) Pastizal forestal erosionado (E-Pf), el cual esta constituido por áreas con baja cubierta de pastizal y una muy baja presencia de árboles por lo que tiene alta perdida de suelo, en la microcuenca Ichupio se encuentra en 1.27 ha y 2.74 ha en la microcuenca Malacate; c) mientras que la categoría Forestal-pastizal (Fp) que podria considerarse en un estado de conservación regular por la dominancia de especies arboreas se encuentra en 7.53 ha en la microcuenca Ichupio y en 19.39 ha en la microcuenca Malacate (Cuadro 8).

Las áreas agrícolas se encuentran en 3 categorías: a) Agricultura (A), b) Agricultura de ladera (AL) y c) Agricultura de temporal (AT). En la microcuenca Ichupio éstas áreas juntas suman 3.48 ha, mientras que en la microcuenca Malacate solo existe agricultura de temporal en 1.77 ha.

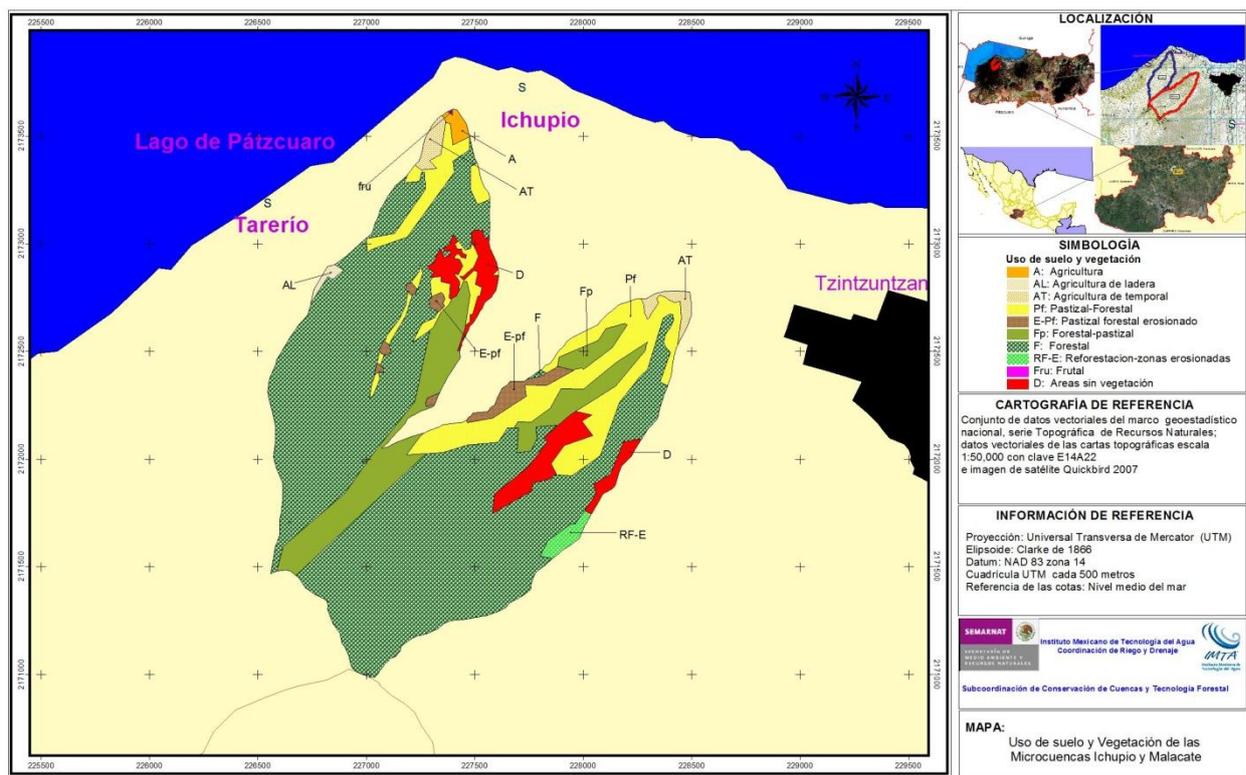


Figura 15. Mapa de cobertura de uso de suelo y vegetación de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Otras superficies susceptibles a erosión se agrupan con la clave "D", se trata de áreas sin vegetación, y se encuentra en 5.34 ha en la microcuenca Ichupio y en 7.37 ha en la microcuenca Malacate. Se estima que en la microcuenca Malacate hay 1.80 ha de Reforestacion-zonas erosionadas (RF-E) y finalmente una pequeña superficie de la microcuenca Ichupio es Frutal (0.03 ha)

Cuadro 8. Uso de suelo y vegetación de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Clave	Descripción uso de suelo	Superficie (ha) y % por microcuenca			
		Ichupio		Malacate	
		ha	%	ha	%
A	A: Agricultura	1.09	1.07		
AL	AL: Agricultura de ladera	0.65	0.64		
AT	AT: Agricultura de temporal	1.74	1.70	1.77	1.19
Pf	Pf: Pastizal-Forestal	10.72	10.51	24.86	16.66
E-pf	E-Pf: Pastizal forestal erosionado	1.21	1.19	2.74	1.84
Fp	Fp: Forestal-pastizal	7.53	7.38	19.39	12.99
F	F: Forestal	73.61	72.20	91.31	61.18
RF-E	RF-E: Reforestación-zonas erosionadas			1.80	1.20
fru	Fru: Frutal	0.03	0.03		
D	D: Áreas sin vegetación	5.39	5.28	7.37	4.94
Total		101.95	100.00	149.25	100.00

Se visualiza que las áreas forestales se ubican en la cuenca media y alta, mientras que cerca de la salida de las microcuencas se distribuyen áreas agrícolas y de pastizal forestal. Las áreas sin vegetación se ubican al Centro-Este de ambas microcuencas, también se distingue el área de reforestación al Sur-este de la microcuenca Malacate. Las áreas Forestal-pastizal se localizan al Sur-este en la microcuenca Ichupio y al Norte- centro en la microcuenca Malacate.

Etapa IV Requerimientos de información y diseño de sitios de aforo (vertedores)

Con base en la información recopilada en la Etapa III (Caracterización y Análisis ambiental) es posible conocer los procesos hidrometeorológicos que ocurren en la cuenca, sin embargo, dos de los principales indicadores ambientales a monitorear con esta metodología son el escurrimiento y la producción de sedimentos, para lograr dicho propósito se requiere instalar un vertedor de aforo en la salida de cada microcuenca. Para diseñar los canales o vertedores se analizan específicamente los datos de precipitación histórica y se calcula el escurrimiento máximo esperado con el apoyo de información como la precipitación, la pendiente, el uso de suelo y vegetación, así como, la edafología.

4.1. Análisis de la precipitación

4.1.1. Precipitación anual

Se considera como base información el ERIC III Ver. 3.0 (Extractor Rápido de Información Climatológica) de donde se obtienen los datos de las estaciones climatológicas ubicadas en la zona de influencia de las microcuencas, las cuales deben cumplir con que al menos 80% de información de las estaciones esté completa y reciente. Se suman los datos mensuales para obtener la precipitación anual.

4.1.2. Probabilidad de lluvia

Para realizar obras de almacenamiento es útil conocer con cierto grado de certeza el volumen de precipitación en el próximo ciclo de lluvia. Para lograr lo anterior, se podría considerar la precipitación media del área, lo cual tendrá cierto grado de aproximación, pero si se requiere una mayor precisión, es conveniente calcular la probabilidad de la lluvia esperada. Para ello, se consideran los valores de la lluvia durante varios años de registro para una estación meteorológica dada, se ordenan de mayor a menor, y se establece la probabilidad de ocurrencia de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{m}{n + 1} \times 100$$

donde:

- P** es probabilidad de ocurrencia,
- m** es número de orden y
- n** es número total de observaciones.

Un ejemplo del procedimiento de cálculo, se muestra en el Cuadro 9 para una estación determinada, donde se desea conocer la lluvia esperada para el mes de agosto con una probabilidad del 50%.

Procedimiento:

1. Se consiguen datos de lluvia del mes de agosto. Este es solo un ejemplo; de ser posible, obtener más datos, y más recientes.
2. Se agrupan las observaciones de acuerdo con los años de registro.
3. Se ordenan los valores de lluvia, de mayor a menor
4. Se aplica la ecuación mostrada arriba.

Cuadro 9. Ejemplo de cálculo de probabilidad de ocurrencia de la precipitación para el mes de agosto.

Año	Lluvia de agosto (mm)	Año	Lluvia (mm) ordenada	Número de orden	Probabilidad (%)
1981	370.0	1981	370.0	1	10
1982	105.0	1989	216.5	2	20
1983	191.0	1988	211.0	3	30
1984	82.0	1985	203.0	4	40
1985	203.0	1983	191.0	5	50
1986	82.0	1987	122.0	6	60
1987	122.0	1982	105.0	7	70
1988	211.0	1986	82.0	8	80
1989	216.5	1984	82.0	9	90

En el Cuadro 9 se observa que la lluvia esperada con un 50% de probabilidad es de 191.0 mm o más, lo que significa que cada dos años se tendrá un evento con una precipitación igual o mayor de 191.0 mm. Del ejemplo también se desprende que al aumentar la probabilidad de que ocurra una determinada lluvia, el valor de ésta decrece, ya que aumenta la certeza.

4.1.3. *Periodo de retorno o frecuencia de la lluvia.*

La frecuencia de la lluvia es la periodicidad media estadística en años con que pueden presentarse las tormentas de características similares en intensidad y duración. Los períodos comúnmente utilizados son de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Así, cuando se habla de una frecuencia o período de retorno de cinco años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cinco años. Cuando se trabaja con problemas típicos de conservación de suelo y agua, los períodos de retorno utilizados son de cinco años, a menos que se trate de fuertes inversiones y las obras pongan en riesgo vidas humanas o terrenos de alto valor entonces el periodo de retorno se puede ampliar a 20, 30,..., hasta 50 años. Para el caso del diseño de los vertedores que se utilizan para cuantificar los gastos en las microcuencas pareadas se propone utilizar un periodo de retorno de 10 años.

Para calcular la frecuencia o período de retorno de lluvia con diferente intensidad, se utiliza la siguiente ecuación

$$F = \frac{t}{m}$$

donde:

- F** es frecuencia o período de retorno en años,
- t** es el número total de años de registro y
- m** es el número de orden de la lluvia.

La forma de calcular la frecuencia de valores de intensidades de lluvia se presenta en el Cuadro 10, donde se tienen 15 observaciones de intensidades máximas de lluvia para una duración de 5 minutos en una estación determinada y se desea calcular los períodos de retorno para 1, 3, 5, 10 y 15 años.

Procedimiento:

- Se tabulan los valores anuales de intensidad máxima de lluvia

- Se ordenan los valores en forma decreciente
- Se aplica la ecuación y se obtienen los períodos de retorno

Cuadro 10. Datos para cálculo de periodo de retorno de una estación tipo.

Año	Intensidad máxima (5 min) mm/h	Número de orden	Intensidad máxima (5 min) mm/h	Período de retorno o frecuencia en años
1976	120	1	240	15.0
1977	184	2	184	7.5
1978	116	3	122	5.0
1979	240	4	120	3.75
1980	122	5	120	3.00
1981	42	6	116	2.50
1982	120	7	111	2.14
1983	111	8	94	1.87
1984	36	9	84	1.66
1985	78	10	78	1.50
1986	68	11	68	1.36
1987	60	12	60	1.25
1988	94	13	54	1.15
1989	54	14	42	1.07
1990	84	15	36	1.00

Al observar el cuadro de intensidades ordenadas, se obtienen los valores buscados, mismos que se resumen en el Cuadro 11 que se presenta a continuación.

Cuadro 11. Periodos de retorno estimados por interpolación de los datos del Cuadro 10.

Período de retorno en años	Intensidad máxima en 5 minutos (mm/h)
1	36
3	120
5	122
10	221*
15	240

* estimado por interpolación, no obtenido directamente de la tabla.

4.2. Estimación de escurrimientos para el diseño

De acuerdo a Maderey y Jiménez (2005) el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores; es afectado por dos grandes grupos de factores: los climáticos y los relacionados con la fisiografía.

Los factores climáticos determinan la cantidad de precipitación, este elemento depende de la forma de precipitación, la intensidad, la duración, la distribución en el espacio y la dirección del movimiento, así como del antecedente y humedad del suelo.

Los factores fisiográficos se relacionan con la forma y características físicas del terreno, así como, con los cauces que forman la red hidrográfica. Influyen principalmente dentro de la morfometría, la superficie, la forma y la pendiente del terreno; y entre los factores físicos están el uso de suelo y su cubierta vegetal, el tipo de suelo, la geología, la topografía y la red de drenaje.

4.2.1. Esgurrimiento medio

Para determinar el volumen medio en pequeñas cuencas o áreas de drenaje reducidas, se necesita la precipitación media, el área de drenaje y el coeficiente de esgurrimiento, la fórmula que se utiliza es:

$$Vm = A C Pm$$

donde:

Vm = Volumen medio (m^3)

A = Área de la cuenca (m^2)

C = Coeficiente de esgurrimiento

Pm = Precipitación media (m)

Así, una vez determinado cada uno de los factores que intervienen en el esgurrimiento, es relativamente sencillo calcular el esgurrimiento medio esperado. Su grado de aproximación dependerá del cuidado que se ponga en la obtención de los factores. En el Cuadro 12 se presentan algunos valores de C recomendados (Colegio de Postgraduados (1977), Haan, et. al. (1994)), y se presenta luego un ejemplo para el cálculo del esgurrimiento medio.

Cuadro 12. Valores de coeficiente de esgurrimiento de acuerdo a textura de suelo, topografía y vegetación.

Topografía y Vegetación	Textura del suelo		
	Ligera	Media	Fina
<i>BOSQUE</i>			
Plano (0 -5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (5-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (10-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
<i>PASTIZALES</i>			
Plano (0 -5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (5-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (10-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
<i>AGRICOLAS</i>			
Plano (0 -5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (5-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (10-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Ejemplo

Calcular el esgurrimiento medio de una microcuenca con un área de drenaje de 60 ha en total. Suponga que se tienen 35 ha de terrenos planos con cultivo y de textura ligera (franco arenosa) y las otras 25 ha

son de terrenos ondulados (6-10% pendiente) con bosque y de textura fina. Considere una precipitación media anual en el área de 600 mm.

Solución

- Definir el área: Se tiene que el área es de 60 has (600,000 m²)
- Definir el coeficiente de escurrimiento C: Del Cuadro 12, se tiene que el coeficiente de escurrimiento ponderado para el área de la cuenca, es:

$$C = \frac{(35 \times 0.3) + (25 \times 0.5)}{60} = \frac{23}{60} = 0.38$$

- Obtener dato de precipitación media anual. Se supone en el ejemplo que: **P = 600 mm (0.6 m)**

Se aplica la fórmula:

$$V = ACPm = (600,000)(0.38)(0.6) = 136\,800 \text{ m}^3$$

Este volumen es el que se espera que escurra en un año con precipitación similar a la lluvia media anual, por lo que sí se desea almacenar esa agua, habría que pensar en hacer un bordo de dimensiones tales que al considerar el área inundada, tenga la capacidad de retener el volumen de agua estimado. En cálculos más estrictos y para mayores superficies, habría que considerar factores como la distribución de la lluvia y el componente de evaporación del agua almacenada.

