



RESUMEN

Este trabajo de investigación está dirigido hacia la caracterización de la erosión y la carga de sedimentos en suspensión que se producen en la microcuenca del Río Tabacay. Mediante la recopilación de fuentes de información como i) datos de los pluviógrafos colocados en 3 puntos de la microcuenca, Condoryacu, Nudpud y Guapán, se pudo mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos relevantes para la zona y que influyen en la erosión, ii) sedimentos en suspensión monitoreados mediante estaciones automáticas y finalmente iii) la realización de aforos en cada una de las estaciones, que permitió la validación de sus curvas de descarga, de esta manera se pudo aportar al conocimiento del comportamiento de la microcuenca en cuanto a erosión y producción de sedimentos por prácticas agrícolas, movimientos de masa, falta de cobertura, construcción de caminos sin control entre otros.

El trabajo concluye con la estimación de rangos de valores de tasas de erosión anuales para la zona alta, media y baja dentro de la microcuenca, recomendando la obtención de los factores propios de la zona que permitan el cálculo de estas tasas.

Palabras clave:

Tabacay, sedimentos, aforo líquido, aforo sólido, erosión, intensidad de lluvia, precipitación, estación meteorológica, hidrogramas, curvas de descarga.



CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	3
LISTA DE FOTOS	4
LISTA DE FIGURAS	4
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTOS	7
1. INTRODUCCION	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Alcance	8
1.3 Justificación.....	9
1.4 Auspicio	9
1.5 Objetivos.....	10
2. MARCO TEORICO	11
2.1 Hidrología en ecosistemas de montaña	11
2.2 Monitoreo hidrometeorológico.....	12
2.3 Producción de sedimento y erosión en ecosistemas de montaña.....	12
2.3.1 Produccion de sedimentos	13
2.3.2 Erosión del suelo	16
2.3.3 Conservación del suelo.....	18
2.4 Modelos de erosión.....	21
2.4.1 Modelos empíricos.....	21
2.4.2 Modelos con base física	26
2.5 Métodos de medición de caudal líquido y sólido en cauces	26
2.5.1 Caudal líquido.....	26
2.5.2 Caudal sólido	29
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1 Área de estudio	32
3.1.1 Ubicación.....	32
3.1.2 Infraestructura y Servicios.....	33
3.1.3 Caracterización biofísica de la microcuenca.....	33
3.1.4 Información relevante y estudios realizados para la microcuenca	41
3.2 Métodos	42
3.2.1 Método para medición de sedimentos en suspension.....	42
3.2.2 Metodo para aforo en cauces	43
4. DISCUSION Y RESULTADOS	47
4.2 Caracterización de los parámetros preliminares para el modelo de erosión RUSLE.	49
4.3 Caracterizacion de las estaciones de aforo	54
4.4 Caracterización del sedimento en suspensión.....	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	66
7. ANEXOS	67



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Valor de k para suelos tropicales.....	23
Tabla 2.2 Estructura del suelo clasificado en 4 clases.	23
Tabla 2.3 Velocidad de permeabilidad del suelo clasificado en 6 niveles.	24
Tabla 2.4 Valor del exponente de la longitud de pendiente m.....	24
Tabla 3.1 Características físicas de los cauces de la microcuenca.....	33
Tabla 3.2 Valores de pendientes en la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004.....	34
Tabla 3.3 Valores de precipitación en mm mensuales de la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004	34
Tabla 3.4 Valores de evapotranspiración mensuales de la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004	36
Tabla 3.5 Tipos de suelo en la microcuenca del río Tabacay. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004.....	37
Tabla 3.6 Distribución de la tasa de erosión en la cuenca del Río Paute (Pacheco, 2004)	40
Tabla 3.7 Distribución de la tasa de erosión en la cuenca media del Río Paute (Pacheco, 2004)	40
Tabla 4.1 Factor I30 para Nudpud, Guapán y Condoryacu	47
Tabla 4.2 Valores máximos de intensidad para cada una de las estaciones con diferentes duraciones	48
Tabla 4.3 Valores de R máximos en cada estación	50
Tabla 4.4 Valores de K adoptados para el cálculo de las tasas de erosión en la microcuenca.....	50
Tabla 4.5 Valor de C adoptados para varios tipos de cobertura en la microcuenca del Tabacay	51
Tabla 4.6 Valores de las tasas de erosión en la microcuenca.....	52
Tabla 4.7 Ecuaciones teóricas de las curvas de descarga.....	58
Tabla 4.8 Ecuaciones de relación de caudal líquido y sólido	62
Tabla 4.9 Producción de sedimentos en las estaciones Mapayacu y Nudpud .	62



LISTA DE FOTOS

Foto 3.1 Presencia de eucalipto en la microcuenca Foto 5.....	38
Foto 3.2 Muestreadores portables ISCO Foto.....	42
Foto 3.3 Equipo de aforo Flow Tracker	45
Foto 3.4 Haces que miden la velocidad de las partículas	45
Foto 4.1 Aforador trapezoidal de régimen supercrítico en Tabacay AJ Burgay	54
Foto 4.2 Aforador trapezoidal de régimen supercrítico en Nudpud AJ Tabacay	55
Foto 4.3 Aforador san Dimas. Mapayacu	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Relación entre producción de sedimentos y precipitación media anual efectiva. Adaptado de R.P.C. Morgan, 1997	13
Figura 2.2 Relación entre producción de sedimentos y escorrentía media anual. Adaptado de R.P.C. Morgan, 1997	14
Figura 3.1 Ubicación geográfica de la microcuenca del Tabacay en la provincia del cañar.....	32
Figura 3.2 Ecuación de la energía total.....	44
Figura 4.1 Valores I_{30} típicos en la microcuenca	49
Figura 4.2 Ubicación de las estaciones de muestreo	56
Figura 4.3 Curva de descarga estación Mapayacu	57
Figura 4.4 Curva de descarga Nudpud AJ Tabacay.....	57
Figura 4.5 Curva de descarga Tabacay AJ Burgay.....	57
Figura 4.6 Curva de gasto. Estación Mapayacu.....	58
Figura 4.7 Curva de gasto. Estación Tabacay AJ Burgay	59
Figura 4.8 Curva de gasto. Estación Nudpud AJ Tabacay.....	60
Figura 4.9 Relación de QI y Qs de la estación Mapayacu	61
Figura 4.10 Relación de QI y Qs de la estación Nudpud	61



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

**“CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY”**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

AUTORA: DANIELA CECILIA CAJAS PARRA

DIRECTOR: ING. FELIPE CISNEROS E. PH.D

TUTOR: ING. ESTEBAN PACHECO MSC

**CUENCA ECUADOR
2010**



DEDICATORIA

A las personas más importantes de mi vida: Mis padres Cornelio y Cecilia y mis hermanos Valeria y Cornelio por haberme apoyado desde el inicio de este largo camino, por su paciencia, y comprensión, por haberme brindado su confianza y amor incondicional.

A mis amigos y familiares que siempre estarán presentes en mi corazón.

Gracias por haberme ayudado a culminar esta importante etapa de mi vida.

LA AUTORA



AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios por haber sido mi guía durante todo este tiempo, dándome fortaleza para alcanzar esta meta tan anhelada e iluminar siempre mi camino.

Al Programa para el manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca en las personas del Ing. Felipe Cisneros E. en calidad de director y al Ing. Esteban Pacheco por su paciencia y conocimientos brindados durante la tutoría de este trabajo.

A la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Azogues (EMAPAL) y todo el personal por el apoyo brindado.

LA AUTORA



1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La I. Municipalidad de Azogues, la Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Azogues (EMAPAL), el Consejo de Gestión de la Cuenca del Río Paute (CG Paute) y la Universidad de Cuenca mediante Convenio de Cooperación Interinstitucional, estructuraron el Plan de Manejo para la Microcuenca del río Tabacay – Cuenca del Paute.

La elaboración del plan de manejo de la microcuenca del Tabacay propuso se inicie un proceso de monitoreo hidrológico y meteorológico mediante la implementación de una red de estaciones que aportarían información valiosa para la microcuenca.

La red hidrográfica de la cuenca del río Tabacay está integrada principalmente por los ríos Tabacay y Nudpud y se consideró necesario el monitoreo del caudal líquido y de carga de sedimentos en sus cauces.

La Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Azogues (EMAPAL) y Programa para el manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca suscribieron un convenio de cooperación para el manejo de estaciones climatológicas y de monitoreo de sedimento en suspensión en las tres estaciones mencionadas anteriormente.

El acuerdo establece un programa de manejo de estaciones de monitoreo de sedimento en suspensión en las estaciones ISCO de Guapán, Rubíes y Mapayacu, el manejo de estaciones pluviométricas de Condoryacu y Guapán y climatológica Nudpud en la microcuenca del río Tabacay.

Debido a que es un problema que afecta la calidad y cantidad de agua es importante en su estudio la caracterización de la carga de sedimentos en suspensión de cada uno de sus cauces.

1.2 Alcance

La intención del presente estudio es determinar el aporte de carga de sedimento en suspensión de cada uno de los cauces a la microcuenca del río Tabacay a través del análisis y procesamiento de información hidrológica y de



producción de sedimento recopilada en las estaciones mediante muestreadores portátiles automáticos ISCO 6712, colocados en puntos estratégicos de la microcuenca del Tabacay.

1.3 Justificación

El río Tabacay es de gran importancia ya que sus aguas son aprovechadas por la empresa municipal de agua potable y alcantarillado EMAPAL y varias juntas de agua para dotar de agua potable a la ciudad de Azogues y a un importante sector rural. Además la microcuenca del Tabacay abastece con el 100% de agua utilizada para el sistema de potabilización de las plantas de tratamiento de la ciudad.

La creciente explotación de recursos naturales de la microcuenca del río Tabacay en conjunto con el incumplimiento en las normas medioambientales necesarias para la construcción de obras civiles y servicios, se han convertido en una de las principales causas de degradación, esto se observa en la gran cantidad de sedimentos que se produce y es conducida hacia los cauces de la red hidrográfica, convirtiendo a la microcuenca del río Tabacay en uno de los principales focos de aporte de sedimento a la cuenca del río Paute.

Por tanto es un problema que se mantiene latente ya que la degradación de los suelos contribuye al incremento de carga de sedimento en suspensión y ataca además a la calidad y cantidad de agua.

Otra fuente de aporte de sedimentos son los caminos vecinales; su construcción se ha realizado sin tomar en cuenta parámetros básicos de conservación y existe una falta total de medidas de litigación.

Finalmente una fuente potencial de sedimentos es la actividad ganadera en áreas con pendiente pronunciada, en donde se observa reptaciones y micro-deslizamiento producido por sobre pastoreo.

Es por esto que se requiere conocer el aporte de carga de sedimento en suspensión de los cauces de la microcuenca del Río Tabacay, para lo que se considera fundamental llevar a cabo estudios investigativos que permitan a futuro obtener el potencial de la real producción de sedimento en áreas degradadas.

1.4 Auspicio

El presente trabajo contó con el auspicio del Proyecto Integrated Water Quality Management que se desarrolla en el marco del convenio de cooperación



interuniversitaria entre la Universidad de Cuenca y el VLIR (Consejo interuniversitario flamenco de Bélgica).

1.5 Objetivos

Objetivo principal

Caracterizar el aporte de la carga de sedimento en suspensión en cauces que disponen de monitoreo de concentración de sedimento en el río Tabacay.

Objetivos específicos

- Estudiar métodos actuales para muestreo y monitoreo hidrológico de sedimento en suspensión en cauces de montaña.
- Analizar y validar la información de carga de sedimento en puntos estratégicos de los cauces de la microcuenca.
- Identificar las zonas de interés que influyen para discriminación del monitoreo hidrológico.
- Elaborar un programa de monitoreo y medición adecuado para el área de Estudio.



2. MARCO TEORICO

2.1 Hidrología en ecosistemas de montaña

El estado de conocimiento de la ciencia de hidrología de montañas está en pleno desarrollo. El desarrollo del conocimiento está sujeto a la falta de información de los procesos hidrológicos en general y de manera particular al escaso conocimiento del estado original de los ecosistemas. Por otro lado, la intervención antrópica ha traído consecuencias negativas y han cambiado entre otros aspectos, el uso del suelo y su cobertura vegetal.

Entre las principales características de los ecosistemas de montaña que han permanecido en su estado natural están la alta capacidad de almacenamiento de agua de los suelos y la protección que ejerce la vegetación en el suelo contra la lluvia, evitando así la erosión y secado.