4.2.2. Escurrimiento máximo

4.2.2.1. Método racional

Útil cuando se cuenta con datos de precipitación de una estación dentro o cercana a la cuenca, se basa en la siguiente ecuación:

$$Q = 0.0028 \, c \, i \, A$$

donde:

- Q = Escurrimiento máximo (m³/s)
- 0.028 = Constante numérica
- C = Coeficiente de escurrimiento
- I = intensidad de lluvia (mm/h)
- A = Área de la cuenca (ha)

El procedimiento de cálculo es:

- Obtener el área de la cuenca
- Determinar el coeficiente de escurrimiento dependiendo de las condiciones de la cuenca (Cuadro 12).
- Se obtiene el valor de I consultando la información de estaciones meteorológicas disponible para el área de interés de instituciones que pueden ser la fuente como: INIFAP, SAGARPA, CONAGUA, o tal vez de alguna universidad. Ya se ha mencionado que en las obras de conservación de suelos normalmente se utilizan períodos de retorno de 5 ó 10 años (en obras de mayor importancia se debe trabajar con períodos de retorno de 25 y 50 años), y para el caso del diseño de vertedores o canales se propone un periodo de retorno de 10 años.

4.2.2.2. Método racional modificado

Para el método racional modificado, la modificación consiste en que en lugar de utilizar la intensidad máxima de lluvia dado que es un dato que no siempre está disponible, se considera la lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno dado. La fórmula entonces es:

$$Q = 0.0028 C L A$$

donde:

L = Lluvia máxima en 24 horas (mm/h)

A continuación se presenta un ejemplo de utilización del método racional modificado.

Ejemplo

Obtener el escurrimiento máximo para una lluvia con un período de retorno de 10 años en una pequeña microcuenca de 30 has que cuenta con 20 has de terreno con pendientes pronunciadas (20 – 30%) de bosque con una textura media y 10 has son de terrenos planos, con cultivos agrícolas donde la textura también es de suelos francos.

Solución

- Determinar el área. La cuenca tiene una área de 30 ha: 20 ha de bosque y 10 ha de cultivos.
- Determine el coeficiente de escurrimiento C. Del Cuadro 12, se tiene que:

$$C = \frac{(20 \times 0.5) + (10 \times 0.5)}{30} = \frac{15}{30} = 0.50$$

- Determine la lluvia máxima en 24 horas para la estación de Pátzcuaro, Michoacán para un periodo de retorno de 10 años. De acuerdo al ERIC III Ver. 3.0, se tiene que:

$$L = 69.0 \text{ mm/h}$$

Aplique la ecuación y obtenga el escurrimiento máximo:

$$Q = 0.0028 c L A = 0.0028 (0.5)(69.0)(30) = \underline{2.898 \text{ m}^3/\text{s}}$$

4.3. Diseño del canal vertedor

El establecimiento del canal vertedor se debe realizar en la salida de la microcuenca en un tramo de cauce donde se tengan condiciones de al menos 20 metros de pendiente menor de 0.3%, que esté recto, y que las sección del cauce sea uniforme en el transecto; lo anterior con el propósito de que el sensor ultrasónico (con el cual se registrará el escurrimiento) pueda realizar sus mediciones en el cauce con un flujo de agua prácticamente estable (es decir, sin ondulaciones en la superficie).

Para poder diseñar el vertedor es necesario realizar un levantamiento topográfico del cauce. Con la información obtenida se puede identificar en que zona del cauce se requiere realizar modificaciones sobre el cauce con el objetivo de uniformizar las secciones, así como, también determinar la pendiente del cauce.

El programa que se utiliza para obtener las dimensiones base para el diseño del canal es el denominado *mscAforador*, éste programa requiere información de pendiente de talud, escurrimiento máximo, la base menor promedio del canal, etc . A continuación se presenta el resultado obtenido con el programa del diseño del canal para la microcuenca Ichupio. Se observa *a)* el perfil del canal, *b)* las dimensiones de las secciones transversales y *c)* las vistas del tramo antes y después de la sección de control (Figura 16).

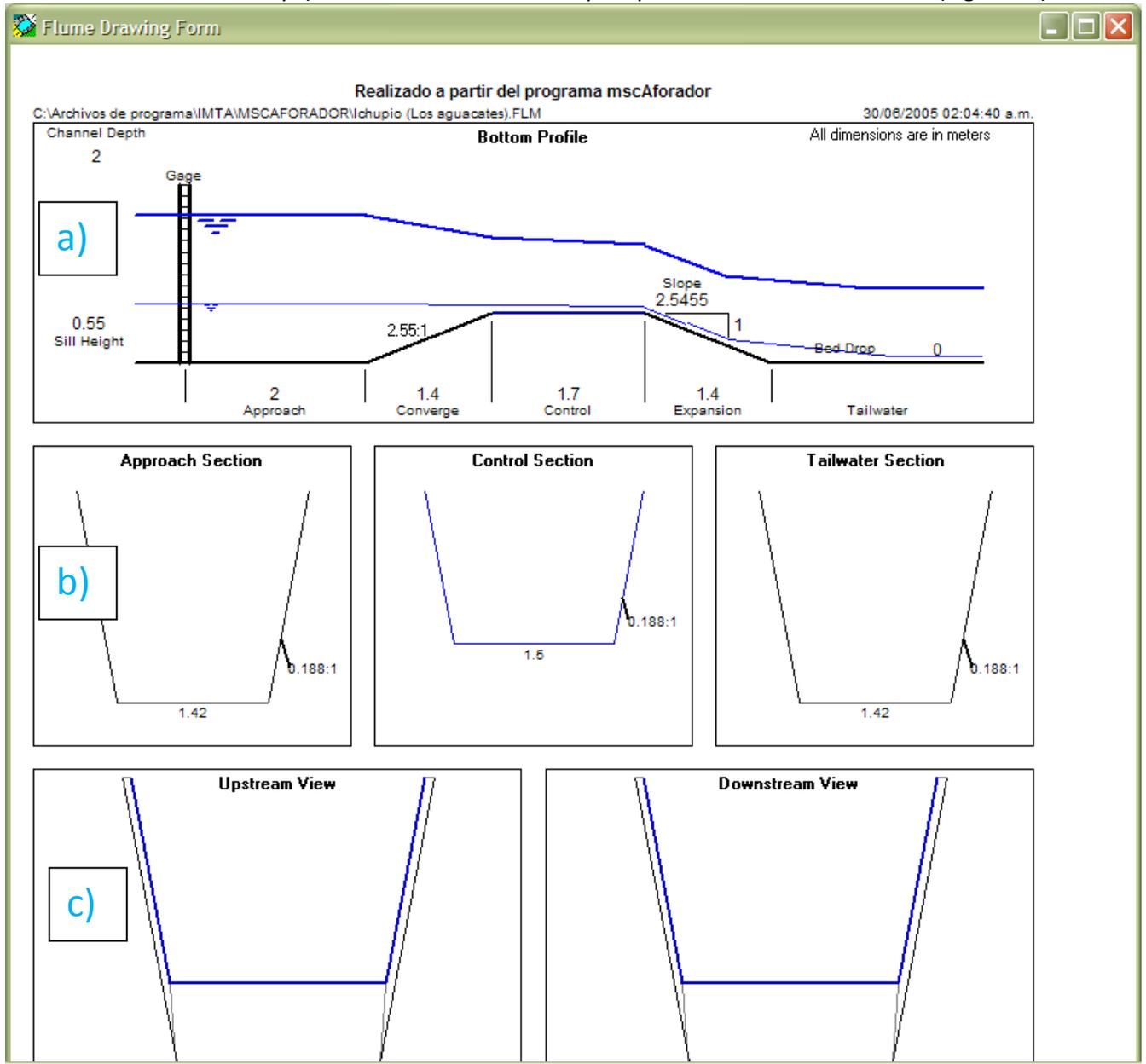


Figura 16. Dimensiones del canal parshall para la microcuenca Ichupio obtenidos con el programa *mscAforador*.

A continuación se presenta los datos que se obtuvieron con el programa *mscAforador* que corresponde a la ecuación de gasto con los parámetros que se requieren.

User: unknown WinFlume32 - Version 1.05.0027
C:\... \IMTA\MSCAFORADOR\Ichupio (Los aguacates).FLM - Revisión 4
Realizado a partir del programa *mscAforador*
Equation: $Q_{fit} = K1 * (h1 + K2) ^ u$
Parameters: K1 = 3.016
K2 = 0.000 (forced to zero by user)

$$u = 1.608$$

Coefficient of determination: 0.99984816

Parte inferior perfil

Gage: calibre

Approach: enfoque

Coverge: converger

Tailwater: aguas abajo

El gasto teórico de descarga (Q) se determina con el modelo WinFlume, que utiliza la teoría hidráulica y relaciones empíricas determinadas a partir de las pruebas de laboratorio. Es la estimación más precisa del gasto. El ajuste de la curva del gasto (Q_{fit}) se calcula con la ecuación anterior, y se ajustó a los valores de gasto teórico. En la columna donde dice "diferencia" muestra la diferencia entre las tasas de gasto calculadas a partir de la ecuación simplificada y los obtenidos a partir del modelo teórico WinFlume.

Con los datos base obtenidos y mediante el apoyo del programa Autocad, se diseña el canal donde se integran todas las dimensiones requeridas para su construcción en campo, asimismo, se incluye el diseño de la caseta donde se instalará el sensor ultrasónico (Figura 17).

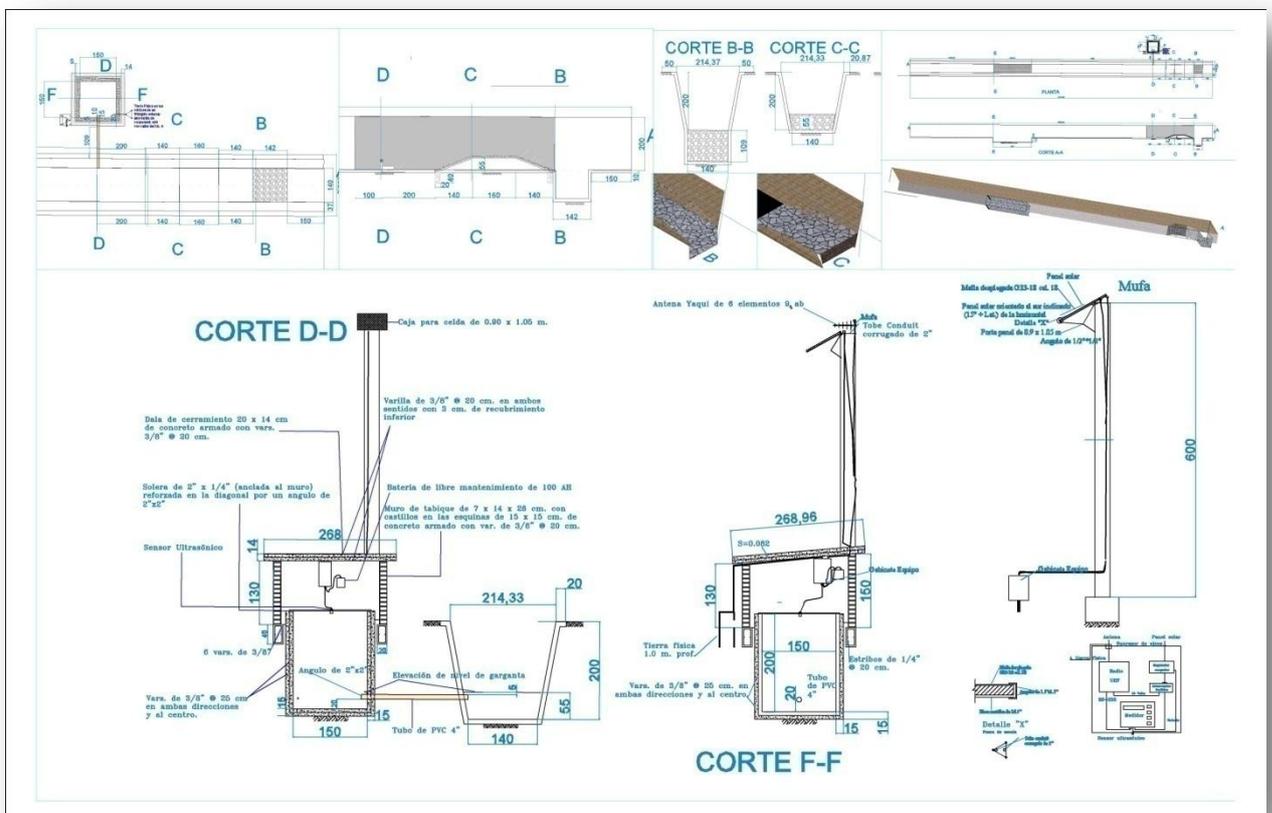


Figura 17. Plano de diseño del canal parshall para la microcuenca Ichupio, Patzcuaro, Michoacán.

También se realiza un diseño en 3D para que las personas encargadas de la construcción del canal identificarán los detalles de construcción, específicamente para la sección de control y donde va el tubo de pvc que comunica el canal con la caseta donde irá el sensor ultrasónico (Figura 18).

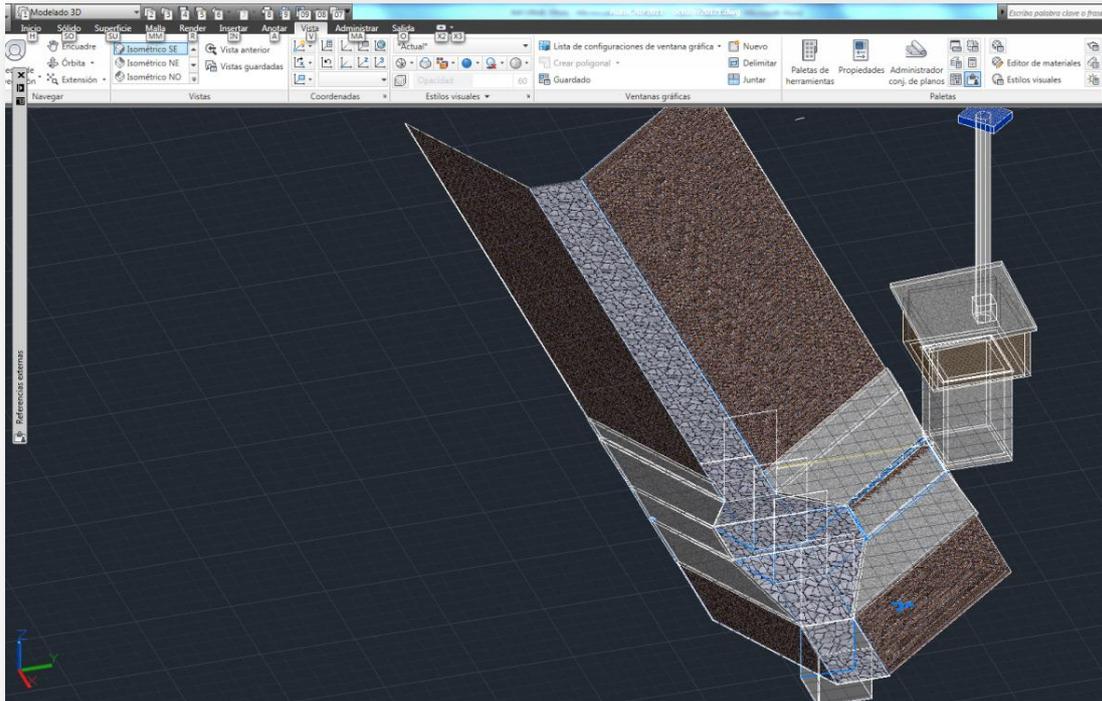


Figura 18. Vista 3D con detalle del canal aguas abajo.

En el diseño del canal se diferencian 6 cortes (Figura 19), los cuales se describen a continuación:

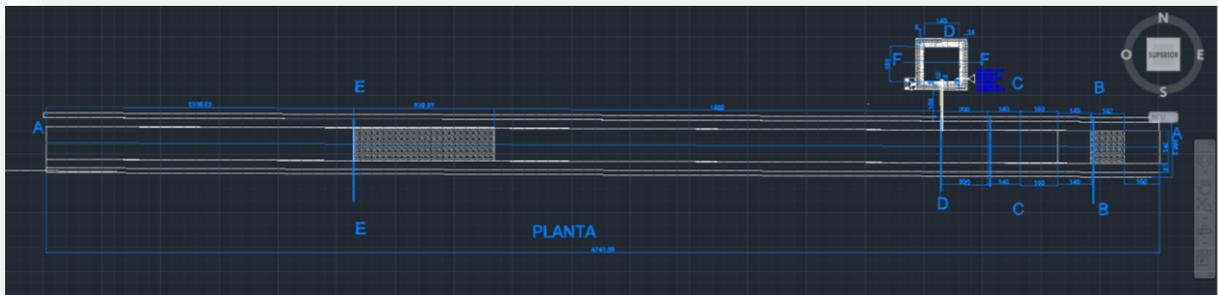


Figura 19. Vista del diseño en planta del canal parshall que muestra los 6 cortes que lo conforman.

4.3.1. Corte A-A

Este corte (Figura 20) presenta la vista desde arriba de la adecuación del canal para hacer mediciones continuas de escurrimiento, donde también se pueden observar los cortes transversales, y un tramo largo con pendiente casi nula antes de llegar a la sección D-D. Tiene por objeto estabilizar el flujo de agua. El corte E-E corresponde a un desnivel cuyo objetivo principal es reducir la presencia de sedimentos en la estructura principal de medición (Corte B-B).

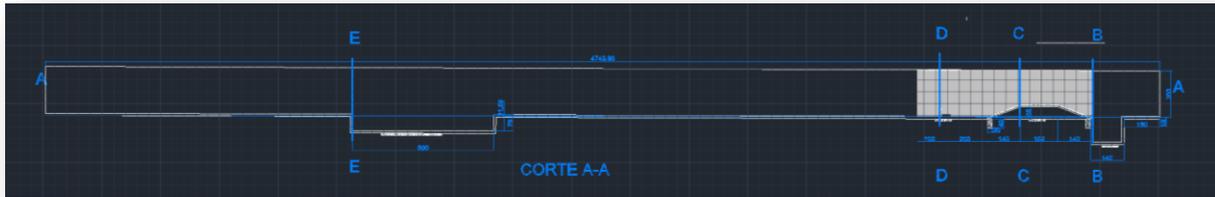


Figura 20. Vista del corte A-A del canal parshall.

4.3.2. Corte B-B

Este corte se ubica en la sección de control, es el punto más alto dentro del canal y a partir del cual se define el nivel del agua de donde medirá el sensor ultrasónico (Figura 21).

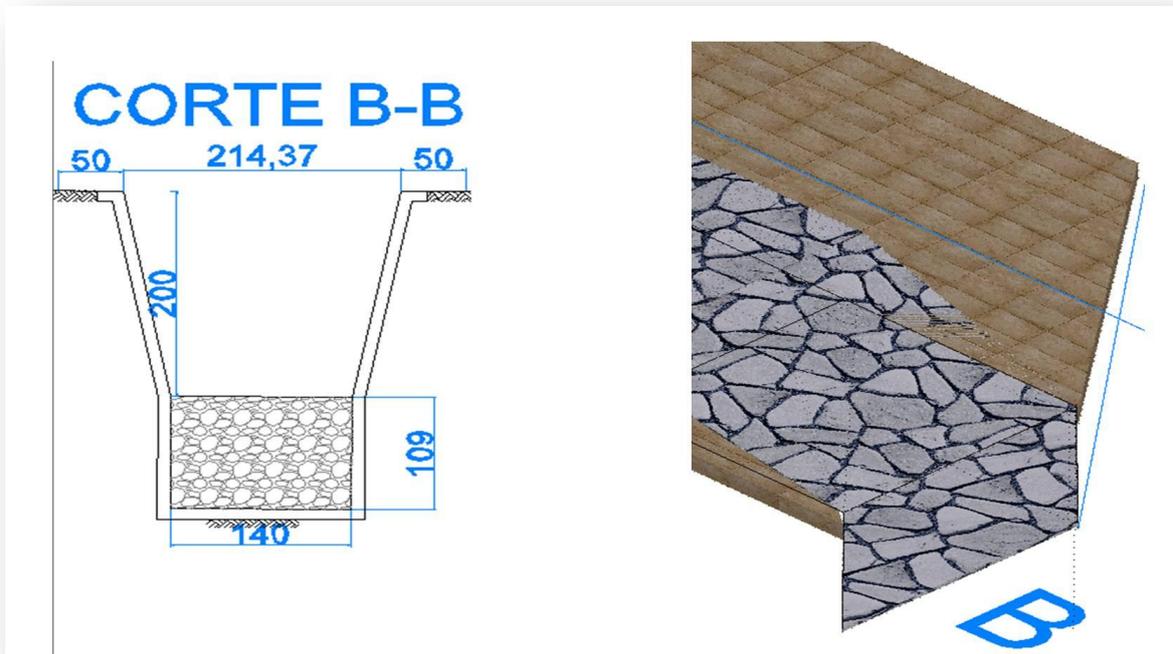


Figura 21. Vista 3D y dimensiones del Corte B-B del canal parshall.

En la Figura 22 se presenta a detalle las dimensiones de la caseta donde se instala el sensor ultrasónico.

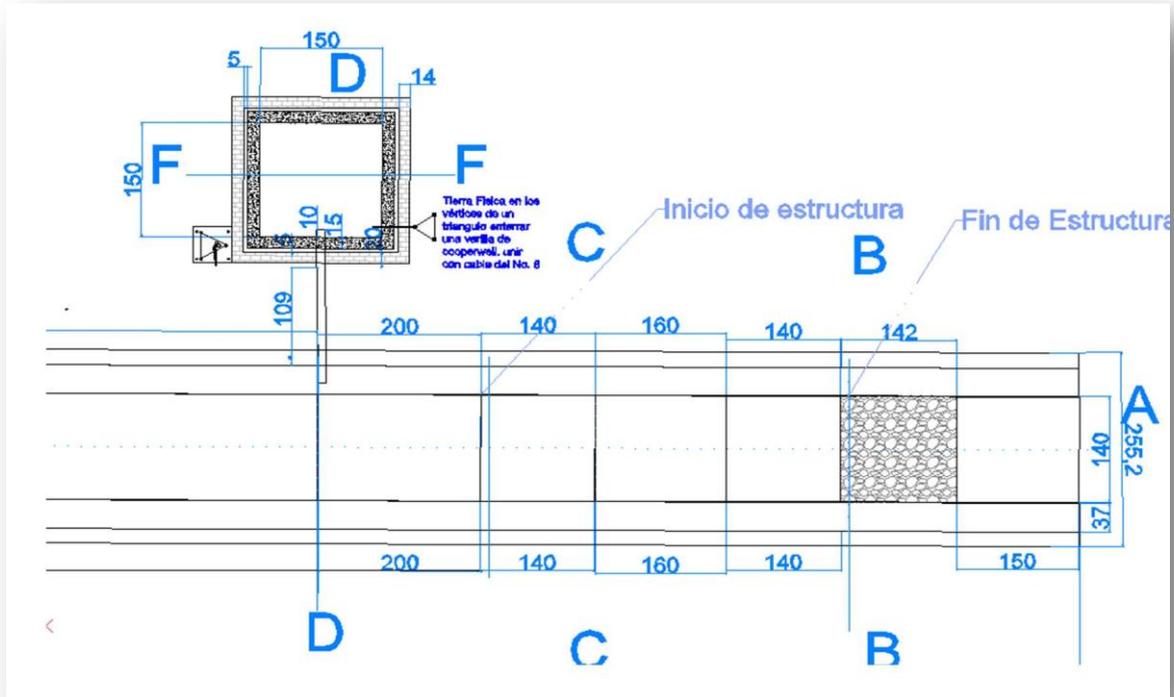


Figura 22. Acercamiento de planta de la caseta del canal parshall.

4.3.3. Corte C-C

El corte C-C indica el inicio de la estructura del canal. A la mitad del canal en la parte baja se instala un tubo de PVC que atravesará la estructura de la sección de control. Esta sección se une con la sección de control que da como forma a una rampa (Figura 23 y Figura 24).



Figura 23. Vista 3D y dimensiones del corte C-C del canal parshall.

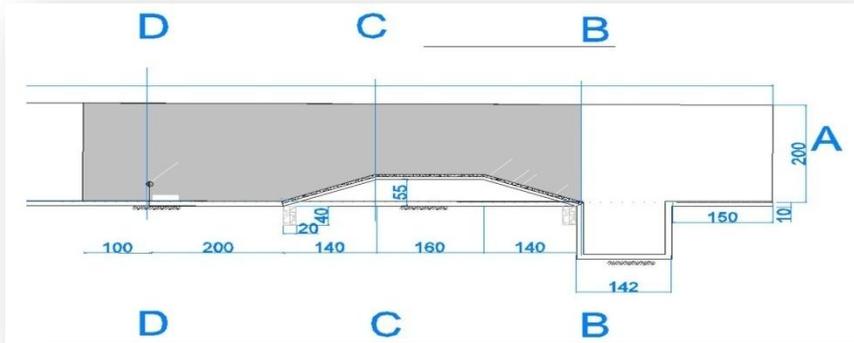


Figura 24. Acercamiento del corte A-A en la sección de control del canal parshall.

4.3.4. Corte D-D

Corresponde exactamente a la mitad de la caseta 2 metros antes del inicio de la estructura, este punto se caracteriza por tener un tubo de PVC que conecta el canal con la caseta. El tubo de PVC siempre se debe ubicar a 5 cm por debajo de la sección de control (altura máxima de la estructura), es decir, aplica dentro del canal. Sin embargo, dentro de la caseta el piso se localiza a 20 centímetros por debajo de donde ingresa el tubo de PVC (Figura 25).

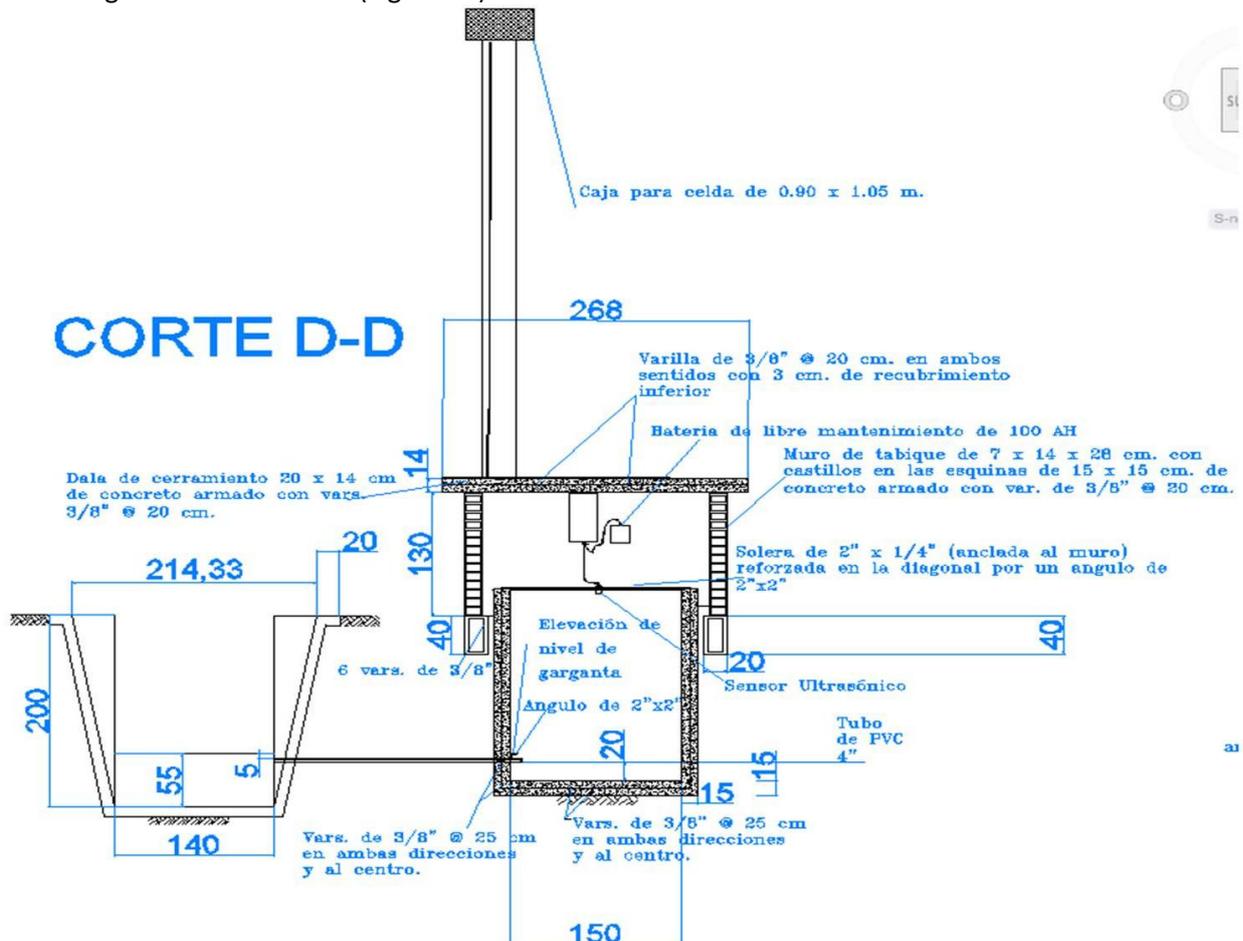


Figura 25. Vista 3D y dimensiones del Corte D-D que incluye la caseta del canal parshall.

4.3.5. Corte F-F

El corte F-F representa la caseta y el poste en el cual se instala el panel solar que proveerá de energía al equipo del sensor ultrasónico. El panel solar se instala dentro de una estructura de concreto con la finalidad de evitar en lo posible el vandalismo. Y en lo que respecta al poste, por dentro se instala un tubo de PVC que llevará los cables que conducen la energía del panel solar a la batería (Figura 26).

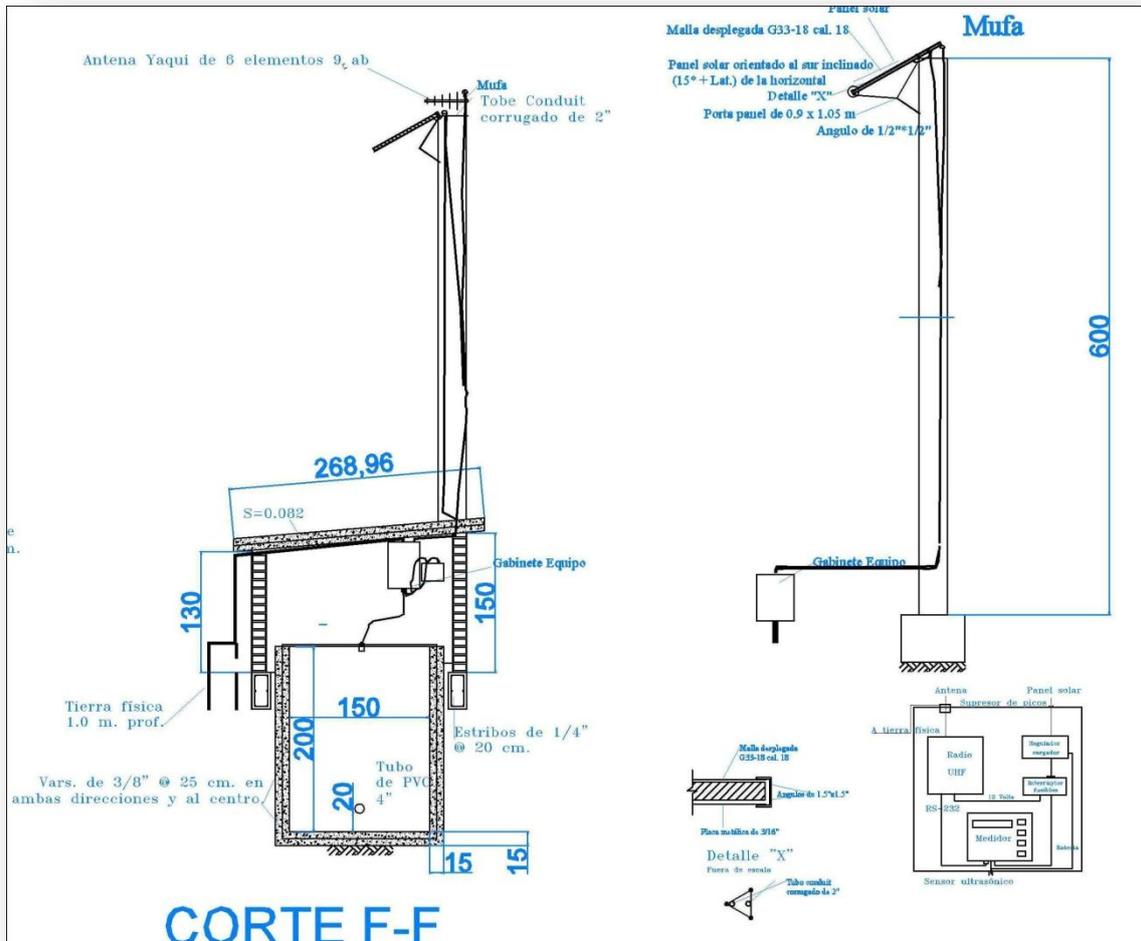


Figura 26. Vista 3D y dimensiones del Corte F-F.