Las cuencas de montaña son zonas de drenaje o captación donde se junta el agua de las montañas y corre río abajo para alimentar los ríos y los lagos, pero la presión del crecimiento demográfico, la deforestación, las prácticas agrícolas insostenibles, el cambio climático del planeta, entre otros están ejerciendo un gran peso y por lo tanto poniendo en peligro el agua dulce disponible.

Uno de los principales problemas es el movimiento del agua de lluvia y la escorrentía superficial, desde la parte alta de la cuenca hasta la parte baja que promueve el desprendimiento y arrastre de partículas (sedimentos). Las zonas aradas o agrícolas no son las principales fuentes de producción de sedimentos, se deben considerar los caminos vecinales, movimientos de masas, erosión en cárcavas, erosión de márgenes, para evitar conclusiones erróneas de tasas de sedimentos. El aporte de las zonas cultivadas se da en menor proporción en función de las condiciones de manejo.

Bajo condiciones de lluvias que superan la capacidad de infiltración de los suelos, o de prácticas como deforestación, sobrepastoreo, quema, agricultura intensiva sin prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas, apertura de vías de comunicación, construcción de viviendas en zonas vulnerables, se producen un daño que se observa en la erosión, los movimientos de masa, disminución de la cantidad y la calidad del agua y graves desequilibrios ecológicos.

Todo lo que ocurra en las cuencas hidrográficas de montaña repercute enormemente en las zonas bajas, pero el buen estado de la totalidad de la



cuenca hidrográfica depende de la prevención de la degradación ambiental en esas zonas.

Las especies protectoras de los ecosistemas de montaña son los bosques que deben ser conservados para disminuir los efectos que se mencionan anteriormente. La reforestación reduce la producción de sedimentos a corto y mediano plazo. Algunos estudios indican que para zonas en donde casi no hay cobertura, especies como el pino han dado buenos resultados.

2.2 Monitoreo hidrometeorológico

Disponer de estaciones hidrometeorológicas permite el conocimiento de las condiciones locales de temperatura, humedad, intensidad de los vientos, radiación solar y la cantidad de lluvia-esorrentía que llegase a presentarse dentro de una cuenca hidrográfica en estudio.

Esta actividad puede ir más allá de un indicador de vulnerabilidad ya que es de gran utilidad para conocer la evolución de las condiciones de la zona durante un período determinado que ayudará a largo plazo a realizar recomendaciones para planificación, diseño, la actividad agrícola y conservación de suelos.

Los parámetros hidrológico y climatológicos permiten disponer de manera cierta de una caracterización de la cuenca hidrográfica en términos de sistema hidrológico a fin de identificar de manera clara las entradas, y la respuesta.

2.3 Producción de sedimento y erosión en ecosistemas de montaña.

El agua que circula a través de ríos y arroyos naturales está constituida generalmente de material no cohesivo y puede ser afectada por parámetros como: pendiente, profundidad de flujo, tamaño de sedimentos y velocidad de caída de partículas.

El conocimiento de la carga de sedimento es un proceso de gran importancia económica para predecir problemas en presas, canales, así como también la sedimentación de un embalse aguas abajo, los cambios en la forma de ríos y estuarios.



2.3.1 Producción de sedimentos

La producción anual de sedimentos medida en una cuenca depende de muchos factores tales como el clima, el tipo de suelos, el uso de la tierra, la topografía y la existencia de embalses.

Diferentes autores relacionan la producción media anual de sedimentos con la precipitación media anual, de donde se concluye que con precipitación más intensa, la vegetación prolifera y reduce la erosión. La carga (t/año) o producción ($t/km^2/año$) de sedimentos a través de cursos de agua refleja la erosión del terreno producida aguas arriba, dentro de la cuenca de drenaje.

La Figura 2.1, relacionan la producción de sedimentos con la precipitación media anual, donde se observa que los valores máximos de producción de sedimentos ocurren en cuencas cuya precipitación media anual es igual a 300mm. Cuencas con valores entre 0 y 300mm muestran un comportamiento ascendente de producción de sedimentos.

Valores mayores a dicho valor, descienden hasta llegar a 800mm aproximadamente, donde se observa un valor constante para precipitaciones mayores.

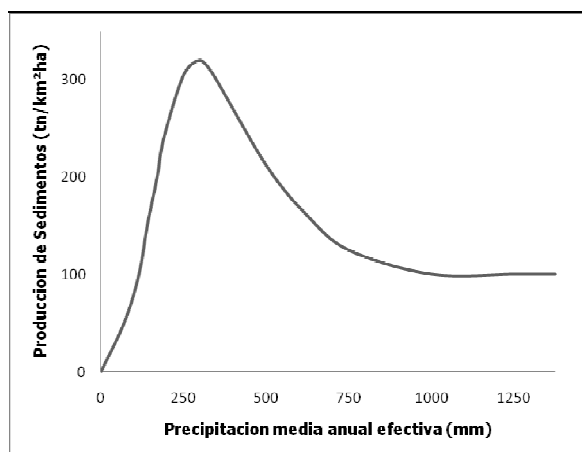


Figura 2.1 Relación entre producción de sedimentos y precipitación media anual efectiva. Adaptado de R.P.C. Morgan, 1997

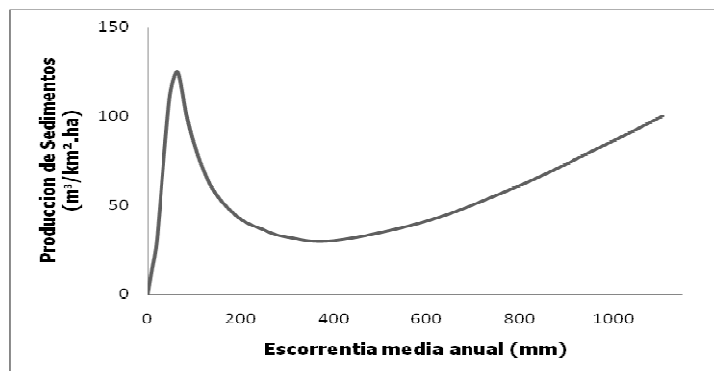


Figura 2.2 Relación entre producción de sedimentos y escorrentía media anual. Adaptado de R.P.C. Morgan, 1997

Al relacionar la escorrentía media anual con la producción de sedimentos (Figura 2.2), se observa que se tienen valores máximos de producción de sedimentos si hay valores de escorrentía aproximadamente de 50mm. Para valores mayores disminuye hasta llegar a 400mm. El comportamiento para cuencas cuya escorrentía media anual es mayor de 400mm es nuevamente ascendente.

Uno de los factores más importantes en la tasa de erosión es la falta de cobertura en ciertos lugares además del tamaño de la zona. Por tanto en cuencas hidrográficas mas grandes tiende haber mayor cantidad de sedimentos que se quedan al pie de pendientes en espera de una nueva tormenta o en ciertos casos almacenados durante años, como consecuencia de esto la tasa de erosión es mayor en cuencas pequeñas y van disminuyendo al aumentar el tamaño de la cuenca.

Se dice que la erosión más importante se produce con fenómenos de moderada frecuencia e intensidad ya que fenómenos mayores no ocurren constantemente y no contribuyen a la cantidad de suelo erosionado, cuando son períodos de retorno largos.

Las épocas más vulnerables para la erosión ocurren cuando la lluvia es importante pero la vegetación existente no es suficiente para proteger el suelo. Por tanto el máximo de erosión precede al máximo de lluvia. Un ejemplo claro es cuando se da una lluvia intensa; a mayor cobertura vegetal, menor erosión producida.

La erosión se relaciona con dos tipos de lluvia, la tormenta intensa de corta duración que supera la capacidad de infiltración de terreno y la tormenta de



larga duración y baja intensidad que sature el suelo. Sin embargo no se puede diferenciar los efectos de estos dos tipos para ciertas pérdidas de suelo.

Sedimentos en suspensión

Los sedimentos en suspensión son finos que llegan a la corriente por procesos de erosión pluvial de la cuenca vertiente o por lavado de material suelto de las márgenes.

De todos los sedimentos que transporta un río, los que se trasladan suspendidos en el agua son cuantitativamente los más importantes y su determinación resulta un aspecto central en cualquier investigación sobre el tema.

Los sedimentos en suspensión están formados por partículas que se mantienen dispersas en el agua en virtud de su naturaleza coloidal. Las partículas coloidales poseen carga eléctrica semejante, propiedad que las mantiene en solución por repulsión electrocinética.

Transporte de sedimentos en suspensión: Existe un incremento considerable de arrastre de elementos finos en donde la proporción de ellos, en relación con los gruesos es muy alta, ya que debido a su peso son más susceptibles al transporte. Prácticamente la totalidad de los elementos finos que alcanzan los cursos de agua son transportados en suspensión, dando una idea de la degradación de la cuenca.

En las cuencas de montaña son frecuentes los movimientos de masa en donde ocurre lo contrario, en esta forma de erosión predominan los elementos gruesos. De esta forma los elementos finos transportados en suspensión no definen la intensidad erosiva que se da en la cuenca.

La capacidad de un río para transportar sedimentos en suspensión depende de las fuerzas de sustentación que se generan como componentes verticales de la velocidad del flujo. La partícula se mantiene en suspensión y de esta forma el caudal clasifica las partículas que el río puede transportar, tanto en tamaño como en número.

Cuando se presenta una creciente la capacidad del río aumenta, esto implica que la carga en suspensión no es función única del caudal sino que depende además de la erosión pluvial en la cuenca.

A medida que el caudal disminuye en el río también disminuye su capacidad de transporte; esto hace que las partículas que no se pueden sostener en suspensión se sedimenten. Posteriormente, cuando las velocidades se



incrementen por aumento del caudal, parte de estos sedimentos serán puestos en estado de saltación temporal y algunos de ellos volverán a formar parte de la carga en suspensión.

Se puede suponer que existe una relación única entre los caudales líquido y sólido solamente en contadas ocasiones. Los pares de puntos que se obtienen a partir de series de aforos líquidos y sólidos simultáneos presentan siempre una gran dispersión alrededor de las curvas teóricas de ajuste. A pesar de sus deficiencias, el método de medición directa es el más aceptado para estimar la carga en suspensión y para elaborar las curvas de descarga del caudal sólido.

En las operaciones de control de la contaminación de las corrientes, se considera que todos los sólidos suspendidos se sedimentan puesto que el tiempo no es un factor limitante.

2.3.2 Erosión del suelo

La erosión de los suelos constituye uno de los problemas ecológicos más importantes de la sub cuenca; que consiste en el proceso de movimiento de las partículas de suelo por impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial y su depósito en otro lugar.

La erosión es la pérdida de suelo probablemente por la ausencia de buenas prácticas de manejo de la cobertura vegetal y de conservación de suelos. La erosión del suelo crea problemas también ya que reduce la humedad disponible en el suelo acentuando las condiciones de la aridez. En terrenos donde existe pendiente, en algún momento, ocurrirá suficiente acumulación de flujo superficial para causar una pequeña socavación, sacando las partículas de fondo e iniciando un proceso de erosión en cárcava.

En suelos desnudos, la salpicadura es el agente más importante para el desprendimiento. El suelo además se disgrega por procesos de meteorización y se altera por laboreo y uso de terreno para ganado. Como consecuencia del proceso erosivo se generan pérdidas de la fertilidad del suelo, disminución del caudal, incremento de la escorrentía superficial, degradación de los suelos y desertificación.

Las pérdidas de suelo representan la *erodabilidad* y están estrechamente relacionadas con la lluvia, por el desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y por la contribución de la lluvia a la escorrentía. Cabe recalcar que en términos de erosión la intensidad de la lluvia no es generalmente aparente.



Movimientos de masa: Otro problemas que se presenta son los movimientos de masas que se dan en laderas, estos pueden tomar la forma de un lento movimiento de arrastre, o de un colapso masivo rápido como un deslizamiento.

Cuando el agua se infiltra, puede ejercer una acción más compleja. Al encontrar impermeabilidad, crea un plano sobresaturado y lubricado sobre el que se deslizan los materiales creando los deslizamientos ya que la componente de las fuerzas en la dirección del movimiento es mayor que las de rozamiento.

Algunos deslizamientos pueden ocurrir directamente sobre un canal natural llevando un volumen considerable de material sedimentario, cuando una capa superficial del suelo más o menos profunda, retiene gran cantidad de agua; el incremento del peso y la pérdida de consistencia ocasionan el desprendimiento de la capa de suelo a partes bajas.

Los deslizamientos son abundantes en laderas empinadas utilizadas para agricultura y/o pastoreo del ganado. Se definen como el movimiento de masas de rocas, detritos o tierras a favor de la pendiente. Esto ocurre en la microcuenca del Tabacay (ver Anexo, Fotografía 1-4).