La caseta lleva una pequeña puerta en la parte superior y debe tener las dimensiones mínimas para que pueda introducirse la persona que hará la instalación del equipo y posteriormente para recabar los datos del datalogger. Dentro de la caseta se construye un pequeño gabinete o estructura que será donde se coloque todo el equipo.

Etapa V: INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación de las microcuencas consiste en la instalación de pluviómetros digitales para la medición de la precipitación y la construcción de un vertedor de garganta larga equipado con un sensor ultrasónico para registrar la información de carga o nivel y el gasto (escurrimiento superficial) que se presenta en las microcuencas. A continuación se realiza una descripción de las actividades que se tienen que realizar para instrumentar.

5.1. Instalación de pluviómetro digital

Para cuantificar las entradas (precipitaciones) de las microcuencas se debe instalar como mínimo un pluviómetro digital, lo ideal sería tener tres pluviómetros para monitorear la distribución de la precipitación en la parte alta media y baja de la microcuenca.

El pluviómetro es un equipo que consta de un recipiente que recibe el agua de lluvia sobre un área conocida, misma que cae en un sistema de balancín que contiene dos receptáculos que tienen la capacidad de captar una cantidad de agua que equivale a 0.2mm de lluvia, uno de ellos recibe el agua primero y al llenarse éste cae debido al peso del agua golpeando sobre un sensor (lo que se denomina una oscilación). En ese momento empieza a recibir agua el otro balancín que al captar la misma cantidad de agua cae también por su peso y registra en el dataloger el “momento”, y así sucesivamente hasta que termina de llover.

Para el caso de las microcuencas Ichupio y Malacate, el pluviómetro digital que se instaló es el modelo ONSET, el cual previamente se calibró en gabinete para checar su correcto funcionamiento. El pluviómetro ONSET se calibra de tal forma que un volumen de agua de 373 ml se desagüe en un tiempo superior a 1 hora con un número de oscilaciones del balancín de entre 98 y 102. Como se mencionó, el pluviómetro ONSET registra por evento una precipitación de 0.2 mm de agua.

De manera general se realiza a continuación una descripción de las partes principales que conforman el pluviómetro digital ONSET, mismas que se presentan en la Figura 27.

- a) Orificio por donde escurre el agua ante un evento de precipitación y que se capta en el recipiente para el caso.
- b) Cable que conecta el dataloger del pluviómetro a la computadora para extraer la información registrada.
 - Balancín: parte del pluviómetro que presenta movimiento oscilatorio ante una cantidad de precipitación constante que cae dentro del pluviómetro.
 - Batería: Compartimiento donde se ubica la batería y el dataloger que registra los eventos de lluvia.

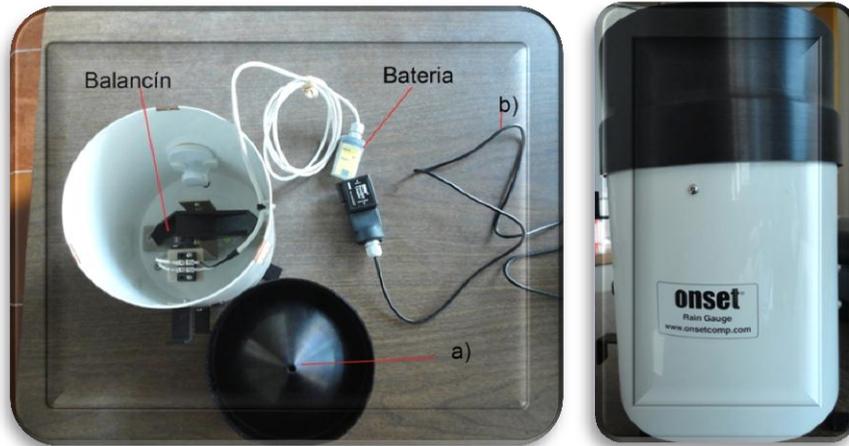


Figura 27. Partes que conforman el pluviómetro digital ONSET para registrar los eventos de lluvia.

Para elegir el sitio donde instalar el pluviómetro digital, se considera que sea en un lugar donde no exista interferencia de la lluvia (como árboles, techos de casas, etc.), y sobretodo, que esté cerca de alguna casa o dentro de un predio que sea seguro, esto con la idea de que no se presente el vandalismo del pluviómetro. Para el caso de ambas microcuencas, el sitio que se eligió considera las recomendaciones y se instalaron en predios cercanos a casas donde están bien protegidos.

Los pluviómetros se instalaron en postes a una altura aproximada de 4 metros (Figura 28 y Figura 29) y quedaron configurados de tal forma que cada 5 minutos registren información de temperatura durante las 24 horas; los eventos de precipitación se registran solamente cuando se presente el evento y del cual se registra la hora cada que “caen” 0.2 mm de lluvia.



Figura 28. Instalación del pluviómetro en la microcuenca Malacate.



Figura 29. Instalación del pluviómetro en la microcuenca Ichupio.

5.2. Canal con vertedor de garganta larga

El canal con el vertedor de garganta larga se utiliza para cuantificar el escurrimiento superficial de las microcuencas. El aforador Parshall es un aparato calibrado para medir el agua en los canales abiertos. Es de forma abierta tiene una sección convergente, una garganta, y una sección divergente. Este tipo de aforador ofrece varias ventajas tales como:

- Opera con pérdidas de carga relativamente bajas.
- El aforador es poco sensible a la velocidad de llegada.
- Tiene la capacidad a medir tanto con flujo libre como moderadamente sumergido.
- La velocidad del flujo en el interior del aforador es lo suficientemente alta para evitar el azolve.
- Opera en un rango amplio de flujos.

También el aforador tiene unas desventajas que son:

- Más caros debido a la fabricación especial requerida.
- La fabricación e instalación es crítica para que funcionen como se debe.

Para seleccionar el mejor sitio para la construcción del vertedor, éste debe reunir una característica importante que es que el cauce presenté pendiente ligera y homogénea en una distancia de al menos diez veces el ancho del fondo del canal, esto con la finalidad de que el sensor ultrasónico que registrará el escurrimiento reciba los datos de un flujo de agua estable sin movimientos en la superficie y sin rebotes de la señal ultrasónica.

Para diseñar el canal con el aforador es indispensable realizar el levantamiento topográfico, y para ello primero se tiene que limpiar el canal (Figura 30 y Figura 31). El levantamiento topográfico considera realizar el perfil del cauce y las secciones de los cauces.

En la Figura 32 se presenta una sección que se obtuvo del cauce de la microcuenca Malacate, y en el Cuadro 13 se presenta la información del perfil del cauce de la microcuenca Ichupio.



Figura 30. Limpieza del cauce para realizar el levantamiento topográfico.



Figura 31. Levantamiento topográfico del cauce.

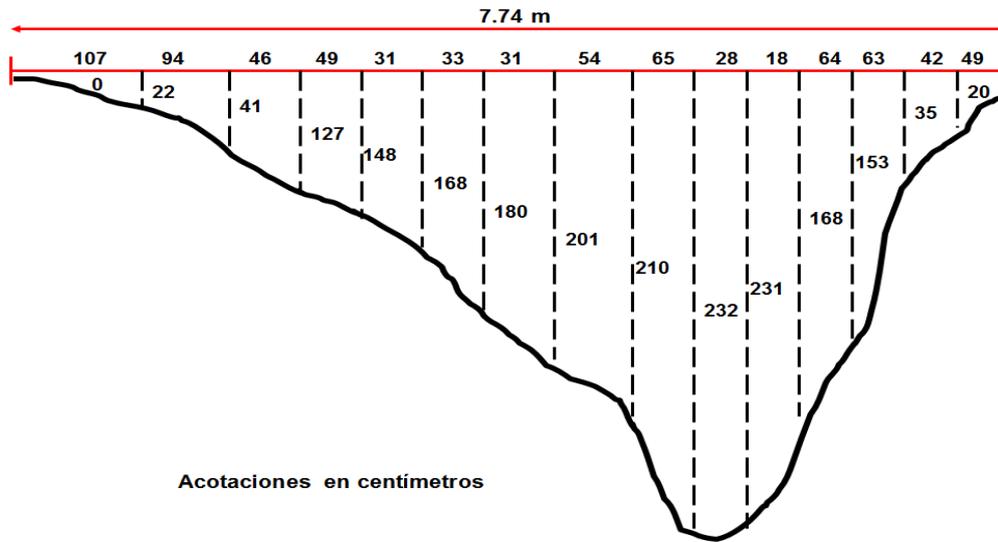


Figura 32. Sección de un tramo del cauce de la microcuenca Malacate.

Cuadro 13. Perfil del cauce de la microcuenca Ichupio.

Distancia (m)	Elevación (m)	Intervalo (m)	Diferencia de desnivel (m)	Pendiente (%)
2.5	1.47			
7.5	1.36	5	0.11	2.2
12.5	1.08	5	0.28	5.6
17.5	0.93	5	0.15	3.0
22.5	0.78	5	0.15	3.0
27.5	0.68	5	0.10	2.0
32.5	0.53	5	0.15	3.0
37.5	0.39	5	0.14	2.8
42.5	0.07	5	0.32	6.4
Total		40	1.40	3.5
Pendiente promedio:		3.5%		

5.2.1. Diseño del vertedor

Con el apoyo de la información obtenida del levantamiento topográfico de los cauces, se procedió al diseño del vertedor que se construiría en cada microcuenca, para ello se apoya en el programa mscAforador para calcular las dimensiones de las secciones que integra el vertedor y con Autocad 2011 se procede a dibujar los vertedores o canales.

En las Figuras 33 y 34 se presentan el diseño de los canales parshall y de la caseta donde se incluyen todas las características para su construcción, tanto la que corresponde para la microcuenca Ichupio como para la microcuenca Malacate.

5.2.2. Trazo del vertedor

Para cada sitio de salida de las microcuencas se procede a realizar la limpieza de los cauces para quitar la vegetación y posteriormente se traza el vertedor respetando los diseños de construcción con las dimensiones determinadas en gabinete (Figura 35).



Figura 35. Limpieza del cauce y trazo del vertedor para su construcción.

5.2.3. Construcción del canal parshall

Para realizar la construcción de cada canal parshall se deben realizar una serie de actividades y trabajos que conlleva, desde reacondicionar la sección del cauce lo que implica hacer movimientos de tierra con retroexcavadora hasta la mano de obra de albañilería para construir el canal.

Cabe mencionar que de acuerdo con el diseño, los canales a construir en la microcuenca Ichupio y en la microcuenca Malacate presentaron diferencias en su construcción por lo que cada uno tuvo sus particularidades y se cuidó que se construyeran siguiendo los criterios de diseño.

En las siguientes Figuras 36 y 37 se presentan testimonios fotográficos de las diferentes etapas que conllevaron a la construcción de los canales parshall en las microcuencas Ichupio y Malacate.



Figura 36. Serie de trabajos para la construcción del vertedor en la microcuenca Ichupio.



Figura 37. Serie de trabajos para la construcción del vertedor en la microcuenca Malacate.

5.3. Equipo de medición de los escurrimientos superficiales

5.3.1. Caseta para equipo

El equipo de medición que consta de un sensor ultrasónico debe estar resguardado en una caseta para su protección. Generalmente se construye al lado del vertedor.

La caseta se diseña de tal forma que tenga las dimensiones adecuadas que no afecte el funcionamiento del sensor sobretodo evitando que haya “rebotes” de las señales ultrasónicas que emite y que se pueden ver afectadas por las paredes de la caseta.

En la Figura 38 se presentan fotografías de las etapas de construcción de la caseta para el caso de la microcuenca Malacate.



Figura 38. Construcción de la caseta de la microcuenca Malacate.

5.3.2. Panel solar

El sensor ultrasónico requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, y como la ubicación de los canales donde se quiere medir el escurrimiento se encuentran alejados de casas habitación que pueden utilizarse como fuente de energía eléctrica, por eso optó como opción establecer paneles solares para proveer de energía eléctrica.

Cada panel solar para cada vertedor se instaló en la parte superior de la caseta, para lo cual se colocó sobre una base de concreto que se montó en una columna de cemento a una altura de 6.0 metros. Lo anterior se realizó con la finalidad de evitar el vandalismo del equipo.

La Figura 39 presenta las etapas de la construcción e instalación del panel solar.



Figura 39. Construcción e instalación del panel solar.

5.3.3. Sensor ultrasónico

Los **sensores ultrasónicos** son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias de hasta 8m. El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar. Los sonidos se reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco.

En nuestro caso, la aplicación del sensor ultrasónico se realiza sobre una superficie de agua que corresponde a la lámina de agua que se capta en el depósito que se ubica dentro de la caseta, y se registra en un dataloger la información donde queda asentada tanto la lámina de agua (altura), que

dentro tiene un programa que a su vez lo pasa a la equivalencia en gasto (m^3/s), por supuesto, que de ello queda registrada la hora exacta. El mismo datalogger registra la información de temperatura cada 5 minutos, mismo lapso en tiempo del que se registra el gasto que transecta por el vertedor de garganta larga si es que está sucediendo en el momento, de lo contrario el registro por supuesto que es "0".

En la Figura 40 se presenta el sensor ultrasónico instalado tanto en la microcuenca Ichupio como en la microcuenca Malacate.



Figura 40. Sensores ultrasónicos instalados en las microcuencas Ichupio y Malacate.

Etapa VI Registro de información

4.1. Registro de lluvia (entradas)

En los pluviómetros digitales se registra la precipitación diaria con una precisión de 0.2 mm mediante un dataloger donde queda registrada la hora exacta de que se presenta el evento. El pluviómetro tiene un funcionamiento de balancín que se encarga de captar la lluvia y golpea un sensor que envía un impulso que se registra en el dataloger.

La información se debe extraer de preferencia cada mes o cuando menos cada dos meses, esto con la idea de revisar que esté funcionando bien el sistema de registro y que la batería tenga carga para evitar la interrupción del registro de datos.

Para obtener la información se debe hacer en el sitio de ubicación del pluviómetro para de inmediato volver a colocarlo para continuar con el registro de datos de lluvia. En la Figura 41 se presenta fotografías de la secuencia de extracción de información.



Figura 41. Actividades de secuencia para extraer la información del pluviómetro digital.

La descarga de información se realiza con el programa HOBOWare Pro, la cual se extrae con el apoyo de un cable *usb* que se conecta al datalogger y se enlaza con el software de la computadora. Un esquema de cómo se obtiene la información con el programa se presenta en la Figura 42.

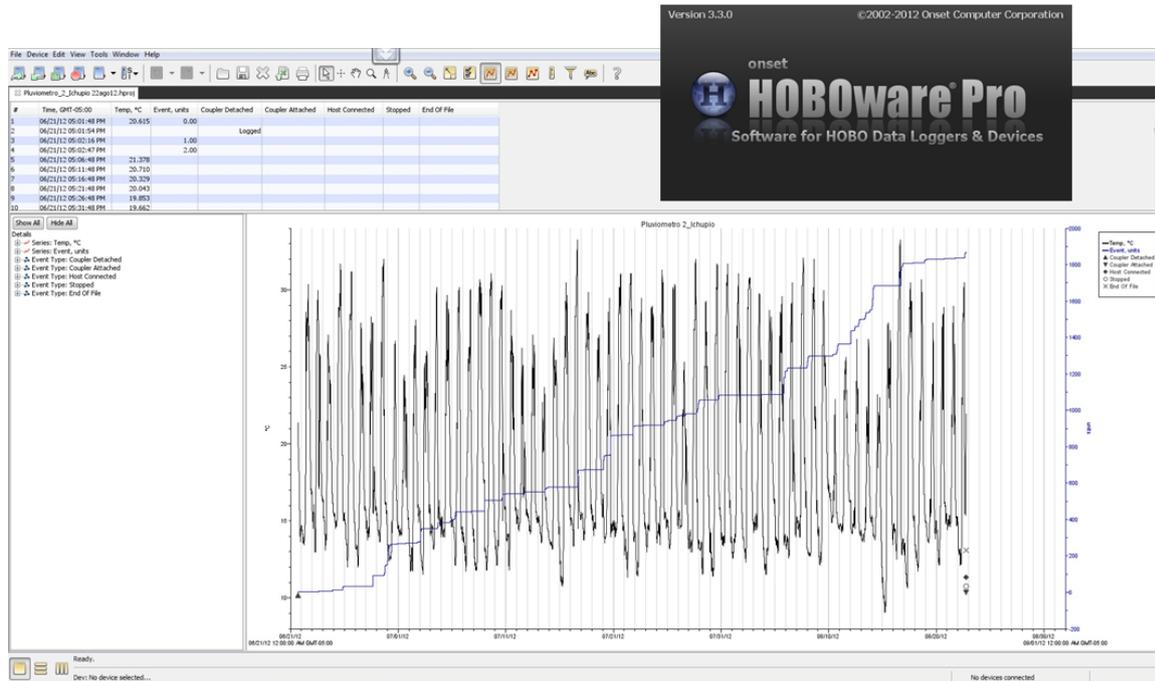


Figura 42. Vista de descarga de información del datalogger del pluviómetro digital.

Por supuesto que una vez obtenida la información, esta se analiza y procesa en una hoja de cálculo donde se generan las gráficas respectivas como la que se presenta en la Figura 43.

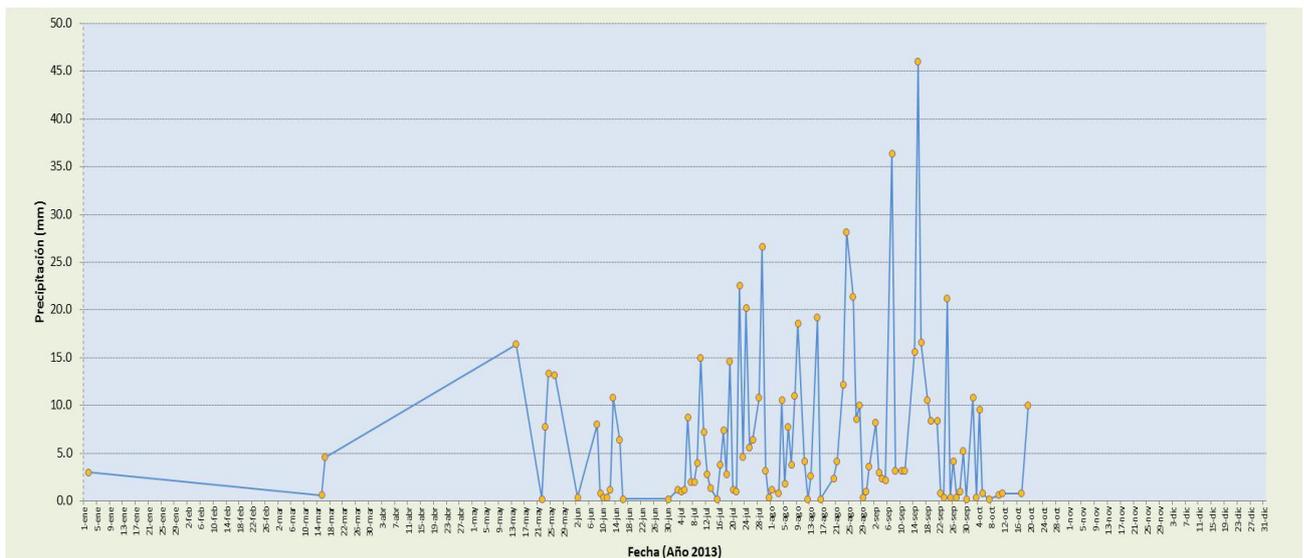


Figura 43. Datos de precipitación diaria registrados del periodo de enero a diciembre de 2013 en la microcuenca Ichupo.

4.2. Registro de escurrimientos (salidas)

Con el sensor ultrasónico instalado en el vertedor se registra en un datalogger el gasto con una precisión de cada 3 a 5 minutos, el registro incluye el dato de la hora exacta del evento. El datalogger está

configurado para que cada hora en punto genere un archivo con los datos medidos en el lapso de la hora anterior con datos de medición de cada 3 a 5 minutos.

Adicionalmente, la programación del datalogger considera como opción el envío del archivo generado cada hora a una dirección de correo electrónico que comunica y envía por vía celular, de esta manera se tiene un respaldo de información en la cuenta de correo adicional a los registros que se hacen en una memoria SD donde se van guardando los archivos.

Una aplicación útil de esta opción es que al revisar los datos en el correo electrónico se puede estar monitoreando el buen funcionamiento del sensor ultrasónico, o en su caso, poder detectar alguna anomalía en el registro de los datos que puede indicar la necesidad de revisar el equipo o la infraestructura.

En la Figura 44 se presenta el momento en que se extrae la información de la memoria SD para lo cual se utiliza una computadora portátil. La información se extrae en el sitio donde está el sensor ultrasónico ya que de inmediato se debe colocar la memoria SD para programar de nuevo el sensor para que continúe registrando información. La extracción de información se debe realizar al menos cada mes para evitar que la memoria SD se sature y llene, ya que de ocurrir ocasionaría una interferencia con el funcionamiento del sensor ultrasónico.



Figura 44. Obtención de información del sensor ultrasónico.

Por su parte en la Figura 45 se presenta la pantalla del correo de *itelcel* donde se guardan los archivos con la información que se genera cada hora.

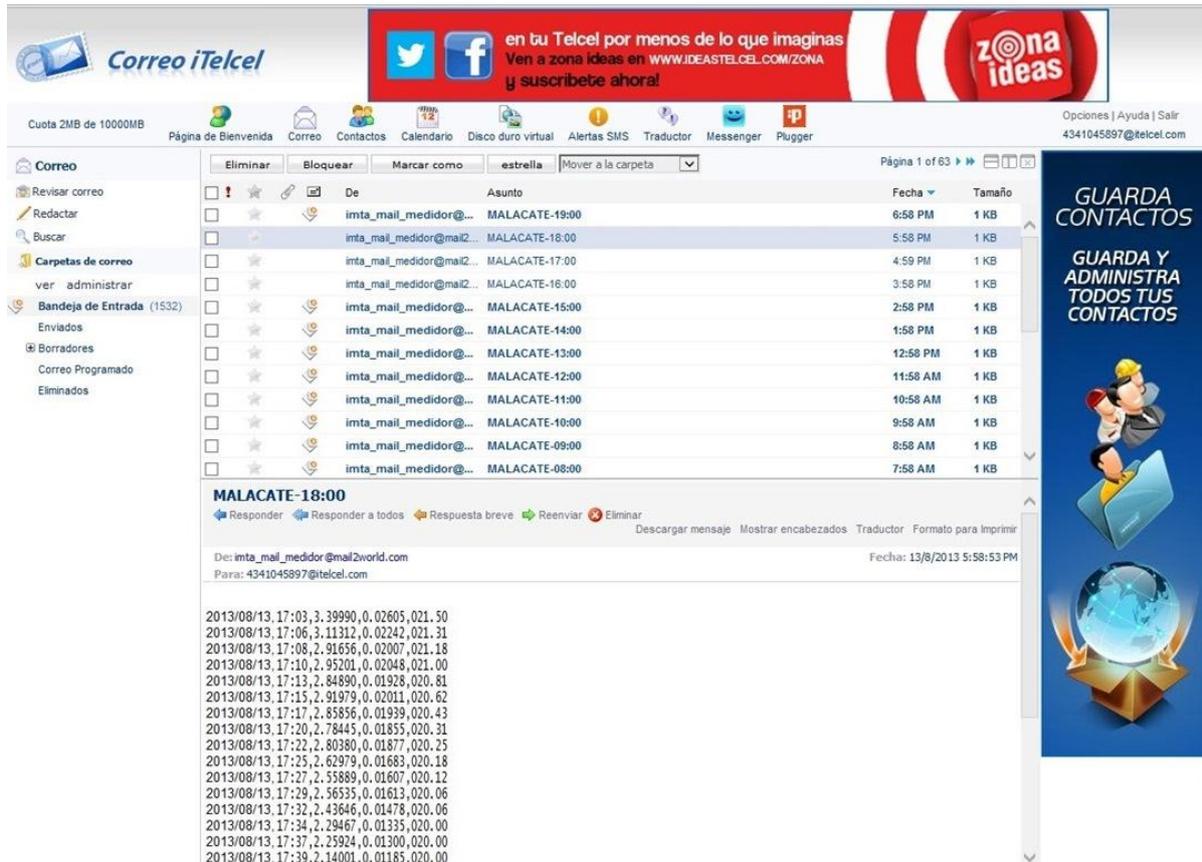


Figura 45. Base de datos de la información del sensor ultrasónico archivada en el correo de itelcel.

4.3. Registro de producción de sedimentos

Durante el evento de lluvia que genera escurrimiento superficial, se toman muestras de agua del escurrimiento en el transecto del canal antes de llegar a la zona de medición. La toma de muestra se debe hacer cada 5 minutos, y se inicia inmediatamente después de que empieza el escurrimiento y se finaliza hasta que prácticamente deja de escurrir en el canal. La profundidad de toma de muestra debe ser aproximadamente a 2/3 de la carga del canal.

El procedimiento propuesto a seguir durante la toma de muestras se presenta enseguida:



a) Toma de muestras y etiquetación

Las muestras se toman en frascos de plástico de un litro de boca ancha que se etiquetan con datos de: fecha, hora y nombre del sitio.



b. Decantación de sedimentos en laboratorio

b) Decantación de sedimentos

En el laboratorio se agregan 10 gramos de alumbre (sulfato de aluminio) para sedimentar los sólidos y separar el agua de los sedimentos.



c. Cuantificación de sedimentos en laboratorio

c) Cuantificación de sedimentos

En el laboratorio con papel filtro se separan los sedimentos. Cada muestra se seca por 24 horas en la estufa para eliminar la humedad y posteriormente se pesan para cuantificar los sedimentos por muestra de un litro.

Etapa VII Depuración y fase exploratoria



Una vez que se tiene la base de datos se realiza una depuración inicial de la misma, y de esta manera se puede obtener una primera aproximación de las tendencias generales de los datos.

Posteriormente, se pueden explorar las series de datos a nivel descriptivo, y se pueden obtener algunas de las siguientes variables como son: días con lluvia, lluvia mensual, escurrimiento en mm por evento, escurrimientos máximos, etc.

Esta exploración contempla también el analizar los datos a nivel gráfico, a partir de la construcción de diagramas de dispersión de doble eje que involucren las variables precipitación, caudal (rendimiento hídrico) y sedimentos registrados durante el desarrollo de la investigación.

En este momento se alcanza una aproximación gráfica de la respuesta - en términos de rendimiento hídrico y producción de sedimentos- al estímulo de la precipitación para cada microcuenca.

En el caso de las microcuencas pareadas Ichupio y Malacate, durante el 2013 se obtuvo información que permitió crear una base de datos que se conforma de la siguiente información: fecha del evento, precipitación, escurrimiento, escurrimiento máximo, volumen de escurrimiento, concentración de sedimentos y producción de sedimentos.

A continuación se presenta un análisis de las tres variables de estudio, las cuales son: precipitación, escurrimiento y producción de sedimentos.

5.1. Análisis de precipitación

En las Figuras 46 y 47 se presenta gráficamente la precipitación diaria que se registró en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el 2013.

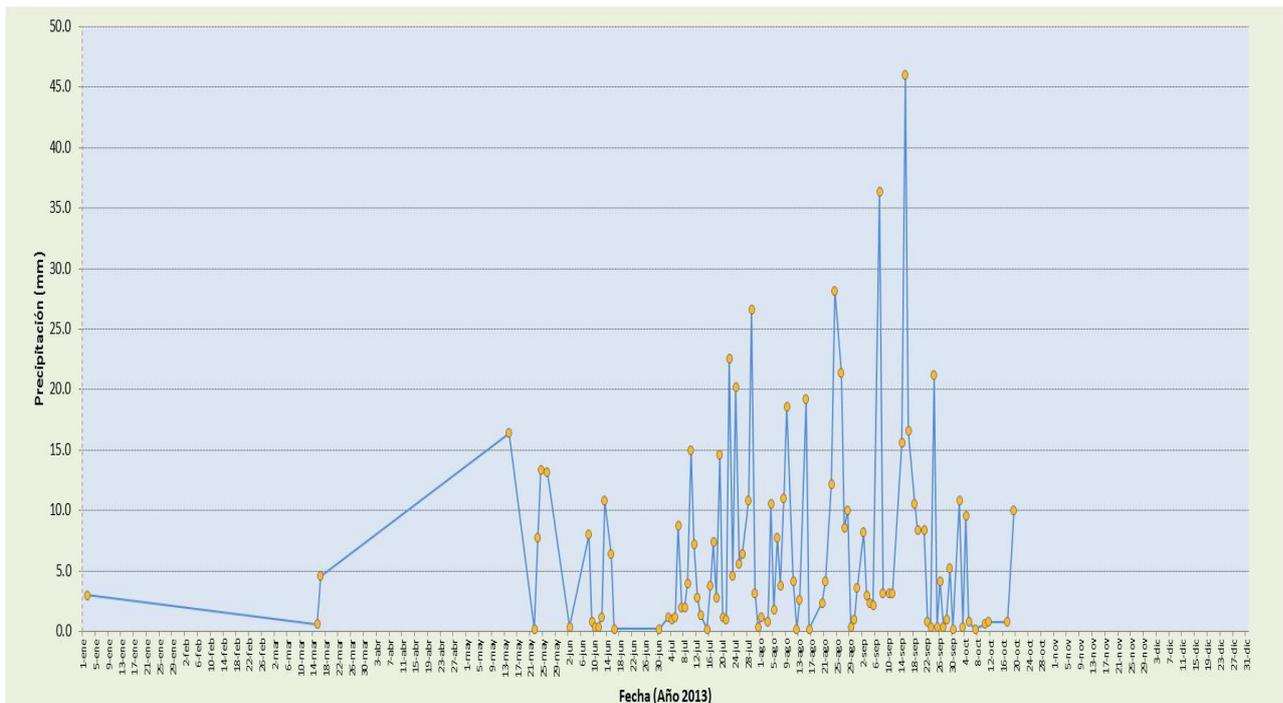


Figura 46. Precipitación diaria registrada en la microcuenca Ichupio durante el 2013.