Es por esto que los movimientos en masa son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original sin usar medio de transporte alguno, siendo tan solo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras. Este tipo de procesos gravitatorios se interrelacionan mutuamente con las precipitaciones altas, de tal forma que frecuentemente las lluvias torrenciales son causantes de los movimientos en masa, ya que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo al deslizamiento.

Los movimientos de masas son poco frecuentes pero la cantidad de sedimentos aportados desde las colinas a los ríos es superior que la de las cárcavas, regueros y flujo superficial. En zonas de bosques hay menos oportunidad de sufrir deslizamientos.

Los índices que determinan la tasa de erosión son la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación.

Se consideran tres aspectos: la energía que es la capacidad de la lluvia, escorrentía y viento, para producir la erosión, la resistencia que representa la



erosionabilidad del suelo, y la protección, en donde la cobertura vegetal juega un papel importante.

La vegetación puede también dar protección mecánica contra la erosión en cárcava del suelo y mejorar la capacidad de infiltración del suelo por el aumento en el contenido natural de materia orgánica del mismo. Una mayor infiltración significa menor flujo superficial y por lo tanto menor erosión. La erosión por impacto disminuye también con el aumento de contenido de agregados estables en el agua.

Se observa que en pendientes altas se producen mayores tasas de erosión que en pendientes suaves, al igual que mayores movimientos de masas.

2.3.3 Conservación del suelo

Las estrategias para la conservación del suelo deben basarse en la cobertura vegetal para darle protección contra las gotas de lluvia, capacidad de infiltración para reducir la escorrentía, estabilidad de los agregados y aumento de la rugosidad para reducir la velocidad de la escorrentía y del viento.

Se reconocen dos técnicas que son las medidas agronómicas y métodos mecánicos. Las medidas agronómicas utilizan la vegetación para proteger el suelo frente a la erosión.

Los métodos mecánicos incluyen desde la modificación de la topografía hasta el encauzamiento del agua y del aire. Generalmente se da preferencia a las medidas agronómicas ya que son menos costosas y permiten reducir los impactos de la lluvia, aumentar la infiltración, reducir el volumen de la escorrentía y minorar las velocidades del agua y del viento. Los métodos más utilizados son los cultivos a nivel en donde labrando, sembrando y llevando el cultivo a nivel se puede reducir las pérdidas de suelo de los terrenos en pendiente. Otro método, son las terrazas que tienen por objeto interceptar la escorrentía superficial y transportarla con velocidad no erosiva hacia una salida adecuada y para acortar la longitud de la pendiente.

Manejo de los cultivos y la vegetación

Como se menciona anteriormente las cubiertas vegetales son muy utilizadas para disminuir la erosión del suelo, pero se debe evitar los cultivos en línea ya que producen mayores problemas erosivos debido a los espacios que dejan. Una forma de evitarlos es el uso de los mismos combinados con otras medidas de protección como:



- **Rotaciones de cultivo**

El uso de los cultivos en línea depende del grado de erosión que se presente, en el caso de riesgos de erosión bajos deben cultivarse una vez cada 2 años y para zonas de alta erodabilidad se permite una vez cada 5 o 7 años.

La disminución de erosión se logra mediante la rotación de parcelas sobre las que se desarrollan los cultivos.

El manejo de pastizales consiste en el desplazamiento del ganado de un pasto a otro para permitir la recuperación de cada uno de ellos, y evitar el sobrepastoreo que pueden causar problemas de erosión.

En áreas montañosas donde la tala de árboles ocasiona deslizamientos y formación de cárcavas (ver Anexo Fotografías 5 y 6), la mejor práctica de conservación son las talas selectivas, donde se eliminan arboles adultos y los restantes brindan cobertura vegetal.

- **Cultivos de cobertura**

El uso de estos cultivos es una medida de conservación durante las épocas donde no existen otros cultivos. Este procedimiento es efectivo si se provee de cobertura vegetal de una manera rápida y permita mejorar la macro porosidad del suelo.

Otro uso de la cobertura vegetal es bajo los cultivos arbóreos, donde se protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia.

- **Policultivo**

Además de evitar la erosión, aumenta la producción de las tierras. Consiste en intercalar dos o más especies durante el año o sembrar 2 o más especies en la misma parcela al mismo tiempo. Se busca combinar especies que proporcionen mayor capacidad de interceptación, reduciendo el desprendimiento de partículas de suelo debido al impacto de las gotas de lluvia.

- **Mulching**

Es la cobertura del suelo con residuos inertes de cultivos. Proporciona protección ante el impacto de las gotas de lluvia y reduce la velocidad de la escorrentía y viento. Su aplicación es de mayor importancia en las zonas áridas. El uso del mulching en la protección de la erosión en general sea eólica o hídrica puede ser apropiado si es combinado con laboreo de conservación.

- **Revegetación**

El control de erosión en cárcavas, deslizamientos de tierra, dunas, taludes, áreas de construcción y escombreras es más eficaz con la revegetación, sin



olvidar las áreas de bosque taladas. Para la ejecución de este procedimiento se requiere conocer las características del suelo, condiciones climáticas, topografía, entre otras.

Con la revegetación se logra aumentar la infiltración, lo que ayuda a disminuir la erosión en las cárcavas de las superficies, y reducir la escorrentía superficial. Se puede estabilizar la tierra y evitar la entrada de sedimentos a la cárcava.

Relación entre producción de sedimentos y erosión

La producción de sedimentos en cuencas está íntimamente ligada con la erosión de la misma, se incrementa con la deforestación, y la concentración de sedimentos suspendidos también crece, los cuales se depositan en el fondo de los cauces.

Para conocer acertadamente la producción de sedimentos en una cuenca se requiere de la precisión con la que se conozca la cantidad de suelo erosionado, transportado, sedimentado y expulsado de una cuenca. La lluvia juega un papel importante en este proceso.

Si se produce un incremento en la erosión aumenta el material en suspensión en el cauce ocasionando una disminución de la capacidad hidráulica de los mismos. Con esto se puede definir a la erosión como un proceso que forma parte de un sistema que deberá tender al equilibrio.

La erosión de una cuenca es directamente proporcional a la producción de sedimentos de la misma, siendo afectada por la cubierta vegetal existente, por tanto en zonas áridas se observa una mayor producción. Esto justifica la existencia de cuencas pequeñas pero con mayor producción que otras que pueden ser más extensas. La carga de sedimentos de una corriente se conoce como tasa de transporte de masa y se mide en peso por volumen generalmente mg/l o concentración.

La cantidad de sedimento va a depender de las características del cauce, del caudal o gasto y de las características físicas del sedimento. Las características del cauce dependen de la rugosidad, morfología y pendiente del mismo y en el caso de las características físicas de las partículas dependen del tipo de suelo de la cuenca, geología existente e intemperismo.

Por otra parte las alteraciones en el uso del suelo de una cuenca producen una variación en la producción de sedimentos, los cuales afectan la morfología de los cauces aguas abajo.



Los impactos antropogénicos aumentan considerablemente los procesos de erosión en comparación con los factores naturales.

La litología tiene influencia en el proceso de erosión sobre todo si se tratase de material de origen sedimentario y volcánico, ya que el proceso de erosión tiene que ver con la ruptura y transporte de las partículas de suelo por impacto y por escorrentía.

La erosión por cárcavas es en muchos casos dominante en cuanto a aporte de sedimentos a los cauces, están asociadas a una erosión acelerada, por tanto paisajes inestables.

Sin embargo no se debe olvidar que pueden existir cantidades importantes del material erosionado que no contribuyen al sedimento en la corriente debido a que se deposita antes de que llegue a ellas, debido a depresiones o zonas de vegetación en las que se retiene la mayor parte del suelo.

2.4 Modelos de erosión

La mayor parte de los modelos utilizados en estudios de erosión del suelo son empíricos y se basan en la definición de los factores más importantes y, mediante la observación, medida, experimentación y técnicas estadísticas, su relación con las pérdidas de suelo.

2.4.1 Modelos empíricos

Los modelos empíricos se fundamentan en la utilización de procedimientos estadísticos para su formulación, mediante la recolección de información cuantitativa. Tiene una orientación predictiva, es decir buscan valores promedio a largo plazo.

Es el método más sencillo denominado “tipo caja negra”, que relaciona la pérdida de los sedimentos con la lluvia o escorrentía.

Ecuación universal de la pérdida de suelo RUSLE

Este método será utilizado más adelante para la determinación de las pérdidas de suelo en la microcuenca del Río Tabacay. Tiene la siguiente forma.

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$



Donde:

A= Pérdida de suelo promedio anual (t/ha/año).

R= Índice de erosividad pluvial. Es el potencial erosivo de la lluvia que afecta el proceso de erosión del suelo. La erosión por gotas de lluvia incrementa con la intensidad de la lluvia.

Una suave y prolongada lluvia puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa.

Cuando la energía se combina con la intensidad de la lluvia, se obtiene una predicción del potencial erosivo (EI: energía/intensidad). "EI" es el valor de la tormenta total por el máximo de intensidad de la tormenta en 30 minutos. Este término indica cómo se combina el desprendimiento de las partículas con la capacidad de transporte.

Por lo tanto R es la suma de los promedios anuales de "EI" para una zona en estudio.

$$R = \frac{\sum (EI_{30})_i}{N} \quad (1)$$

Donde:

R = Erosividad anual (tal como las unidades de EI30).

$(EI_{30})_i$ = EI30 para tormenta I

N = Tormentas erosivas en un período de N años.

$$EI_i = (210.3 + 89 \log I_i) I_i T_i \quad (2)$$

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

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

El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil del suelo en la pérdida de suelo.



- Suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de K (0.05-0.15), porque ellos son resistentes al desprendimiento.
- Suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tiene valores bajos de K (0.05-0.2), debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles.
- Suelos de textura mediana (franco limoso) tienen valores de K moderados (0.25-0.4), porque son moderadamente susceptibles al desprendimiento y producen moderados escurrimientos.

Estudios propuestos, muestran dos métodos para determinar este factor, métodos directos e indirectos. El método directo posee una tabla de valores para suelos tropicales (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Valor de k para suelos tropicales.

SUELOS	VALORES DE K
ANFISOLS O ANDISOLS	0,14-0,69
OXISOLS	0,01-0,22
INCEPTISOLS	0,02-0,55
MOLLISOLS / VERTISOLS	0,05-0,67
ULTISOLS	0,00-0,36

El método indirecto es aplicado mediante el uso de ábacos, en donde se requieren los siguientes sub factores:

- Porcentaje de arena muy fina.
- Porcentaje de arena (0.1-2mm).
- Contenido de materia orgánica.
- Estructura del suelo (4clases).
- Permeabilidad del suelo (6 niveles).

Los dos últimos valores se encuentran en las siguientes tablas:

Tabla 2.2 Estructura del suelo clasificado en 4 clases.

CLASE	ESTRUCTURA	ELEMENTO
1	GRANULAR MUY FINO	<1mm
2	GRANULAR FINO	1-2mm
3	GRANULAR MEDIO	2-10mm
4	BLOQUES MASIVOS	>10mm



Tabla 2.3 Velocidad de permeabilidad del suelo clasificado en 6 niveles.

NIVEL	CONDICION	PERMEABILIDAD (cm/h)
1	MUY LENTO	<0.125
2	LENTO	0.125-0.5
3	MEDIANAMENTE LENTO	0.5-2
4	MODERADO	2-6.25
5	MODERADAMENTE RAPIDO	6.25-12.5
6	RAPIDO	>12.5

Los otros factores no tienen dimensión.

L=La longitud de pendiente es definida como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto, donde:

- El gradiente de la pendiente reduce lo suficiente para que la deposición comience.
- El escurrimiento llega a ser concentrado en un canal definido.

Se calcula mediante:

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

Donde:

l= Factor de longitud de pendiente

m = Exponente de la longitud de la pendiente

La longitud de pendiente l , es la proyección horizontal, no la distancia paralela a la superficie del suelo.

El exponente de longitud de pendiente m , depende del valor de la pendiente.

Tabla 2.4 Valor del exponente de la longitud de pendiente m .

Valor de m	s %
0.5	$s \geq 5$
0.4	$3 \leq s \leq 5$
0.3	$1 \leq s \leq 3$
0.2	$s \leq 1$

S=factor de inclinación de la pendiente que refleja la influencia de la gradiente de la pendiente en la erosión. El potencial de erosión se incrementa con la inclinación de la pendiente.



Para pendientes con longitudes mayores a 5 m se debe usar las siguientes ecuaciones:

$$S = 10.8 \operatorname{sen} \theta + 0.03 \quad \text{cuando } s < 9\%$$

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.5 \quad \text{cuando } s \geq 9\%$$

Donde:

S = Inclinación de pendiente [%]

θ = Angulo de pendiente [°]

Se combinan los factores L y S en el modelo RUSLE, representa la proporción de pérdida de suelo de una longitud e inclinación dada. Valores más que 1 representan condiciones más erosivas que la condición de referencia.