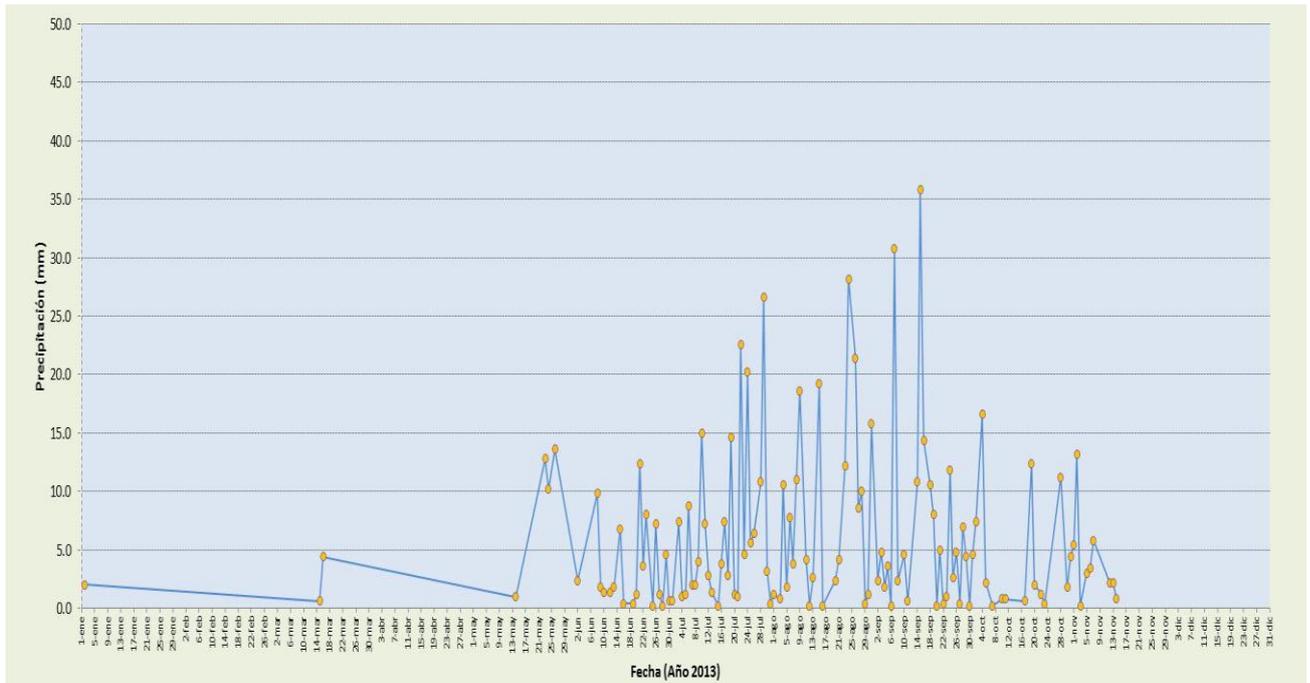


Figura 47. Precipitación diaria registrada en la microcuenca Malacate durante el 2013.

En la Figura 48 se presenta la distribución mensual de la precipitación registrada en cada microcuenca.

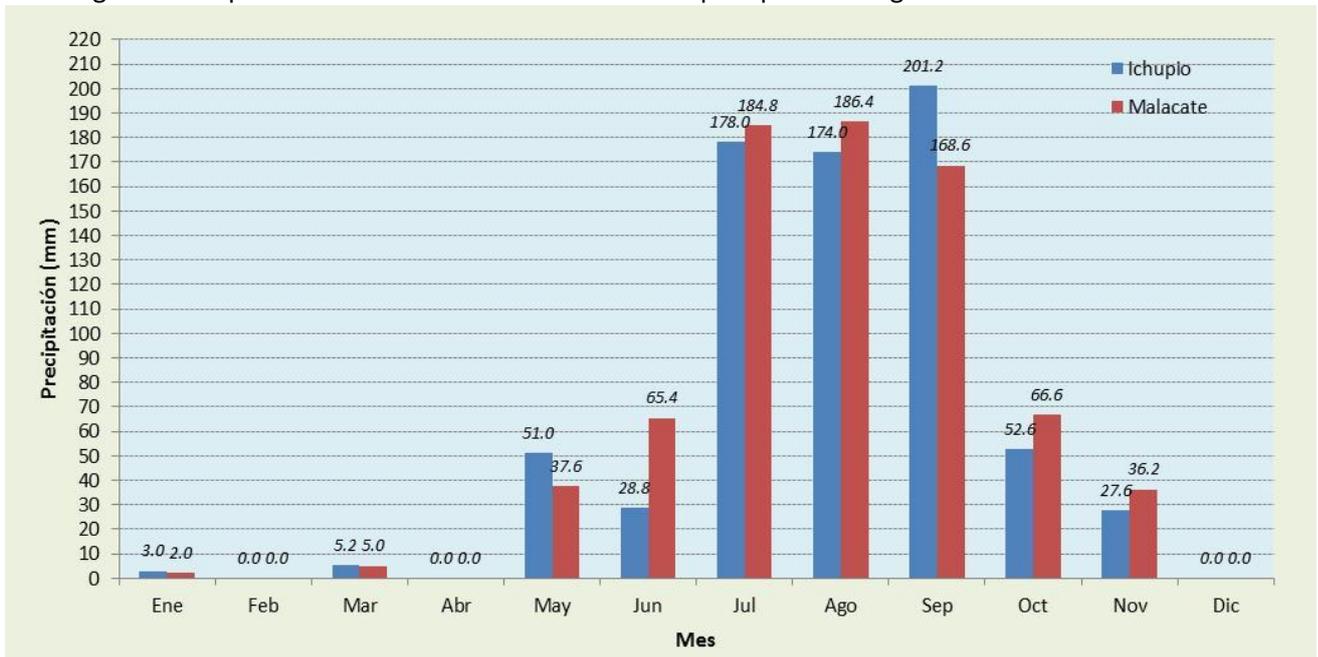


Figura 48. Precipitación mensual registrada en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el 2013.

Durante el periodo de evaluación del año 2013, se cuantificaron 721.4 mm de lluvia en la microcuenca Ichupio y 752.6 mm en la microcuenca Malacate, es decir, solamente hay 31.20 mm de diferencia entre ambas microcuencas, y de entrada recordemos que la microcuenca Malacate que es la que no tiene obras y prácticas conservacionistas y es en la que se presentaron más eventos de lluvia y por tanto más cantidad de lluvia.

También del análisis de información se encuentra que en ambas microcuencas se presentaron prácticamente el mismo número de eventos o días con lluvia, fueron 118 eventos en la microcuenca

Ichupio y 126 eventos en la microcuenca Malacate. La distribución mensual de los eventos o días con lluvia se presenta en la Figura 49.

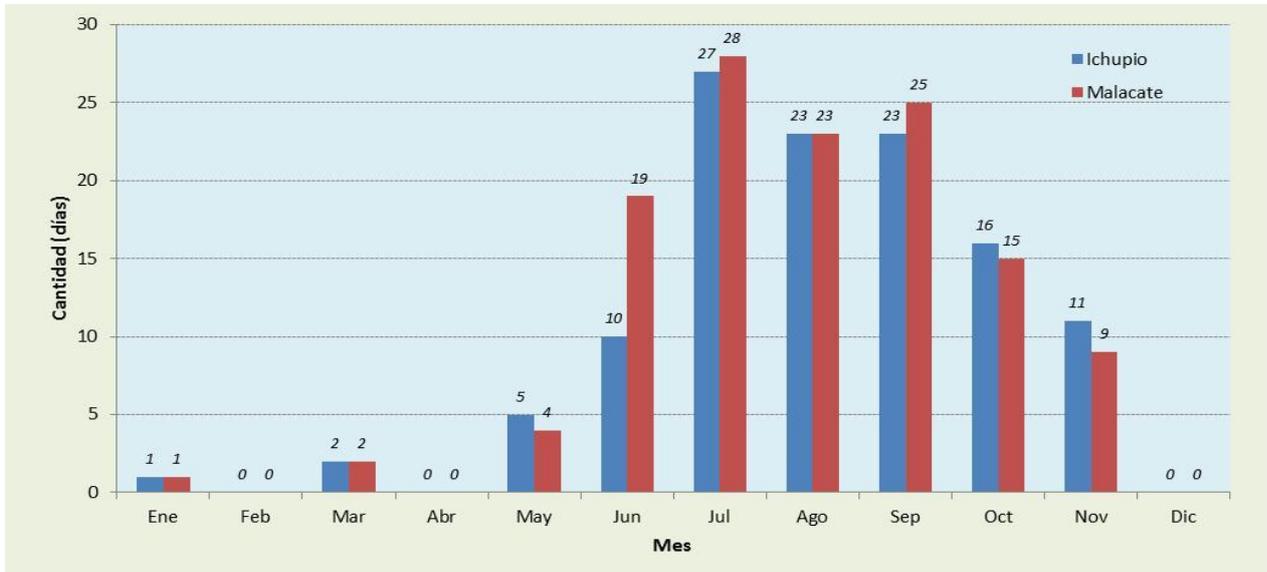


Figura 49. Distribución mensual de eventos o días con lluvia registrados en las microcuencas Ichupio y Malacate durante el 2013.

Por su parte en la Figura 50 se presentan el número de eventos por rango de precipitación, donde se observa una tendencia similar entre ambas microcuencas, destacando que los eventos de mayor precipitación (que al final son los que generan más escurrimientos superficiales) se presentaron en mayor cantidad en la microcuenca Ichupio, sin embargo, cabe recordar que en esta microcuenca es donde se tienen establecidas las obras y prácticas conservacionistas por lo que se espera que no tengan un impacto importante en la producción de escurrimientos y de sedimentos (como se analizará más adelante en los siguientes apartados).

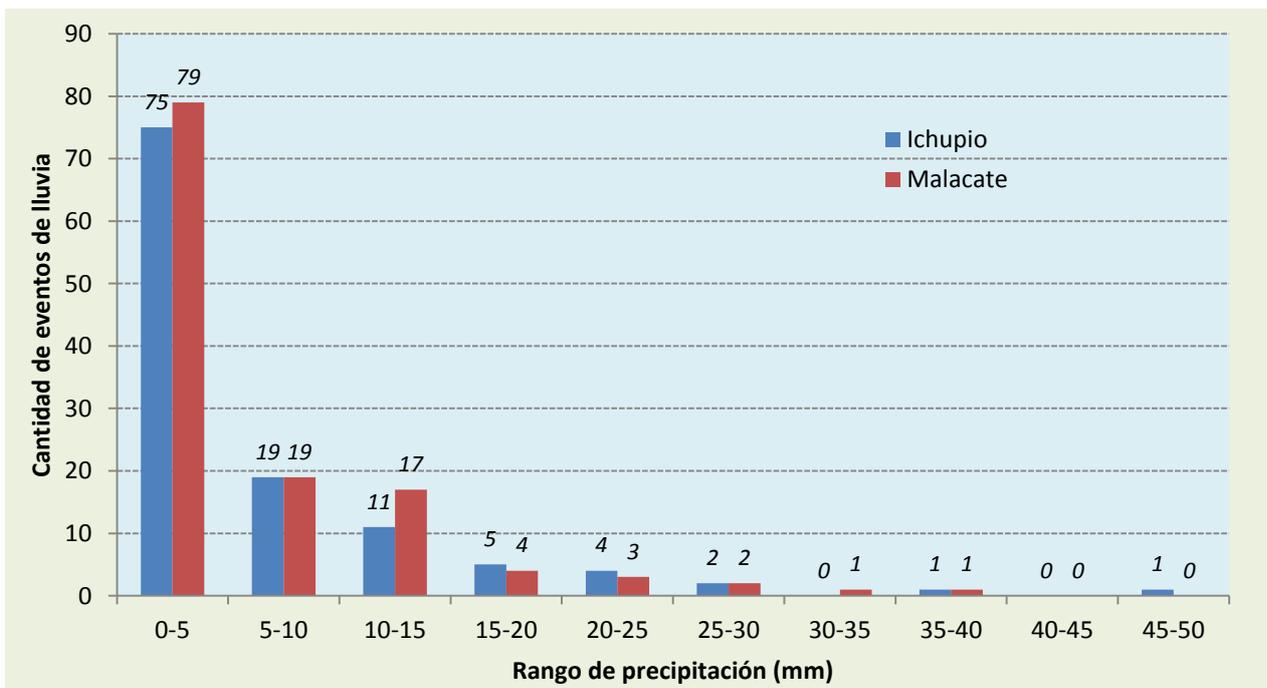


Figura 50. Distribución de eventos por rango de precipitación por microcuenca.

Por otro lado, también se puede realizar un análisis de información por mes, a partir de la cual se pueden concluir situaciones como determinar la importancia de los antecedentes de lluvias de días previos que marcan las condiciones para que se pueda presentar un evento de escurrimiento. En el Cuadro 14 se presenta la información de eventos de agosto que se registraron en ambas microcuencas.

Cuadro 14. Precipitación (mm) diaria que se presentó durante el mes de septiembre de 2013 en las microcuencas Ichupio y Malacate.

Fecha	Precipitación (mm)	
	Microcuenca Ichupio	Microcuenca Malacate
02-sep-13	8.2	2.4
03-sep-13	3.0	4.8
04-sep-13	2.4	1.8
05-sep-13	2.2	3.6
06-sep-13	0.0	0.2
07-sep-13	36.4	30.8
08-sep-13	3.2	2.4
10-sep-13	3.2	4.6
11-sep-13	3.2	0.6
14-sep-13	15.6	10.8
15-sep-13	46.0	35.8
16-sep-13	16.6	14.4
18-sep-13	10.6	10.6
19-sep-13	8.4	8.0
20-sep-13	0.0	0.2
21-sep-13	8.4	5.0
22-sep-13	0.8	0.4
23-sep-13	0.4	1.0
24-sep-13	21.2	11.8
25-sep-13	0.4	2.6
26-sep-13	4.2	4.8
27-sep-13	0.4	0.4
28-sep-13	1.0	7.0
29-sep-13	5.2	4.4
30-sep-13	0.2	0.2
Total	201.2	168.6

En el Cuadro anterior, se resalta en color naranja los eventos de lluvia que generaron escurrimiento superficial. Se observa que durante el mes de septiembre llovió menos cantidad en la microcuenca Malacate, y además, fue en la microcuenca donde se presentaron eventos de menor precipitación comparadas con las que se presentaron en la microcuenca Ichupio, pero sin embargo, generaron escurrimientos superficiales.

Analizando la información a más detalle también se llegó a encontrar que se presenta escurrimiento en lluvias que superan los 11 mm al día pero siempre y cuando existan antecedentes de precipitación de los

5 días previos que totalicen más de 30 mm. Sin embargo en lluvias mayores a 25 mm es seguro que se presente el escurrimiento si existen antecedentes de precipitación de los 5 días previos que totalicen más de 25 mm.

Caso particular es el único evento de escurrimiento que se presentó en la microcuenca Ichupio, ya que las condiciones para que se presentara el escurrimiento el 16 de septiembre es que en los dos días previos precipitaron 61.6 mm, y por tanto, el suelo estaba saturado de humedad y por eso se presentó escurrimiento.

Además, con la base de datos obtenida de los pluviómetros digitales es posible analizar a detalle cada evento de interés, y de donde se puede obtener con precisión la duración del evento en horas, minutos y segundos, la cantidad total de lluvia, así como, la intensidad promedio de lluvia para ese evento. Toda esta información permite correlacionar esas variables para relacionarlas con la producción de escurrimientos y sedimentos.

5.2. Análisis de eventos de escurrimiento

Al igual que con la lluvia, también se puede analizar los eventos de escurrimientos considerando la información básica obtenida con los sensores ultrasónicos. En los Cuadros 15 y 16, se presenta la información de escurrimientos para cada microcuenca.

Cuadro 15. Información de los eventos de escurrimiento obtenida en la microcuenca Ichupio durante el 2013.

Fecha	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Escurrimiento máximo (l/s)	Volumen (l)
16-sep-13	22.4	0.011	20	17,079
Total	22.4	0.011		17,079
	Coefficiente de Escurrimiento Anual:	0.00002	Volumen (m³):	17.08
	Coefficiente de Escurrimiento Eventos:	0.0005		

Cuadro 16. Información de los eventos de escurrimiento obtenida en la microcuenca Malacate.

Fecha	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Escurrimiento máximo (l/s)	Volumen (l)
23-may-13	9.0	0.505	388.10	753,051
29-jul-13	6.8	0.099	73.60	148,464
09-ago-13	18.6	0.302	253.40	450,147
15-ago-13	13.8	0.073	77.40	108,840
24-ago-13	27.6	0.628	532.10	937,245
26-27-ago-13	21.0	0.656	48.10	979,239

Fecha	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Escurrimiento máximo (l/s)	Volumen (l)
07-sep-13	14.8	1.362	285.60	2,032,080
08-sep-13	2.4	0.011	6.20	16,230
15-sep-13	18.2	0.868	487.00	1,295,145
24-sep-13	10.6	0.853	209.60	1,273,110
04-oct-13	16.6	0.407	253.90	606,678
19-oct-13	9.6	0.008	8.80	12,579
02-nov-13	12.8	0.328	186.60	490,140
Total	181.8	6.10		9,102,948
	Coefficiente de Escurrimiento Anual:	0.00846	Volumen (m³):	9,102.95
	Coefficiente de Escurrimiento Eventos:	0.0336		

Un análisis general de la información de ambos Cuadros nos arroja que como era de esperar en la microcuenca Malacate que es la que no tiene obras ni prácticas conservacionistas, es la que presentó los mayores escurrimientos tanto en cantidad de mm como en los escurrimientos máximos registrados, y por tanto, lo mismo sucedió con el volumen total escurrido.

5.3. Análisis de la producción de sedimentos

Para el caso de la producción de sedimentos también se obtuvieron por evento la cantidad promedio de sedimentos que van en suspensión en el escurrimiento. En el Cuadro 17 se presenta la información que se obtuvo para cada evento por microcuenca.

Observando los datos y comparándolos entre ambas microcuencas se identifica que en la microcuenca Malacate donde no se tienen obras ni prácticas conservacionistas, es la que presenta en promedio los mayores contenidos de sedimentos en el escurrimiento. Y por el contrario, en la microcuenca Ichupio debido al manejo con obras que se realiza en la cuenca de aportación es que tiene los menores contenidos de sedimentos.

Cuadro 17. Información de producción de sedimentos por evento de escurrimiento cuantificada por microcuenca durante el 2013.

Fecha	Sedimentos (g/l)	
	Microcuenca Ichupio	Microcuenca Malacate
16-sep-13		28.7
29-jul-13		9.9
09-ago-13		24.3
15-ago-13		8.1
24-ago-13		31.2
26-27-ago-13		8.4

Fecha	Sedimentos (g/l)	
	Microcuenca Ichupio	Microcuenca Malacate
07-sep-13		16.1
08-sep-13		4.9
15-sep-13		29.6
16-sep-13	6.3	11.8
24-sep-13		13.9
04-oct-13		4.8
19-oct-13		6.8
02-nov-13		28.7
Promedio	6.3	15.3

Etapa VIII Evaluación de impactos ambientales

Para realizar la evaluación de los impactos ambientales e identificar el efecto que causan en la producción de escurrimientos y sedimentos las obras y prácticas conservacionistas, es necesario hacer un análisis conjunto de la información por evento que se presentó, y también por supuesto, analizarlo de manera global con los totales obtenidos.

En los Cuadros 18 y 19 se presentan los resultados de las variables cuantificadas por evento que se presentó en el 2013 en ambas microcuencas.

Cuadro 18. Cuantificación de la producción de escurrimientos y sedimentos por evento, y degradación específica evaluada en la microcuenca Ichupio (con obras y prácticas de conservación) obtenidos en el 2013.

Fecha	Precipitación (mm)	Escurrecimiento (mm)	Escurrecimiento máximo (l/s)	Volumen (l)	Concentración de sedimentos (g/l)	Producción de sedimentos (kg)
16-sep-13	22.4	0.011	20.00	17,079	6.3	107.60
Total	22.4	0.011		17,079		107.60
	Coefficiente de Escurrecimiento Anual:	<i>0.00002</i>	Volumen (m³):	<i>17.08</i>	Producción de sedimentos (t):	<i>0.11</i>
	Coefficiente de Escurrecimiento Eventos:	<i>0.0005</i>				
	Superficie de la microcuenca (ha):		<i>101.95</i>			
	Degradación específica (kg/ha):		<i>1.06</i>			

Cuadro 19. Degradación específica, producción de sedimentos, escurrimientos y precipitación para la Microcuenca de Malacate (sin prácticas de conservación) obtenidos en el 2013.

Fecha	Precipitación (mm)	Escurrecimiento (mm)	Escurrecimiento máximo (m ³ /s)	Volumen (l)	Concentración de sedimentos (g/l)	Producción de sedimentos (kg)
23-may-13	9.0	0.505	388.10	753,051	28.7	21,612.56
29-jul-13	6.8	0.099	73.60	148,464	9.9	1,469.79
09-ago-13	18.6	0.302	253.40	450,147	24.3	10,938.57
15-ago-13	13.8	0.073	77.40	108,840	8.1	881.60
24-ago-13	27.6	0.628	532.10	937,245	31.2	29,242.04
26-27-ago-13	21.0	0.656	48.10	979,239	8.4	8,225.61
07-sep-13	14.8	1.362	285.60	2,032,080	16.1	32,716.49
08-sep-13	2.4	0.011	6.20	16,230	4.9	79.53
15-sep-13	18.2	0.868	487.00	1,295,145	29.6	38,336.29
24-sep-13	10.6	0.853	209.60	1,273,110	11.8	15,022.70
04-oct-13	16.6	0.407	253.90	606,678	13.9	8,432.82
19-oct-13	9.6	0.008	8.80	12,579	4.8	60.38
02-nov-13	12.8	0.328	186.60	490,140	6.8	3,332.95
Total	181.8	6.100		9,102,948		170,351.35
Coefficiente de Escurrecimiento Anual:		<i>0.00846</i>	Volumen (m³):	<i>9,102.95</i>	Producción de sedimentos (t):	<i>170.35</i>
Coefficiente de Escurrecimiento Eventos:		<i>0.0336</i>				
Superficie de la microcuenca (ha):				<i>149.24</i>		
Degradación específica (kg/ha):						<i>1,141.46</i>

La microcuenca Ichupio presenta un caudal total anual mucho menor que el registrado en la microcuenca Malacate. En primer lugar, además de tener una mayor superficie la microcuenca Malacate, fue la que presentó los mayores escurrimientos máximos, lo que derivó en presentarse un mayor caudal, aunado a que en su área de captación de la microcuenca no existen obras ni prácticas conservacionistas. Una particularidad observada, es que en la microcuenca Ichupio se presentaron las mayores cantidades de precipitación por evento comparados con los registrados en la microcuenca Malacate y debido a que tiene en su cuenca las obras y prácticas conservacionistas es que no se presentaron más eventos de escurrimiento.

Un dato importante a mencionar es que la microcuenca Malacate tiene una pendiente media en su área de aportación mayor (22.4%) que la de la microcuenca Ichupio (18.0%). Es importante también mencionar que ambas microcuencas cuentan con cubierta forestal en porcentaje muy similar (97.38% en la microcuenca Ichupio y 98.73% en la microcuenca Malacate). El resto de su superficie tiene uso de suelo agrícola.

Por supuesto que en lo referente a la producción de sedimentos se tuvo una respuesta similar a la encontrada en la de producción de escurrimientos, ya que en general, en la microcuenca Malacate se

encontraron las mayores concentraciones de sedimentos en los muestreos que se realizaron, aunado a que se presentaron mayores volúmenes de escurrimiento es que se tuvieron mayores pérdidas de suelo que se transportaron en el agua de escurrimiento. Finalmente, se obtuvo una producción de sedimentos de 170.35 toneladas en la microcuenca Malacate (que no tiene manejo conservacionista), y lo contrario se cuantificó en la microcuenca Ichupio (con manejo conservacionista) ya que tan solo se cuantificaron 0.11 toneladas de sedimentos que “salieron” de la microcuenca. Esto nos lleva a obtener otro parámetro que es la degradación específica, que para la microcuenca Malacate fue de 1.14 t/ha (1,141.46 kg/ha), y para la microcuenca Ichupio fue de 0.001 t/ha (1.06 kg/ha), es decir, por efecto de las obras y prácticas conservacionistas se logró reducir en 99.91% la salida de sedimentos de la cuenca, o en otras palabras, prácticamente no se produjo erosión hídrica.

Es importante recalcar, que los datos presentados, corresponden a una investigación realizada durante un año, y lo recomendable es continuar con el registro de información en por lo menos otros 4 años más para tener conclusiones más sustentadas, y será hasta entonces en que las tendencias que se obtendrán se apegarán más a la realidad para comprender la relación lluvia-escurrimiento-erosión en las microcuencas pareadas tipo de la cuenca del Lago de Pátzcuaro. Para entonces, se podrá comparar estadísticamente los rendimientos hídricos y la producción de sedimentos asociados con las dos microcuencas, y se practicarán transformaciones matemáticas apropiadas para las variables de forma que se obtenga una tendencia estadística aceptable.

Posteriormente se podrán ajustar modelos de regresión lineal simple que involucrarán como variable dependiente el rendimiento hídrico de cada microcuenca, y como variable independiente la precipitación, así como, el gasto y la producción de sedimentos, y se evaluará su validez estadística a partir de los parámetros de ajuste usualmente empleados. Ya que en otros ejercicios se ha asumido la existencia de una relación lineal entre la precipitación y el escurrimiento, es conveniente aclarar que los modelos que se obtengan no podrán emplearse para hacer estimaciones de caudal y/o de rendimiento hídrico y/o producción de sedimentos, sino que se logrará hasta que se pueda tener información más robusta para determinar las tendencias de la comparación entre variables.

El fin último consiste en, bajo la aproximación de caja negra aquí propuesta, obtener los parámetros de regresión con el fin de realizar comparaciones entre ellos y por ende determinar las diferencias entre las microcuencas.

Etapa IX: Seguimiento y control

Esta etapa final recalca la importancia que tiene el seguimiento y control que se debe realizar durante el desarrollo y ejecución del proyecto que se lleva a cabo. Es decir, darle la importancia de tener un buen seguimiento de las actividades que nos conducirán a recabar la información de calidad y tomada en los momentos precisos, por ejemplo, de cuando ocurre el evento de escurrimiento para tomar las muestras de agua de acuerdo a la metodología propuesta.

Lo mismo se orienta en el sentido de estar continuamente revisando los equipos que se tienen en campo para garantizar el correcto registro de la información tanto de lluvia por medio de los pluviómetros digitales, como del escurrimiento con los sensores ultrasónicos. Para ello, continuamente se debe estar recopilando la información de los equipos para ir generando la base de datos y supervisar que los equipos sigan funcionando y no tengan fallas.

Es indudable que este tipo de investigación no podrá arrojar datos concretos y concisos con solo un año de evaluación, sino que requerirá de más años de investigación, tiempo durante el cual se requerirá dar un seguimiento y control de las actividades y con ello identificar el problema que se llegue a presentar que pueda repercutir en los resultados que esperamos para que al momento se atienda y resuelva.

Durante el desarrollo de esta etapa es importante registrar las eventualidades que se llegan a presentar que pueden significar problemas para la obtención de la información, esto con la idea de evitarlo en un futuro tomando las medidas preventivas o precautorias, y por supuesto que también es importante registrar la solución que se realizó para resolverla.

La importancia de esta etapa radica fundamentalmente en asegurar la eficacia del registro de información para llegar a un buen análisis de los impactos ambientales de las tecnologías conservacionistas, y de esta manera se garantiza cumplir con los objetivos planteados.

5. Video “Evaluación de Impactos Ambientales de Tecnologías Conservacionistas utilizando Cuencas Pareadas”

Se presenta el Guion que se utilizó para elaborar el video.

DURACIÓN: 10 MINUTOS

ESTRUCTURA DEL GUIÓN:

	TIEMPO
INTRODUCCIÓN	1.5
CARACTERIZACIÓN DE LAS MICROCUENCAS	3.0
INSTRUMENTACIÓN DE LAS MICROCUENCAS	1.5
REGISTRO DE INFORMACIÓN	2.0
EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	2.0
TOTAL	10.0

INTRODUCCIÓN

La cuenca es la unidad territorial básica delimitada por los parteaguas (PAUSA) la cual tiene un drenaje natural y en ella se llevan a cabo interacciones físicas y biológicas de todos los actores que en ella se encuentran.

La vegetación junto con las prácticas de manejo que se realizan en la cuenca (incluyendo en éstas las prácticas conservacionistas), son un factor determinante en el balance hídrico ya que están directamente relacionados a la evapotranspiración, infiltración y el déficit de humedad en el suelo (PAUSA); por otro lado la capacidad de almacenamiento de humedad depende del uso de suelo (PAUSA), de la textura del suelo y la profundidad de las raíces de las vegetación presente (PAUSA); de manera que los cambios en el uso de la suelo, la vegetación y la presencia o no de prácticas de conservación de agua y suelo, tienen una influencia directa sobre el comportamiento hidrológico (y por ende, en el balance hídrico).

En los últimos años se han venido implementando tecnologías conservacionistas de los recursos agua, suelo, bosque en la cuenca del Lago de Pátzcuaro (PAUSA), y una incógnita que se tiene es el saber cuáles son los impactos ambientales que se han logrado con el

establecimiento de éstas acciones (PAUSA), por lo que se hace necesario evaluar de forma sistemática los impactos que se logran con la aplicación de dichas tecnologías (PAUSA), utilizando el método de cuencas pareadas, con la cual se estudian microcuencas con y sin aplicación de prácticas y obras conservacionistas.

Para medir los impactos de las prácticas de conservación sobre el rendimiento hídrico y la producción de sedimentos se eligieron dos microcuencas contiguas (PAUSA) Ichupio (con prácticas de conservación) y Malacate “testigo” (sin prácticas de conservación), (PAUSA) ambas correspondientes a la cuenca de Pátzcuaro.

CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

ANIMACION (UBICACIÓN DE LA CUENCA)

Las Microcuencas Ichupio (101.95 ha) y Malacate (149.24 ha) se localizan en la zona Oeste del municipio de Tzintzuntzan, en el estado de Michoacán (PAUSA) cuentan con una superficie total de 251.19 ha

Clima

El clima que predomina en las microcuencas es del tipo C(W2)(W) que se caracteriza como templado subhúmedo con lluvias en verano (PAUSA), con temperatura media anual de 14-20 °C, precipitación total anual de 900-1400 mm; y una evapotranspiración 800 mm.

Pendiente

Las microcuencas presentan pendientes moderadas, Ichupio (18%) y Malacate 22.40% (PAUSA), sin embargo, en la distribución de pendientes por rangos se observa que la microcuenca Malacate concentra grandes extensiones con pendientes severas tanto en áreas cercanas a su cauces como en el límite sur (PAUSA), mientras que la pendiente en la microcuenca Ichupio es moderada en gran porcentaje de su superficie.