El valor de LS se puede obtener de nomogramas o mediante la siguiente ecuación.

$$LS = \left(\frac{l}{22.13} \right)^m \cdot \frac{(0.043s^2 + 0.30s + 0.43)}{6.613}$$

C = factor de cobertura. Usado para reflejar el efecto de la cultivación y prácticas de manejo en las tasas de erosión. Este factor mide como el potencial de pérdida de suelo será distribuido en el tiempo durante la construcción de actividades, rotación de cultivos, y otros esquemas de manejo. El valor de C para condiciones estándar es 1, es decir suelo desnudo.

Existen nomogramas en donde se encuentran los valores de C dependiendo del tipo de cultivo que se practiquen en una microcuenca.

P = factor de prácticas de control de la erosión. Es la relación de pérdida de suelo con prácticas de soporte a la pérdida correspondiente con labranza en pendiente, la cual tiene un valor de 1.

Estas prácticas de control combaten la erosión, puesto que modifica los patrones de flujo y el grado o dirección de superficie de escurrimiento. Para las prácticas de soporte de tierras cultivadas, generalmente incluye contorno, cultivos en faja, terraceo y drenaje sub superficial.

Otros modelos empíricos de erosión son:



SLMSA

Fue desarrollado para evaluar la erosión resultante en diferentes sistemas agrícolas y para recomendar las medidas adecuadas de conservación.

Morgan y Finney

Incorporan los últimos avances en el conocimiento del proceso de la erosión para predecir las pérdidas anuales en parcelas, de dimensiones limitadas situadas en laderas. El modelo divide el proceso erosivo en dos fases: hidráulica y sedimentación.

2.4.2 Modelos con base física

Los modelos de base física incorporan las leyes de conservación de la masa y energía, pudiendo aplicarse a la erosión del suelo y describir los procesos de desprendimiento del suelo por la escorrentía y por la lluvia, capacidad de transporte de la lluvia y la capacidad de transporte de la escorrentía. Dentro de estos modelos se nombran algunos de ellos con su principal característica:

CREAMS: evalúa la contaminación difusa y cuantifica las consecuencias ambientales de distintas prácticas agrícolas.

WEPP: diseñado para reemplazar la ecuación universal de pérdida de suelo, basándose en conocimientos modernos de hidrología y erosión.

GUESS: simula los procesos de erosión y deposición a lo largo de una ladera. Difiere de los anteriores ya que divide analiza la superficie del suelo con cohesión (original) y sin cohesión (desprendimiento).

EUROSEM: se busca computar el transporte de sedimentos, erosión y deposición luego de una tormenta.

2.5 Métodos de medición de caudal líquido y sólido en cauces

2.5.1 Caudal líquido

La medición de caudal líquido se puede realizar de dos formas: manual y automática. Para lo que se dispone de una serie de dispositivos de medición entre los que se destacan los aforadores de flujo supercrítico.



Aforador trapezoidal de flujo supercrítico: El diseño de un canal con flujo supercrítico en la garganta, sólo se puede lograr mediante el aumento de la energía específica disponible en el enfoque hacia la garganta. Considerando que un aumento en el piso del canal disminuye la energía específica, un aumento en la pendiente del canal sirve para aumentar la energía específica.

Los aforadores de flujo supercrítico con paredes verticales, tienen las relaciones de descarga que no son sensibles a los flujos bajos. De esta forma inclinándose las paredes laterales de modo que la anchura de suelo sea más estrecha que la anchura superior en todos los cortes transversales, la sensibilidad de la posición como la variedad de la descarga por la corriente puede ser aumentado.

Se puede tener un rango de descarga 1 a 260 m³ / s.

Las paredes laterales tienen una pendiente de 30° con la horizontal. Como resultado, la profundidad crítica se produce en la sección transversal más estrecha.

El propósito es obtener una mayor velocidad en la sección transversal crítica y por lo tanto reducir la probabilidad de la deposición de los desechos en esa sección transversal.

Se presenta una lista de algunas generalidades sobre el canal trapezoidal de flujo supercrítico:

1. El canal debe ser cuidadosamente alineado en el cauce natural.
2. Las paredes deben ser utilizadas para prestar una transición suave del canal natural a la cabeza del canal.
3. La longitud del aforador no debe ser más de dos o tres veces el máximo de la profundidad vertical en la sección transversal. Una excesiva longitud de canal de flujo puede producir una serie de olas viajando en la longitud del canal.
4. Las paredes laterales deben tener una pendiente de al menos 30 "con la horizontal; paredes planas induce alteraciones de las olas.
5. Para asegurar el flujo supercrítico, el suelo q converge y llega a la garganta debe tener una pendiente de entre 3 y 5%.
6. Deben colocarse canales de flujo supercrítico en el cauce natural para operar parcialmente sumergido.
7. La altura de las paredes laterales deben ser iguales a la profundidad crítica, más 0,3 metros para dar cabida a la acción del oleaje.
8. La cabeza debe ser medida en la longitud media de la sección transversal del alcance de la garganta.



9. Todos los canales de flujo debe ser de construcción sólida, preferentemente de hormigón armado.
10. No debe utilizarse en canales de arena.

Aforador San Dimas: El canal tiene un enfoque convergente, cuyo suelo es plano, con excepción de una sección no plana en su extremo aguas abajo, que es la profundidad de corte transversal crítica.

El alcance de flujo supercrítico es rectangular en la sección transversal y tiene una pendiente de 3%. Debido a esta forma rectangular y al hecho de que se miden las profundidades supercríticas, el canal de flujo es extremadamente insensible a los flujos bajos.

Se han realizado actualizaciones y cambios en donde el tramo no plano en el extremo inferior del enfoque ha sido eliminado. Este tiene la desventaja de ser una trampa potencial de sedimento.

Debido a la ubicación de la cabeza de medición varía con la longitud de la sección de la garganta, los datos de descarga variará con su anchura y la longitud del canal.

Dicho aforador, determina el flujo mediante la medición de calado supercrítico, logrado con un ascenso inicial a la entrada, y un fondo que continua con pendiente de 3% en su sección rectangular. Corresponde al de ancho W de 3 pies que permitirá el aforo con medición de nivel de caudales del orden de $2\text{m}^3/\text{s}$.

En el caso de la medición de descarga manual se usan dispositivos mixtos entre los que se encuentran los molinetes y micro molinetes dependiendo de la profundidad y accesibilidad del cauce y la sonda ultrasónica Flow Tracker.

Aforo con molinete o micro molinete

El molinete es un instrumento que tiene una hélice que gira sobre su eje horizontal al introducirla en una corriente de agua. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de la corriente, a continuación se contabiliza el número de revoluciones al introducirlo en una corriente de agua en un tiempo dado.

Los molinetes pueden ir montados en soportes o suspendidos de cables. Antes de ser usados en el campo, deben ser calibrados por el fabricante para



determinar la relación entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del agua.

La sección elegida para la medida con el molinete debe estar situada en un tramo recto y de una sección lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.

El molinete mide la velocidad en un único punto, es por esto que para calcular el caudal total se deben realizar varias mediciones.

La diferencia entre molinete y micro molinete es el tamaño de la hélice, los más usados son molinete hélice 12cm y micro molinete 3cm de diámetro, dependiendo del área de aforo y la precisión que se requiera.

Aforo con Flow Tracker

Es un equipo de medición acústica portátil, que reemplazo la medición mecánica del molinete o micro molinete por ser más preciso y practico.

El equipo permite aforos de caudal con arreglos a la normativa ISO. Posee un software de análisis de datos que nos proporciona el cálculo automático de la descarga.

Permite obtener medidas de velocidades en el agua a profundidades bajas (2cm).

2.5.2 Caudal sólido

Métodos en campo

La concentración de sedimentos en suspensión varía con la profundidad dentro de una misma sección.

En general el alcance y representatividad de una muestra de sedimentos de río va a depender de las características de la cuenca y su tamaño.

Es recomendable la elección de verticales en la sección donde se va a realizar el muestreo, estas pueden estar espaciadas arbitrariamente, en donde la experiencia aconseja localizarlas a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho de la sección o $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{6}$ o $\frac{5}{6}$, también, uniformemente espaciadas en donde se divide el ancho de la sección en varias fracciones de igual magnitud y en cada punto medio se fija la vertical correspondiente.



El muestreo con el uso de verticales, consiste en recoger la muestra a lo largo de toda la vertical, con el uso de un muestreador que corre la vertical con velocidad constante y usa una boquilla por donde ingresa la muestra a una cavidad interior. Para profundidades inferiores a 5m, recorre la vertical en dos sentidos ascendente y descendente pero para mayores a 5m únicamente un sentido. O mediante la toma de muestras en determinados puntos de la vertical con integradores puntuales que se mantienen fijos en medio de la corriente

La forma más sencilla de tomar una muestra de sedimentos en suspensión es sumergir un recipiente en la corriente, en un punto en el que esté bien mezclada. El sedimento que retiene un volumen medido de agua se filtra, se seca y se pesa. Esto permite obtener la concentración del sedimento y cuando se combina con el caudal se obtiene la tasa de descarga de sedimentos.

Una vez recolectadas las muestras, son llevadas a laboratorio para ser analizadas mediante el método del cono de imhoff. 100ml de muestra previamente decantada, se evapora a 110°C durante 24 horas o hasta peso constante, en un beaker pesado previamente. La diferencia entre el beaker que contiene los sólidos y el beaker proporciona el valor de los sólidos suspendidos y los sólidos disueltos.

Se repite el mismo procedimiento pero esta vez con 100ml de muestra filtrada a través de una membrana de 0,45μ de diámetro de poro, para eliminar los sólidos en suspensión. De esta forma se obtienen únicamente los sólidos disueltos. La diferencia entre esta medida y la anterior, es el valor de sólidos suspendidos.

El **método de decantación en el cono de imhoff**, consiste en un recipiente cónico de vidrio o plástico rígido, en donde se coloca un litro de muestra fresca y se deja en reposo durante dos horas. Luego de este tiempo se lee en el cono, los milímetros de sólidos sedimentables por litro de muestra.

Método automático

El muestreo automático, se puede realizar mediante el uso de un equipo moderno denominado muestreador portable ISCO 6712. El equipo permite la recolección de muestras de agua de acuerdo a la programación establecida según horarios o pulsos, disponiendo de una capacidad de almacenamiento de hasta 1000 eventos.

Para optimizar la utilidad de las muestras recolectadas, el muestreador permite ser programado para un muestreo en función de la variación de caudal a



presentarse, por ejemplo un muestreo únicamente en eventos de crecida, o muestreo definido por intervalos de tiempo o por volumen.



3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1.1 Ubicación

Se ubica entre los cuadrantes 737700 - 748230 Este y 9698000 – 9709300 Norte. Esta constituido principalmente por las quebradas Llaucay, Nudpud, Condoryacu, Rosario, Mapayacu y Rubís. La microcuenca tiene una superficie de 6650 hectáreas (66.5 Km²). Presenta cotas que varían desde los 2490msnm en la parte baja hasta los 3730msnm en zonas altas.

La microcuenca del Río Tabacay se encuentra entre los límites del cantón Azogues, capital de la provincia del Cañar, en Ecuador. Pertenece a la subcuenca del río Burgay que tiene aproximadamente 447km², que a su vez es parte de la cuenca del río Paute con una extensión aproximada de 5000km², donde se encuentra el complejo hidroeléctrico Paute que genera aproximadamente el 50%.

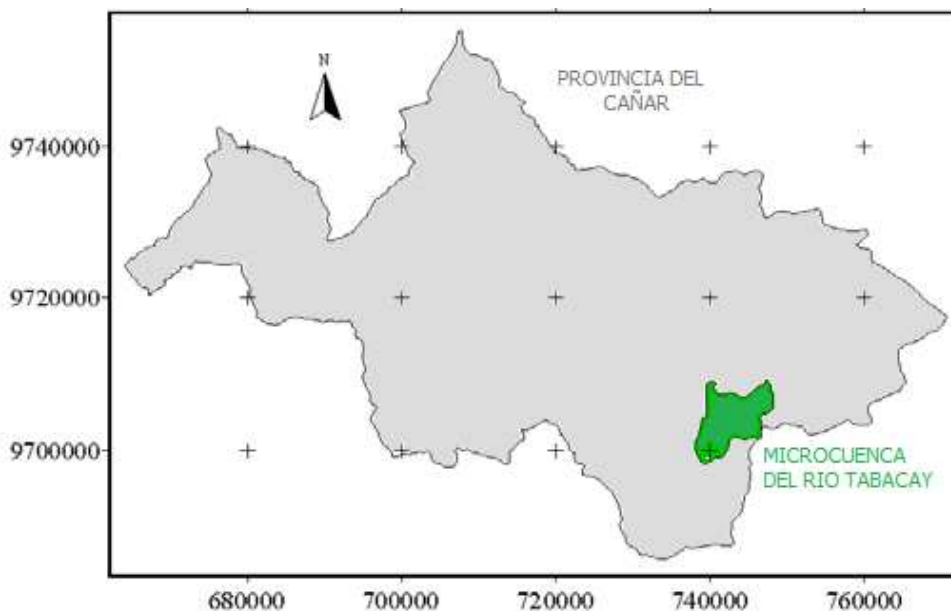


Figura 3.1 Ubicación geográfica de la microcuenca del Tabacay en la provincia del cañar



3.1.2 Infraestructura y Servicios

La problemática presente en la microcuenca es debido a la ampliación de la frontera agrícola en las zonas altas que destruyen los bosques nativos, además de la apertura de vías sin planes de mitigación y el crecimiento urbanístico desorganizado, lo que ocasiona que el agua que se trata para la ciudad, llega cada vez mas llena de sedimentos. Cabe recalcar la presencia de la empresa de cementos Guapán en la parte baja de la microcuenca.

Al momento, el agua potable de la ciudad de Azogues proviene exclusivamente de la parte alta de la microcuenca del río Tabacay, a través de las captaciones ubicadas en las quebradas Nudpud y Llaucay cuyas cuencas de captación tienen una superficie de aproximada de 25 km².

3.1.3 Caracterización biofísica de la microcuenca

Principales cauces

La Tabla 3.1, muestra los principales cauces de la microcuenca del Río Tabacay con sus respectivas características.

Tabla 3.1 Características físicas de los cauces de la microcuenca

Microcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)
Condoryacu Rosario	10,57	19,46
Llaucay	17,32	23,78
Mapayacu	3,97	10,94
Nudpud	13,55	19,75
Tabacay	21,09	21,6

Río	Longitud (km)
Nudpud	8,57
Mapayacu	4,18
Condoryacu	6,2

Condiciones climáticas



El clima de Tabacay es templado, existiendo variación en la parte alta, constantes vientos y páramos que hacen que el clima sea fresco y agradable, la temperatura media es de unos 17°C.

Topografía

La topografía corresponde a un terreno montañoso ya que las pendientes superan en su mayoría el 12% de inclinación, predominando las pendientes mayores al 45%. Es por esto que estas zonas excluyen las prácticas agrícolas sin previa clasificación, sin resultado alguno ya que los moradores hacen caso omiso a esta restricción.

Tabla 3.2 Valores de pendientes en la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004

Clase de Pendiente	Rango	Superficie (ha)	Porcentaje del área
1	0 - 12%	411.18	6.18
2	12 - 30%	2026.16	30.46
3	30 - 45%	1681.37	25.28
4	>45%	2533.41	38.08

Precipitación

La parte baja de la cuenca del río Tabacay tiene una distribución anual regular de la precipitación, teniendo valores máximos en marzo y octubre, y valores mínimos en agosto. En la parte alta, la cantidad de precipitación presenta máximos en junio y julio, y mínimos de noviembre hasta febrero.

Se tiene una precipitación anual de 1210mm en la parte alta y 860mm en la parte baja.

Tabla 3.3 Valores de precipitación en mm mensuales de la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004

Mes	Parte baja	Parte alta
Enero	60	100
Febrero	70	70
Marzo	100	100
Abril	90	110
Mayo	80	120
Junio	60	160
Julio	60	160
Agosto	40	120
Septiembre	60	100
Octubre	90	70
Noviembre	70	50
Diciembre	80	50
Promedio	72	101
Total anual	860	1210



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial (ET_o) de un cultivo de referencia (pastos), tiene una distribución regular en ambas partes de la microcuenca del río Tabacay. Además, la distribución en ambas partes de la microcuenca es semejante durante el año, con un pequeño máximo de octubre hasta enero y un pequeño mínimo en junio.

No obstante, durante todo el año la ET_o es más baja en la parte alta que en la parte baja (promedio de 78 mm/mes en la parte baja y 67 mm/mes en la parte alta).

Tabla 3.4 Valores de evapotranspiración mensuales de la microcuenca. Plan de Manejo de al microcuenca del Tabacay 2004

Mes	Parte baja	Parte alta
Enero	85	75
Febrero	75	65
Marzo	80	70
Abril	75	65
Mayo	75	60
Junio	65	55
Julio	70	60
Agosto	75	60
Septiembre	80	70
Octubre	85	75
Noviembre	85	75
Diciembre	85	75

Suelos

Existe una variedad a lo largo de toda la cuenca del Río Tabacay. En la parte baja predomina la caliza, material explotado para la elaboración de cemento y en la parte alta el suelo es de origen volcánico debido a la acumulación de ceniza volcánica. El suelo ha sido degradado continuamente por la actividad humana y sus pendientes influyen en el aumento de erosión.

La cobertura vegetal del Tabacay está formada por pocas zonas de bosque nativo, en la parte alta constituye el 9,1% y por pasto el 70,4% de la cobertura, y el porcentaje restante lo constituye matorrales, cultivos, etc.

Se exponen los diferentes tipos de suelo y su correspondiente porcentaje.



Tabla 3.5 Tipos de suelo en la microcuenca del río Tabacay. Plan de Manejo de la microcuenca del Tabacay 2004

Tipo de Suelo	Área (ha)	Porcentaje del área
Calcaric Cambisol	98	1.5
Dystric Cambisol	10	0.2
Eutric Cambisol	237	3.6
Haplic Calcisol	145	2.2
Humic Regosol	13	0.2
Humic Umbrisol	748	11.3
Leptosol/Skeletal Regosol/Eutric Cambisol	1188	17.9
Skeletal Cambisol	242	3.6
Umbric Andosol	3966	59.6
TOTAL	6650	100

La presencia de estos grupos de suelos en la cuenca son de gran importancia debido a la función ambiental que realizan al permitir la regulación del ciclo hidrológico que se atribuye a los suelos del tipo Andosol que están localizados en las partes altas y frías de la cuenca. Estos suelos están originalmente cubiertos permanentemente con pajonal o bosques nativos.

Los otros grupos de suelos mencionados poseen características alteradas, debido al manejo inadecuado de la cobertura vegetal.

Los suelos de tipo Cambisol, se encuentran en mayor proporción en la parte baja de la microcuenca, es decir las zonas pobladas.

Agua

La erosión causada en la quebrada Mapayacu causa una carga muy alta de sedimentos en el curso de agua que repercute en la calidad del líquido para ser utilizado aguas abajo.

Esto impide la utilización del líquido vital ya que fácilmente podría ocasionar la sedimentación de canales de riego y conducciones de agua para consumo humano. Además ocasiona la inestabilidad del debido a la presencia de depósitos de sedimentos que son removidos en cada creciente, cambiando constantemente el cauce del río.

Usos de suelos

En la parte baja de la cuenca, se usan tierras no aptas para la labranza para obtener cosechas de cultivos anuales principalmente maíz, en los que la erosión por labranza es muy elevada. Como se observa en la Foto 3.1, los bosques predominantes están formados por especies exóticas como el eucalipto que constituye una especie muy agresiva y que puede ocasionar daños significativos al recurso suelo ya sea por concentración de la erosión



debido al impacto sobre el suelo de gotas de lluvia de gran tamaño, como por el incremento de sustancias residuales toxicas.



Foto 3.1 Presencia de eucalipto en la microcuenca

La principal fuente de degradación en la parte media de la cuenca lo constituye la agresiva presencia de raíces en el suelo que crecen a muchos metros sobre estos suelos superficiales, estas raíces absorben los nutrientes y el agua disponible disminuyendo la probabilidad de la regeneración de la vegetación natural.

La práctica de la agricultura genera alteraciones propias por no existir medidas de protección anti-erosivas, además de la carga animal causante del sobre pastoreo que produce reptaciones y deslizamientos o movimientos de masa.

Los cultivos más frecuentes en la microcuenca son: cultivos anuales y pastos con valores de 56% y 25% respectivamente en la zona baja de microcuenca. Los sistemas combinados frutales/hortalizas y frutales/pastos presentan valores >50% del área, en la parte media. Los bosques y los pastizales son también muy representativos. Los cultivos anuales son menos comunes. Y por ultimo en la parte alta predominan los pastos con un valor de 70% y la presencia de bosques con chaparros en un 16%. Los cultivos anuales no son muy comunes (3.9%). (Ver Anexo Fotografías 7-10).

Geología y geomorfología

La microcuenca del Río Tabacay está constituida por las siguientes formaciones geológicas:



Azogues: donde predominan areniscas tobáceas gruesas, de color café y depósitos de limolita y arcilla de menos de 1m. El espesor máximo se estima en 280m.

Loyola: son depósitos superiores de aproximadamente 250m de espesor, constan de lutitas grises oscuras de color amarillo, meteorizadas y rojizas, con una flora variada. Abunda el yeso y calizas cristalinas.

Guapán: con litología similar que la formación Loyola.

Biblián: formada por arcillas limosas, arenosas finas café-rojizas y areniscas tobáceas gruesas. Además de aglomerados volcánicos.

Tarqui: formada por rocas piro clásticas acidas.

Yunguilla: presencia de argilitas negras, pasando a arcillas cafés oscuras o negras, depósitos de caliza y areniscas y capas guijarrosas.

La mayoría de las formaciones son de origen volcánico.

Deslizamientos y erosión

Se identificó que la cuenca de la Quebrada Mapayacu está sujeta a movimientos de masa generales en toda su extensión. Por lo menos durante los últimos cien años se han producido todo tipo de movimientos de masa debido a una serie de factores naturales entre los que se pueden nombrar los siguientes:

- Inestabilidad general de la quebrada. Derrumbes periódicos causan el taponamiento de los cursos de agua; que puede producir otros movimientos de masa, generándose así un círculo vicioso de inestabilidad de toda la zona.
- Vertientes que afloran en la parte alta de la cuenca le proporcionan un caudal mínimo estable a la quebrada Mapayacu lo que le da mayor capacidad de arrastre de material.
- Sedimentos que lleva la quebrada Mapayacu, producto exclusivamente de esta inestabilidad. Aún en períodos sin lluvia la quebrada arrastra una significativa cantidad de sedimentos, aunque la mayor cantidad de sedimentos es arrastrada durante las crecientes.

En conclusión la producción de sedimentos en la Quebrada Mapayacu es en alto grado producto de factores naturales y no tiene relación con las actividades agrícolas en la cuenca.



- **Indicadores de erosión**

La Unidad para el Manejo de la cuenca del Río Paute UMACPA ha elaborado un informe acerca del Estudio de Geomorfología de la Dinámica de los Principales Procesos Erosivos y de Sedimentación de la Cuenca, en donde se establece que el 38.6% de la superficie total de la cuenca se encontraría afectada por diferentes manifestaciones morfo dinámicas, de las cuales el 26.5 % serían de naturaleza hídrica, 6.5% de movimientos de masa, y 5.6% corresponderían a movimientos de gravedad.

De forma general, la distribución de las tasas anuales es la siguiente:

Tabla 3.6 Distribución de la tasa de erosión en la cuenca del Río Paute (Pacheco, 2004)

Cuenca	Superficie (km ²)	Erosión anual (t/ha)
Alta	1598	21.5
Media	1783	54.2
Baja	1758	22.7

Los valores de la tabla indican que el aporte de sedimentos proviene principalmente de la cuenca media en aproximadamente $9.6 \text{ E}^6 \text{ t/año}$, cuya distribución en las sub cuencas de los ríos Jadán, Burgay y Gualaceo es:

Tabla 3.7 Distribución de la tasa de erosión en la cuenca media del Río Paute (Pacheco, 2004)

Sub cuenca	Superficie (km ²)	Erosión anual (t/ha)
Jadán	338.3	95
Burgay	454.7	68
Gualaceo	990.8	34

Durante catorce años: diciembre 1981 - febrero 1996, la superficie erosionada de la cuenca del Río Paute se incrementó de 96060 ha a 199040 ha, valor final que corresponde aproximadamente al 38% de su superficie total, es decir un aumento de superficie erosionada a razón de 7355 ha/año. A la fecha del presente trabajo, se tiene una ampliación de 257880 ha, que representarían casi el 49% de la superficie de la cuenca.