Uso de suelo

En ambas microcuencas la categoría de uso de suelo predominante es

forestal (PAUSA); con 73 ha en Ichupio y con 91 ha en Malacate (PAUSA). Los pastizales en las microcuencas se agruparon en tres categorías: Pastizal-Forestal (Pf) que domina en 24.86 ha en Malacate (PAUSA), (10.72 ha) en Ichupio (PAUSA); Pastizal Forestal erosionado (E-Pf), en Ichupio 1.27 ha y 2.74 ha en Malacate (PAUSA); mientras que la categoría Forestal-pastizal (Fp) cuenta con 7.53 ha en Ichupio y 19.34 ha en Malacate.

Las áreas agrícolas se encuentran en 3 categorías Agricultura (A) (PAUSA), Agricultura de ladera (AL) y Agricultura de temporal (AT) (PAUSA). En Ichupio estas áreas juntas suman 3.48 ha (PAUSA) mientras que en Malacate solo hay agricultura de temporal en 1.77ha.

Otras superficies susceptibles a erosión se agrupan con la clave "D" se encuentran áreas sin vegetación 5.34ha en Ichupio y 7.37 ha en Malacate. Se estima que en Malacate hay 1.80ha de Reforestación-zonas erosionadas (RF-E) (PAUSA) y finalmente una pequeña superficie de Ichupio es Frutal (0.03ha).

Obras de conservación en la Microcuenca Ichupio

Las prácticas de conservación implementadas en la microcuenca Ichupio se constituyen por las siguientes principalmente:

ANIMACION Y PRESENTACIÓN DE LAS OBRAS

- Presa de mampostería
- Presa de geocostales
- Presas de piedra
- Reforestación con especies como *Pinus pseudostrobus*, maguey y pasto vetiver

Problemática común

Deforestación

En general en las cuencas de Pátzcuaro la deforestación se lleva a cabo por parte de la población local principalmente, el uso primordial se destina a la venta de madera o leña (PAUSA).

Arrastre de suelo y agua hacia el lago Pátzcuaro

El arrastre de suelo y agua hacia el lago de Pátzcuaro, este fenómeno se observa básicamente en los meses de lluvia, lo que conlleva al azolvamiento del lago.

Erosión

La erosión es un fenómeno natural o antrópico de permanente transformación de la superficie del suelo por su interacción con agentes como el viento y el agua (AGUA); dicho fenómeno puede traer daños de alta relevancia, (PAUSA) en campo los sitios en los que se observa la mayor grado de erosión corresponde principalmente a la parte sureste de la microcuenca Ichupio (PAUSA), en las zonas en las que también se han implementado las prácticas de conservación.

Asentamientos irregulares

Los asentamientos irregulares se llevaron a cabo recientemente en la microcuenca Ichupio (PAUSA), algunas personas incluso usaron los materiales (piedra) de las obras de conservación como linderos de sus predios (PAUSA), actualmente solo se observan las construcciones provisionales y linderos establecidos (PAUSA) sin embargo, las casas están inhabitadas.

INSTRUMENTACIÓN Y REGISTRO DE INFORMACIÓN

La instrumentación de las cuencas consiste en la instalación de pluviómetros digitales para la medición de la precipitación (PAUSA) y el aforador de garganta larga con sensor ultrasónico para cuantificar el gasto (escurrimiento superficial) de las microcuencas

El pluviómetro es un equipo que consta de un embudo que recibe el agua de lluvia en un área conocida y la vierte sobre dos balancines. Registra información de temperatura cada 5 minutos y precipitación en cada evento ocurrido. (PAUSA) La recopilación de información se realiza de manera *in situ*, en campo se extrae la información de la memoria de almacenamiento del pluviómetro, posteriormente la

información se procesa en una hoja de cálculo como EXCEL.

Para la diseñar el aforador primero se ubica en campo el sitio donde se va a construir, y para el caso se realizan recorridos de campo para seleccionar el lugar tomando en cuenta diversos criterios técnicos, esto se realizó en los cauces de las microcuencas Ichupio y Malacate.

Posteriormente se realiza el levantamiento topográfico del cauce y se procede a diseñar el aforador de acuerdo con las dimensiones de las secciones del cauce y de los escurrimientos máximos calculados. Con el diseño se procede a la construcción del aforador en campo.

Para la instalación de los sensores ultrasónicos se requiere construir una caseta donde se resguardará el equipo. Para proveer de energía para el equipo sensor se instala un panel solar.

El sensor ultrasónico registra información de gasto cada 5 minutos (PAUSA) la recopilación de información se puede realizar de dos formas.

In situ: se procede a la toma de información mediante la memoria de almacenamiento del sensor, la cual se descarga en la computadora. (PAUSA)

Ex situ: la información se envía en un archivo electrónico por vía de mensaje a un correo electrónico configurado para que se haga cada hora.

De manera manual en campo se toman muestras de agua de 1 litro en el aforador cuando un evento de precipitación genere escurrimiento.

Las muestras de escurrimiento se utilizan para cuantificar en laboratorio el contenido de sedimentos.

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

El impacto de las obras de conservación en el ciclo del agua y

producción de sedimentos ha sido un tema importante en la investigación de la gestión de la hidrología (PAUSA)

Con esta evaluación se obtiene información que ayuda a hacer correcciones o modificaciones a las prácticas u obras de conservación establecidas si es que se requiere, y además, también se puede sustentar la necesidad de establecerlas en la cuenca para disminuir la degradación del suelo e incrementar la cobertura vegetal.

Los resultados que se obtuvieron aplicando esta metodología fueron los siguientes: en la microcuenca Ichupio que tiene prácticas y obras de conservación) (PAUSA) se obtuvo un volumen de escurrimiento de 2,293.71 m³, (PAUSA) una producción de sedimento de 42.96 toneladas y por tanto la degradación específica es de 0.42 ton/ha.

MICROCUECNA ICHUPIO (CON PRACTICAS)

<u>Fecha</u>	<u>Volumen (m³)</u>	<u>Sedimentos (t)</u>
<u>20-jul</u>	<u>36.54</u>	<u>0.90</u>
<u>12-ago</u>	<u>6.15</u>	<u>0.09</u>
<u>14-ago</u>	<u>528.98</u>	<u>9.73</u>
<u>16-ago</u>	<u>351.79</u>	<u>7.77</u>
<u>25-ago</u>	<u>259.61</u>	<u>5.04</u>
<u>31-ago</u>	<u>1,040.63</u>	<u>18.32</u>
<u>16-sep</u>	<u>51.87</u>	<u>0.80</u>
<u>22-sep</u>	<u>18.15</u>	<u>0.30</u>
<u>Total</u>	<u>2,293.71</u>	<u>42.96</u>
<u>Degradación específica: 0.42 t/ha</u>		

En el caso de la microcuenca Malacate que no tiene prácticas y obras de conservación (PAUSA), se obtuvo un volumen escurrido de 25,984.71 m³, y una producción de sedimentos de 725.51 toneladas, por lo que la degradación específica es de 5.04 ton/ha.

MICROCUECNA MALACATE (SIN PRACTICAS)

<u>Fecha</u>	<u>Volumen (m³)</u>	<u>Sedimentos (t)</u>
<u>20-jul</u>	<u>756.18</u>	<u>27.83</u>
<u>14-ago</u>	<u>1,452.12</u>	<u>35.72</u>
<u>16-ago</u>	<u>1,280.46</u>	<u>35.08</u>
<u>25-ago</u>	<u>5,417.38</u>	<u>173.90</u>

<u>31-ago</u>	<u>12,772.68</u>	<u>388.29</u>
<u>16-sep</u>	<u>3,989.11</u>	<u>85.77</u>
<u>22-sep</u>	<u>316.79</u>	<u>5.92</u>
Total	<u>25,984.71</u>	<u>752.51</u>
Degradación específica: 5.04 t/ha		

Es decir, las prácticas y obras conservacionistas tienen un impacto en reducir los escurrimientos hasta en un 91% y esa cantidad de agua se infiltra en la cuenca. Y en cuanto a los sedimentos, con las prácticas y obras se detiene hasta el 94% del suelo que se erosiona y por tanto ya no afecta al Lago de Pátzcuaro.

Es así como con este tipo de investigación de cuencas pareadas se pueden evaluar los impactos que una serie de prácticas y obras de conservación pueden generar y se pueden obtener datos precisos para cuantificar el incremento de la infiltración del agua de lluvia, de cuanto se disminuyen los escurrimientos, y en cuanto se reducen la erosión y la sedimentación.

(FIN)

6. Bibliografía

Antezana C, J. C. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca de Taquiña. Tesis de maestría en levantamiento de recursos hídricos (manejo y conservación de cuencas)" del Universidad Mayor de San Simón.

Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A. y Vertessy, R. 2003. A critical review of paired catchments studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Murray-Darling Basin Commission and CSIRO, Canberra. 56 pp.

Bruijnzeel, L.A. y Vertessy, R.A., 2004. Impacts of forest management on streamflow.. En: Burley, J., J. Evans J.Y. Quist (Eds.) Encyclopedia of Forest Science. Elsevier, The Netherlands. pp. 358-366

Cayssials, R. Long, M. Pesce, F. 1995. Estudio Integrado de la Cuenca del Arroyo Tala. Departamento de Geografía. Facultad de Ciencias. Universidad de la República.

Chow, V. T., D.R. Maidment y L. W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill- Interamericana. Bogotá, Colombia. 584 pp.

Colegio de Postgraduados. 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. SARH- SPP-CP. Chapingo, Méx. 574p + apéndices.

Comisión de comunidades europeas. 2002. Comunicación de la comisión al consejo, el comité económico social y el comité de las regiones, hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Bruselas [Disponible en línea] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/es/com/2002/com2002_0179es01.pdf

Departamento Técnico de Administración del Medio Ambiente. 2012. Hidrología. Parque ecológico distrital de montaña entrenubes. Tomo I: Componente Biofísico. [Disponible en línea] http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/ecosistemas/areas_protegidas/en_a10.pdf (Consultado el 05 de Enero del 2012).

Dunne, T. and Leopold, L. B. 1978. Water in environmental planning. W. H. Freeman and Company, New York. 818 pp.

Espinoza, G., 2001, Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Centro de Estudios para el Desarrollo CED. Santiago-Chile, 186 p

FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.

Fernandes-Coppel A. I., Herrero L. E. 2001. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ - Satélite Landsat. Universidad de Valladolid.

Fernández-Coppel, I. A., Herrero L. E. 2001. Clasificación de cubiertas con idrisi. Universidad de Valladolid. [Disponible en línea] www.elgeomensor.cl/downloads/.../index.php?file...con_IDRISI.pdf (consultado el 26-marzo-2012)

Figuerola S. B., Amante O. A., Cortes T. H. G., Pimentel L. J., Osuna C. E. S. , Rodríguez O. J.M. 1991. Manual de predicción de pérdida de suelo por erosión. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Agricultura, Dirección general de política Agrícola. Colegio de Postgraduados centro regional de zonas áridas y semiáridas. pp162.

García-Consuegra Bleda, J. 1997. Problemática en la clasificación de imágenes de satélite Landsat. Ensayos revista de la escuela universitaria del ministerio de Albacete. No12. pp. 319-330 [disponible en línea] <http://www.uclm.es/ab/educacion/ensayos/revista12.asp> (consultado 26-marzo -2012)

García-Oliva, F. 2012. Algunas bases del enfoque ecosistémico para la restauración. Instituto Nacional de Ecología. [Disponible en línea] <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/467/garcia.html> (consultado el 09-05-2012)

Giménez S. M. C., García R. J. L. 2008. Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED. Aplicación al Arroyo del Lugar, Guadalajara (España). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros de Montes. Departamento de Proyectos y Planificación Rural. 391 pp con anexos.

Haan, C. T., B. J. Barfield y J. C. Hayes. 1994. Design hidrology and sedimentology for small catchments. Academic Press. San Diego CA. USA. 588pp.

Hatton, T., P. Reggiani y G. Hodgson. 2002. The role of trees in the water salt balances of catchments. Stirzaker, R., R. Vertessy y A. Sarre (eds). Trees, Water and Salt: an Australian Guide to Using Trees for Healthy Catchments and Productive Farms. Joint Venture Agroforestry Program and CSIRO, Australia. Pp 28-42.

Hawkins, R. H. 1978. Effects of rainfall intensity on runoff curve numbers. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Vol. 8. 53. 64 pp.

Holling, C.S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics 4:1-23.

Hoyos P. J. G., 2007. Aplicación de algoritmo genéticos a la clasificación de imágenes de satélite en el marco de los servicios grid inteligentes estado del arte. Ciencia e ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2 Diciembre, Bogotá, pp. 95-109.

Hudson, N. W. 1981. Soil conservation. 2ª. Ed. Cornell University Press. Ithaca, NY. USA. 324p.

Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 2012. Modelo de la ecuación universal de pérdida de suelos. [Disponible en línea] <http://www.miliarium.com/prontuario/medioambiente/suelos/Rusle.htm>

Maderrey, R. L. E. y Jiménez, R. A. 2005. Principios de hidrogeografía – Estudio del ciclo hidrológico. UNAM. Serie Textos Universitarios. Num. 1. Instituto de Geografía. 105 pp.

Mannaerts, C. 1999. Factores de erosión. Módulo 11: Degradación de suelos. ITC. Curso de Postgrado en levantamiento de recursos hídricos. Notas de clase y ejercicios. CLAS. Cochabamba, Bolivia.

Mariano, J. 1991. Manual de Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. Universidad Federal de Santa María. Santa María. R.S. Brasil. 2a. Edición.

Martínez M. M. 1981. Notas de clase. Hidrología Superficial. 6º año de Irrigación (Agosto-Diciembre/81) Depto. de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx.

Mintegui A. J. A., Robredo S. J. C., 2008. Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña. Programa hidrológico internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (phi-LAC). UNESCO.

Montes León, L. M. A., Domínguez C. M. A. y Ventura R. E. Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un sig. Maestría en Hidráulica. Facultad de Ingeniería-División del Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro.

MOPT – Ministerio de Obras Públicas y Transporte. 1991. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología. Tercera Edición. Madrid, España. 809 pp.

Ortiz Solorio Carlos A. Pájaro H. D. 1988. Mapa mundial de suelos FAO-UNESCO. Centro de Edafología Colegio de Postgraduados. México. 119 pp.

Pizarro R, Morales C., Vega L., Olivares C., Valdés R., Balocchi F., 2009. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Organización de las Naciones Unidas para la Educación la ciencia y la cultura, Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC), Facultad de ciencias forestales de la Universidad de Talca. pp94.

Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and K. E. Saxton. 1982. Estimation of soil properties. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 25 (5): 1316-1320.

Rial E. P., González L., 1999. Manual de prácticas con IDRISI. E.E. A. Santa cruz. Convenio INTA-UNPA-CAP. [disponible en línea] <http://redgeomatrica.rediris.es/manuales/utnidf5.pdf> (consultado el 26 - marzo-2012).

Schwab, G. O., R. K. Frevert, T. W. Edminster y K. K. Barnes. 1990. Ingeniería de conservación de suelo y agua. 3ª Ed. Limusa. México. D. F. 570p.

Strahler, A. 1986. Geografía Física. Ed. Omega. Barcelona, España.

Universidad Autónoma Chapingo. 2008. Cuenca. Apuntes de topografía para agrónomos. [Disponible en línea] <http://www.virtual.chapingo.mx/dona/topos/cuenca.pdf> (consultado 5 -Enero-2012)

Walters, C.J. 1986. Adaptive Management of Renewable Resources. McGraw-Hill, Nueva York.