La microcuenca del Río Tabacay se encuentra ubicada en la cuenca media del Río Paute y por tanto, para efectos de producción de sedimentos, su distribución correspondería al orden de 68t/ha.



3.1.4 Información relevante y estudios realizados para la microcuenca

Información de precipitación

Se dispone de una base de datos en donde se ha recopilados los datos de precipitación medida en los pluviógrafos que se encuentran ubicados en 3 puntos de la microcuenca: Condoryacu, Nudpud y Guapán. Los períodos de tiempo y año que se analizan son:

NUDPUD

- 15 de Mayo al 16 de Diciembre del 2005
- 23 de Febrero al 5 de Julio del 2006

GUAPAN:

- 15 de Mayo al 16 de Diciembre del 2005
- 23 de febrero al 3 de Julio del 2006
- 29 de Septiembre al 24 de Diciembre del 2009
- 12 de Mayo al 30 de Junio del 2010

CONDORYACU

- 12 de Mayo al 24 de Septiembre del 2010

Estudios realizados

- A mediados de los años 90, el proyecto ejecutado por la Unidad de Manejo del Río Paute y sus afluentes UNACPA-INECEL, realizó un estudio para implementación de aforadores trapezoidales de caudal en tres puntos de la cuenca, de los cuales dos se conservan hasta ahora, que han sido reconstruidos por la Universidad de Cuenca a partir del año 2000, para formar parte de una futura red.
- En el año 2002 se elabora el estudio hidrológico, por el Ingeniero Rafael Estrella, para el aprovechamiento del Río Tabacay, aguas arriba de su junta con las quebradas de Nudpud y Llaucay. Cuyo objetivo era determinar los puntos más convenientes de mayor rendimiento para la ubicación de reservorios.
- En el año 2003 se elabora el Plan de Manejo integral de la microcuenca del Río Tabacay cuyo objetivo es el conocimiento integral de territorio



para precautelar la disponibilidad presente y futura de agua, tanto en cantidad como en calidad, mediante el establecimiento de acciones de uso, manejo de recursos naturales, e infraestructura. Buscando frenar los procesos de degradación y garantizar de manera sostenible la dotación de agua para la población de Azogues.

3.2 Métodos

Se recopiló la base de datos de los pluviógrafos colocados en la microcuenca, como se menciona anteriormente, con el fin de realizar un análisis de la información de precipitación y conocer la intensidad máxima de lluvia en cada zona, con diferentes duraciones, consideradas como importantes si cumplen que $I > 12.5 \text{ mm/h}$. para fines erosivos se analizaran las intensidades máximas de 30 minutos $I_{30\text{max}}$.

3.2.1 Método para medición de sedimentos en suspension

Para la realización del monitoreo de la carga de sedimentos en suspensión, los muestreadores portables ISCO fueron programados según la ecuación de descarga de los aforadores de flujo supercrítico que se encuentran ubicados en Mapayacu, Nudpud AJ Tabacay y Tabacay AJ Burgay.



Foto 3.2 Muestreadores portables ISCO

En la estación Tabacay AJ Burgay, se encuentra un aforador trapezoidal que trabaja bajo régimen supercrítico conseguido con el estrechamiento de la



sección trapezoidal y fondo de pendiente de 5% con una capacidad de 20 m³/s.

El aforador trapezoidal de la estación Nudpud AJ Tabacay ha sido diseñado para una capacidad de 5 m³/s y trabaja bajo régimen supercrítico, conseguido con el estrechamiento de la sección trapezoidal y fondo de pendiente de 5%.

La estación de Mapayacu está formada por una estructura denominado aforador San Dimas.

En cada uno de los aforadores se tienen implementadas muestreadores portables ISCO 6712, que permiten un registro continuo de los niveles de flujo, facilitando el monitoreo constante de caudal, es decir se tendrá información de caudales de manera ininterrumpida, lo que constituye un gran aporte a la comprensión de los eventos que suceden en una cuenca.

El muestreador portable 6712 es un equipo que se mueve fácilmente de un sitio a otro, está construido de materiales duraderos, resistentes a la corrosión, soportando ambientes hostiles. Acepta una variedad de kits de botellas para obtener las muestras, cuya capacidad es de 1 litro.

Trabaja con módulos de la serie 700 que usa sensores de presión, que miden la carga de agua que esta sobre el sensor sumergido o sensores sónicos. Estos últimos emiten una onda de sonido hacia el nivel de agua y espera su respuesta. Pueden incorporarse sensores de nivel, caudal, velocidad, pH, temperatura, DBO entre otros.

Posee memoria suficiente para almacenar los datos recolectados de 512 kilobytes de memoria RAM respaldada por batería, para almacenar 5 programas de muestreo, cuya información puede ser observada en pantalla.

Toda la información puede ser procesada en una computadora personal al ser descargada de una manera rápida con el uso del RTD.

El equipo de muestreo fue ubicado en puntos estratégicos de la cuenca, en donde de otros estudios se sabe existe alta producción de sedimentos.

3.2.2 Metodo para aforo en cauces

Uno de los métodos empleados fue mediante el uso de la curva de calibración o curva de descarga, que relaciona el caudal medido en la sección de aforo y la altura de agua o calado en la garganta del aforador (H-Q).



Para lo cual además de equipos automáticos de medición; en especial para la determinación de caudales en la microcuenca, se contó con el apoyo de estructuras aforadoras que han sido construidas en los puntos estratégicos de la misma, y que permitieron el cálculo mediante expresiones matemáticas de los caudales circulantes.

Se considera 2 secciones c y m, ver Figura 3.2:

$$\frac{V_c^2}{2g} + d_c + Y_c = \frac{V_m^2}{2g} + d_m + Y_m + h_e$$

Donde:

D= profundidad vertical

Y= elevación del flujo medida desde un punto de referencia

He= pérdida de fricción entre las 2 secciones

Esta pérdida puede ser muy pequeña por lo tanto es despreciable.

Usando además: $Q=v \cdot A$ y $\Delta y= Y_c - Y_m$

$$\frac{Q^2}{2gA_c^3} + d_c + \Delta y = \frac{Q^2}{2gA_m^3} + d_m$$

El valor de d_c se obtuvo de tablas hidráulicas existentes y con la ecuación anterior se obtiene d_m . Se repite el procedimiento para varios valores, de esta manera se grafica la curva de descarga altura-caudal.

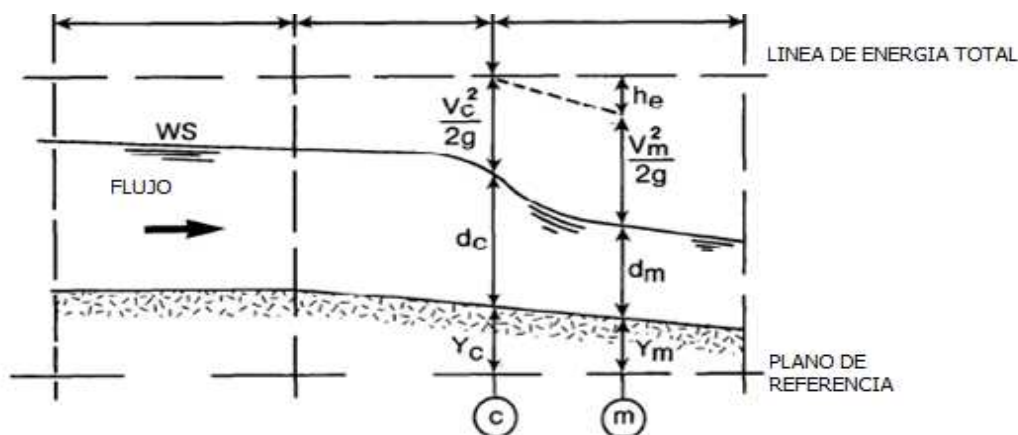


Figura 3.2 Ecuación de la energía total



Los aforos realizados en las estaciones, se realizaron mediante el uso de la sonda ultrasónica Flow Tracker.



Foto 3.3 Equipo de aforo Flow Tracker

Básicamente consiste de tres haces que se colocan de forma paralela a la dirección del flujo de agua lo que permite medir la velocidad en ese punto, las distancias entre puntos pueden variar según el ancho de la sección y la precisión requerida. Una vez terminada la sección se procede al cálculo automático del caudal.



Foto 3.4 Haces que miden la velocidad de las partículas

Se utilizaron además mapas elaborados en ArcMap, en escala 1:50000, para obtener los tipos de cobertura, presentes en la microcuenca, así como también



las longitudes de pendiente en cada una, complementándose con una visita de campo al sector para comprobar la estimación de dichas longitudes.



4. DISCUSION Y RESULTADOS

4.1 Caracterización hidrológica

Según varios estudios las lluvias erosivas son las que tienen duración de 30 minutos, para lo cual la base de datos se ha dividido en intervalos de 5 minutos con el objetivo de determinar el factor I_{30} de cada estación, con un desplazamiento de 5 minutos consecutivamente, (debido a la existencia de variabilidad en los datos analizados), de donde el valor máximo de este conjunto se denomina I_{30MAX} . La Tabla 4.1 muestra los valores obtenidos.

Tabla 4.1 Factor I_{30} para Nudpud, Guapán y Condoryacu

FACTOR I30 DE LAS ESTACIONES			
NUDPUD (mm/h)			
2005		2006	
14,732		36,576	
GUAPAN (mm/h)			
2005	2006	2009	2010
27,432	29,972	24,892	0,508
CONDORYACU (mm/h)			
2010			
33,5			

El factor I_{30MAX} es el que se utiliza para obtener la tasa de erosión promedio anual (A), mediante el uso del modelo de la RUSLE, descrito en la sección 2.4.1 de este trabajo de investigación. El análisis nos da un valor máximo para cada año, pero para la aplicación del modelo de erosión se considera el mayor valor de cada estación. Es decir:

- Nudpud $I_{30MAX}=36,576$ mm/h
- Guapán $I_{30MAX}=29,972$ mm/h
- Condoryacu $I_{30MAX}=33,5$ mm/h

Es necesario además de un análisis detallado de la base de datos de las estaciones, en donde se requiere conocer además del factor I_{30MAX} , los factores I_5 I_{10} I_{15} I_{20} I_{60} y el factor de la máxima intensidad de 24 horas, esta información nos proporciona las máximas intensidades en el tiempo correspondiente.

Las Tabla 4.2 demuestra que los valores con intensidad de 5 minutos son más importantes que duraciones mayores, lo que comprueba que las máximas



intensidades, son las que poseen corta duración. Con excepción de algunos valores en donde se ve cierta anomalía.

Tabla 4.2 Valores máximos de intensidad para cada una de las estaciones con diferentes duraciones

Intensidad	Guapán (mm/h)	Nudpud (mm/h)	Condoryacu(mm/h)
I5	85.3	67,0	63.0
I10	42.7	54,9	48.0
I15	41.7	38,6	38.0
I20	21.3	45,7	28,5
I30	24.9	36,6	33,5
I60	12.7	18,8	22,5
I24h	0.9	1,5	1,1

Los resultados obtenidos en el análisis de precipitación de la estación Guapán, muestran valores de intensidad bajos para el caso del año 2010 debido a que se tiene únicamente información recopilada de 2 meses. Los meses de análisis son muy pocos y por tanto la información que se obtiene no se puede generalizar para todo el año. Las precipitaciones e intensidades son muy pequeñas y no cumplen la condición, se descarta este año.

Para cada una de las estaciones, los análisis se han basado en los meses más lluviosos, y los rangos de intensidad que son más frecuentes son 12.5-20 mm/h, 20-30 mm/h, 30-40 mm/h.

Se observa un comportamiento similar en los meses de Marzo, Abril, Octubre y Noviembre que son los que tienen valores de intensidad máximas, para las diferentes duraciones propuestas (ver Figura 4.1). Para los casos donde las intensidades son menores de 12.5mm/h, existe un rango que es típico en todos ellos 0-5mm/h, llegando hasta valores menores de 10mm/h en el mes de Mayo y Junio. El mes de Agosto presenta un mínimo.

La Figura 4.1 muestra un comportamiento típico de los valores de I_{30} en la microcuenca, divididos en los meses secos y húmedos del año.

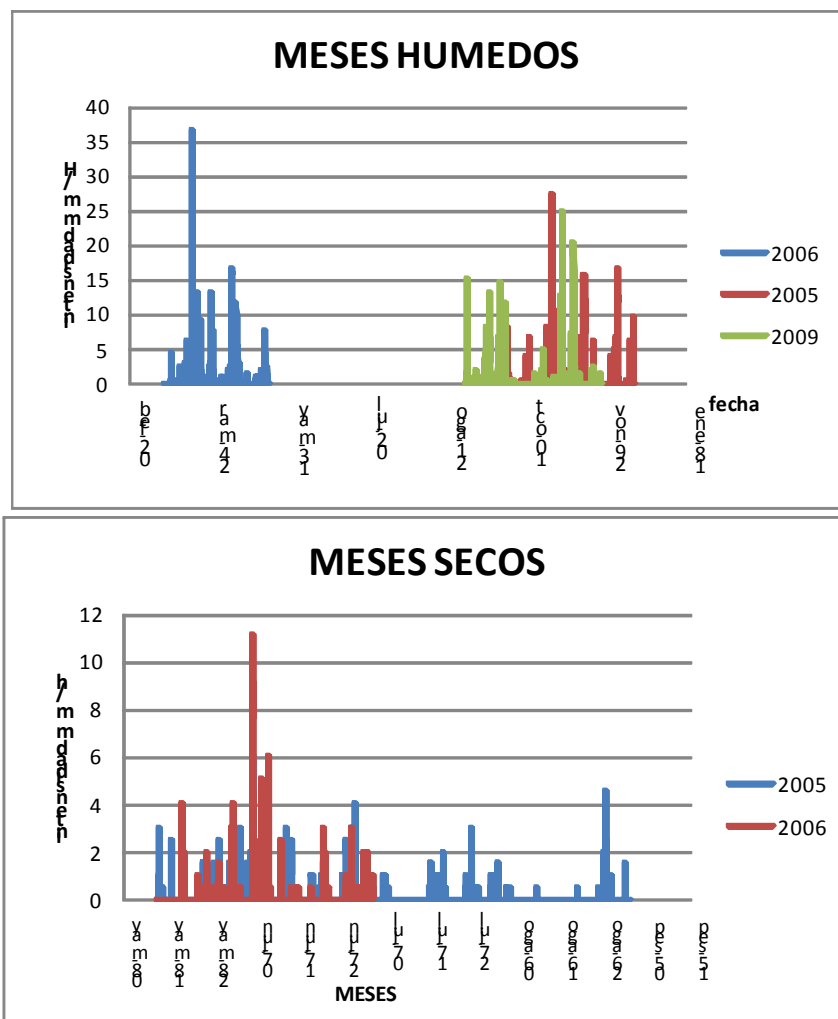


Figura 4.1 Valores I_{30} típicos en la microcuenca

Los valores de las tasas de erosión, fueron calculados con estos valores I_{30} correspondientes a cada estación.

4.2 Caracterización de los parámetros preliminares para el modelo de erosión RUSLE.

FACTOR R

Para el cálculo de la energía cinética, se utilizaron las tormentas de treinta minutos, ya que son las representativas de erosión en una microcuenca. Para el Tabacay, después del análisis hidrológico, se usaron los meses de Marzo, Abril, Octubre, Noviembre y Diciembre en donde han ocurrido eventos de intensidad máxima, dividido en rangos mayores de 1.25cm/h, para obtener de igual forma rangos de tasas de erosión con estas características. Se aplican las fórmulas descritas en la sección 2.4.1 (modelos de erosión).



Tabla 4.3 Valores de R máximos en cada estación

Intensidad (cm/h)	R ($10^2 \text{ t f m cm/ha h}$)		
	Guapán	Nudpud	Condoryacu
1.25-2	63.38	83.01	20.41
2-3	50.18	33.02	33.52
3-4	-	48.13	28.10

FACTOR K

Se utilizaron los valores de la tabla 2.1 (sección 2.4.1), cuya clasificación está dada según la nomenclatura de Soil Taxonomy. Los suelos de la microcuenca del Tabacay fueron clasificados según la FAO World Reference Base WRB, por esta razón se encontró una relación entre ellas, para la utilización de estos rangos de valores K.

Se agruparon todos los tipos de suelos Cambisol en la zona en una sola clase, que está relacionada con los suelos Inceptisols de la tabla, estos son considerados erosivos. En el caso de los Andosol de la zona, estudios demuestran que estos no se consideran suelos erosivos y los relaciona con los suelos Ultisols de la tabla. El 59.6% de la zona está formada por este tipo de suelo. Y por último los suelos Regosol y Umbrisol se relacionan con los suelos Anfisols y Oxisols respectivamente.

Por tanto se tienen tres tipos de suelos predominantes en toda el área del Tabacay, recalcando que la mayoría de Cambisol, se encuentra en la parte baja de la microcuenca, es decir en las áreas pobladas.

Los valores usados son:

Tabla 4.4 Valores de K adoptados para el cálculo de las tasas de erosión en la microcuenca

SUELOS	RANGOS DE VALOR K
Regosol	0.14-0.69
Umbrisol	0.01-0.22
Cambisol	0.02-0.55

FACTOR LS

Se obtiene mediante el uso de un nomograma que relaciona la pendiente (s %) y su longitud (l). Las pendientes usadas se muestran en la Tabla 3.2 de la sección 3.1.3. Se usan las clases en las que han sido divididas según el plan



de manejo de la microcuenca, tomando el valor máximo de cada rango. La mayor parte del Tabacay posee pendientes de 45%.

Las longitudes de pendiente fueron estimadas luego de un recorrido en la zona en donde se observaron suelos con diferentes coberturas y pendientes. La longitud de pendiente más larga fue de 120m y cobertura de bosque y pasto (ver Anexo Fotografía 9)

FACTOR C

Se obtuvo mediante el uso del nomograma “Tipo de cobertura. Universidad de Ghent”.

Tabla 4.5 Valor de C adoptados para varios tipos de cobertura en la microcuenca del Tabacay

TIPO DE COBERTURA	VALOR DE C
Suelo desnudo	1
Cobertura de cultivo de lento desarrollo o siembra tardía (1er año)	0.3-0.8
Cultivos de rápido desarrollo o siembra temprana (1er año)	0.01-0.1
Cultivos de lento desarrollo o siembra tardía (2do año)	0.01-0.1
Sabana o pradera herbacea sobrepastada	0.1
Bosques y pino	0.01

El factor P, debido a que las pendientes son mayores de 25%, el valor que se asumió es 1.

Una vez calculados todos los factores, la tasa de erosión media anual tuvo los siguientes valores, según los rangos de estimación que corresponda, de cada estación se tomó el valor mayor de R, de igual manera los valores mayores en cada rango del correspondiente factor, es decir se obtuvo los valores máximos esperados.

Para áreas donde no se encuentra ninguna cobertura o se encuentra el suelo desnudo, el valor fue de: 30-50m. (Ver Anexo Fotografías 11 y 12)



Tabla 4.6 Valores de las tasas de erosión en la microcuenca

NUDPUD							
Cultivos anuales							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	83.1	0.22	30	30	8	0.1	14.6
				100	15		27.4
		0.69		30	8		45.9
				100	15		86.0
2-3	33.0	0.22	30	30	8	0.1	5.8
				100	15		10.9
		0.69		30	8		18.2
				100	15		34.2
3-4	48.1	0.22	30	30	8	0.1	8.5
				100	15		15.9
		0.69		30	8		26.6
				100	15		49.8
Pastos y bosques							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	83.1	0.22	30	80	14	0.01	2.6
		0.69		80	14		8.0
2-3	33.0	0.22	30	80	14	0.01	1.0
		0.69		80	14		3.2
3-4	48.1	0.22	30	80	14	0.01	1.5
		0.69		80	14		4.6
Suelo desnudo							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	83.1	0.22	30	30	8	0.1	14.6
		0.69		30	8		45.9
2-3	33.0	0.22	30	30	8	0.1	5.8
		0.69		30	8		18.2
3-4	48.1	0.22	30	30	8	0.1	8.5
		0.69		30	8		26.6



CONDORYACU							
Cultivos anuales y pino							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	20.4	0.36	30	50	10	0.1	7.3
				120	16		11.8
			45	50	18		13.2
				120	20		14.7
2-3	33.5	0.36	30	50	10	0.1	12.1
				120	16		19.3
			45	50	18		21.7
				120	20		24.1
3-4	28.1	0.36	30	50	10	0.1	10.1
				120	16		16.2
			45	50	18		18.2
				120	20		20.2
Pastos							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	20.4	0.36	45	180	20	0.01	1.5
2-3	33.5						2.4
3-4	28.1						2.0

GUAPAN							
Cultivos anuales y pasto							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	63.4	0.55	30	120	20	0.1	69.7
				80	12	0.01	4.2
2-3	50.2			120	20	0.1	55.2
				80	12	0.01	3.3
Suelo desnudo							
INTENSIDAD cm/h	R (10 ² tf m cm/ha h)	K	s %	l (m)	LS ABACO	C	A t/ha/año
1.25-2	63.4	0.55	30	50	10	0.1	34.9
2-3	50.2	0.55	30	50	10	0.1	27.6

La Tabla 4.6 muestra todos los valores máximos de tasas de erosión que se esperan en la microcuenca, según las condiciones indicadas. Los valores mayores ocurren en donde la cobertura vegetal es nula o denominado suelo desnudo, dependiendo de la longitud de pendiente. La intensidad de lluvia



juega un papel importante ya que mientras mayor es la intensidad mayor es el factor de erosividad del suelo R , lo que incrementa considerablemente los valores de erosión. De igual forma la erosión incrementa según la pendiente en donde se presenta los diferentes tipos de cobertura. En general, la mayor parte de la microcuenca presenta pendientes de 45%.

4.3 Caracterización de las estaciones de aforo

Las Fotos 4.1 y 4.2, muestran los aforadores trapezoidales de flujo supercrítico colocados en dos estaciones de la microcuenca Nudpud AJ Tabacay y Tabacay AJ Burgay.

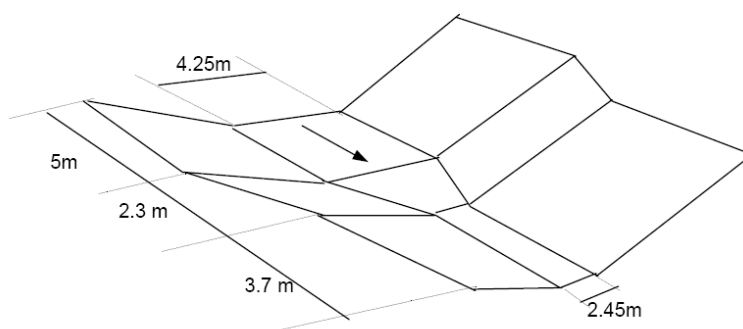


Foto 4.1 Aforador trapezoidal de régimen supercrítico en Tabacay AJ Burgay

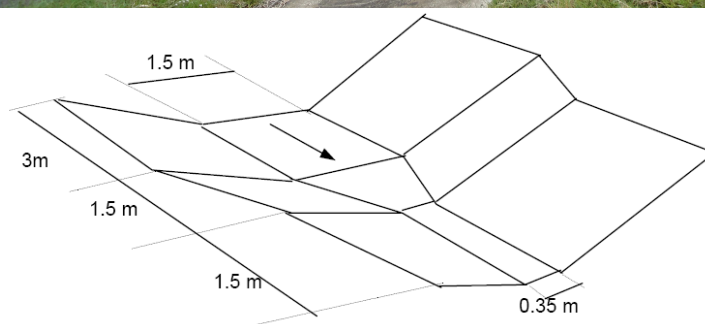


Foto 4.2 Aforador trapezoidal de régimen supercrítico en Nudpud AJ Tabacay

En la estación Mapayacu se tiene el aforador SAN DIMAS, diseñado para trabajar con carga de sedimento y arrastre de fondo (ver Foto 4.3).



Foto 4.3 Aforador san Dimas. Mapayacu



En todas las estaciones, se ha implementado un sensor ultrasónico (3210 Ultrasonic), para determinación de nivel de la superficie de agua.

La Figura 4.2 muestra la ubicación de cada una de las estaciones mencionadas.

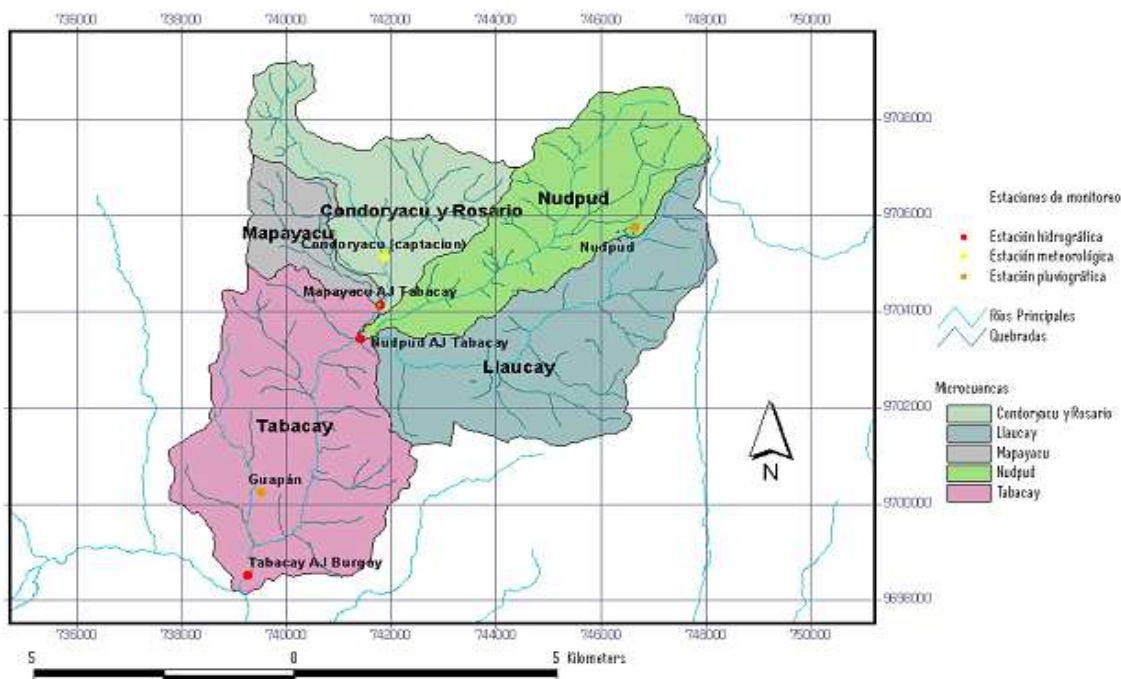


Figura 4.2 Ubicación de las estaciones de muestreo

Las ecuaciones de los aforadores de cada una de las estaciones, fueron obtenidas como se indica en la sección 3.2.2 mediante el uso de la curva de calibración (H-Q).

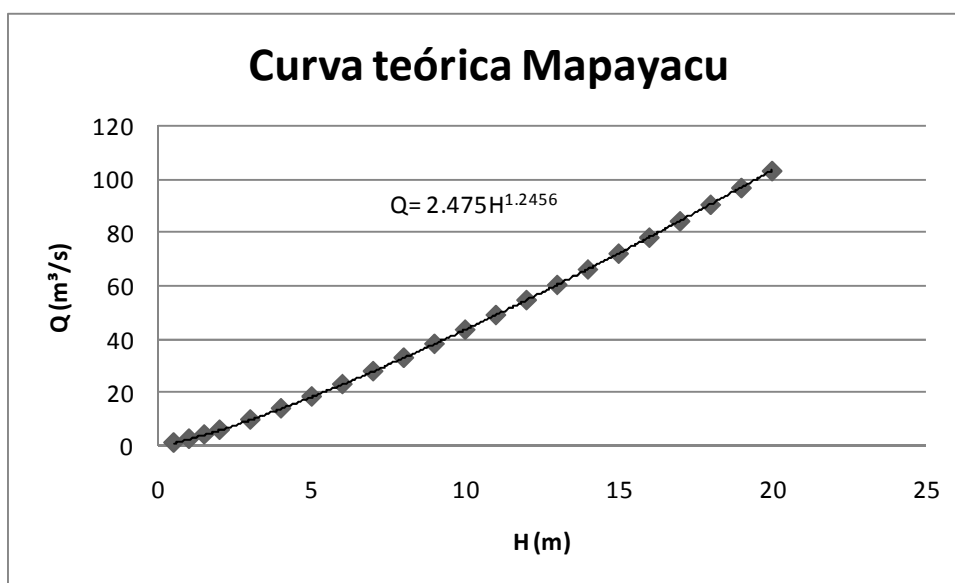




Figura 4.3 Curva de descarga estación Mapayacu

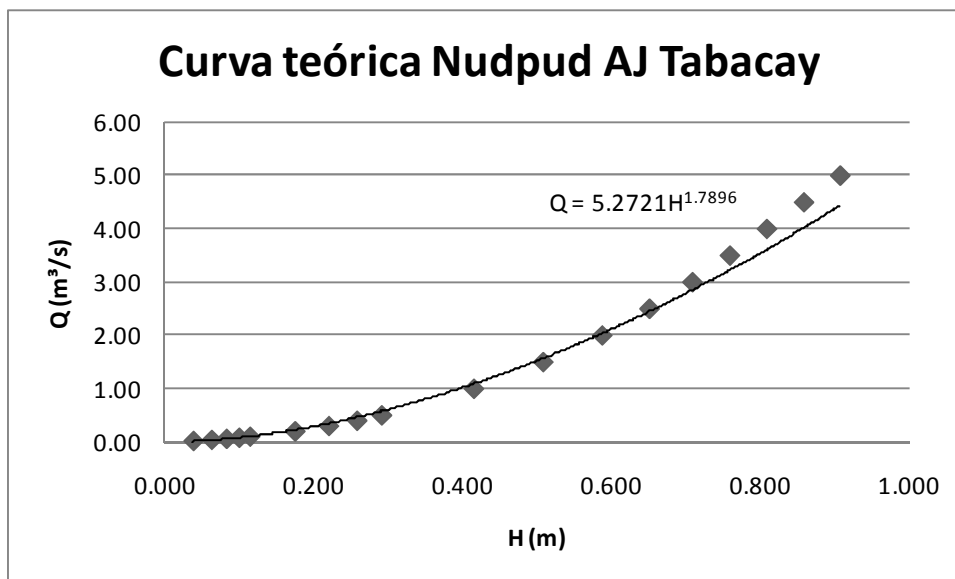


Figura 4.4 Curva de descarga Nudpud AJ Tabacay

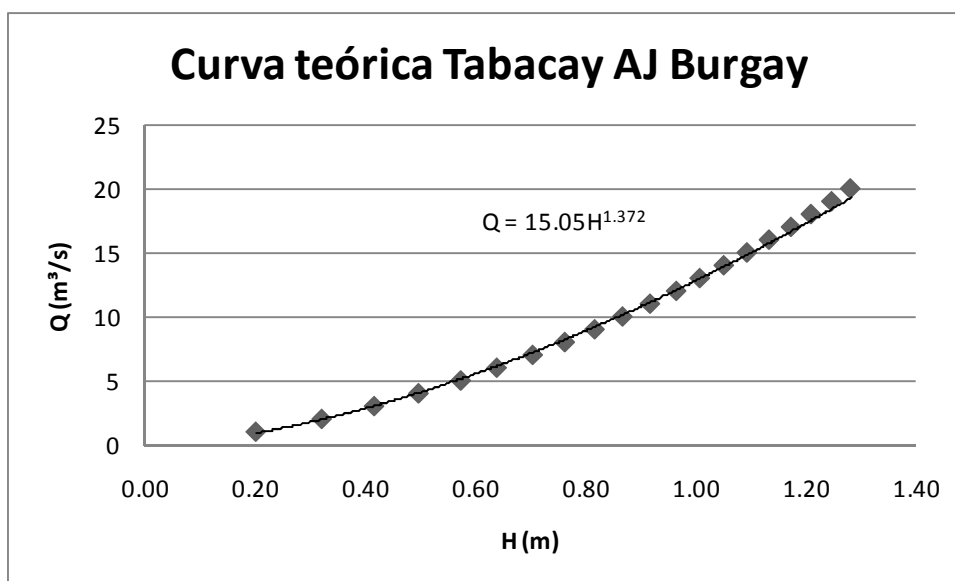


Figura 4.5 Curva de descarga Tabacay AJ Burgay



Se muestra un resumen de las ecuaciones teóricas de cada uno de los aforadores.

Tabla 4.7 Ecuaciones teóricas de las curvas de descarga

Estación	Ecuación
Nudpud AJ Tabacay	$Q=5.27 H^{1.789}$
Mapayacu	$Q=2.47 H^{1.245}$
Tabacay AJ Burgay	$Q=15.15 H^{1.372}$

Con el objetivo de validar las ecuaciones mostradas en la Tabla 4.7, se realizaron aforos en cada una de las estaciones.

En la estación Mapayacu, se tuvo una tendencia similar de todos los puntos con respecto a la ecuación teórica, separados en un porcentaje de 15%.

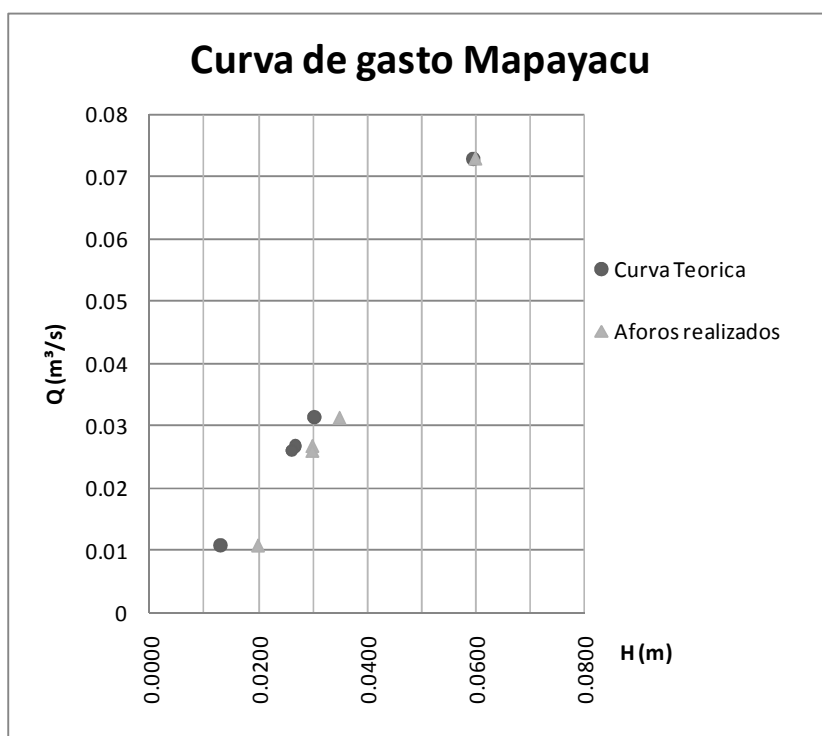


Figura 4.6 Curva de gasto. Estación Mapayacu



La estación Nudpud AJ Burgay, presenta el siguiente comportamiento:

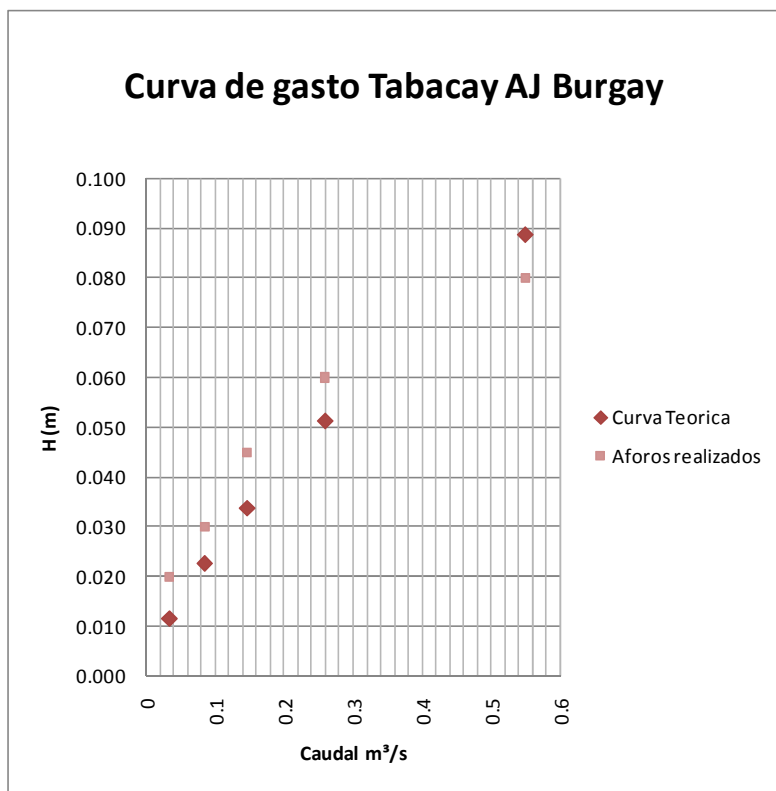


Figura 4.7 Curva de gasto. Estación Tabacay AJ Burgay

De la misma manera la separación que se observa entre los valores de los aforos realizados y los obtenidos con la curva teórica es de 29%.

Los puntos correspondientes a los aforos realizados en la estación Nudpud AJ Tabacay presentan la misma tendencia que la curva teórica, como se muestra en la Figura 4.5, con una separación de 12%,.

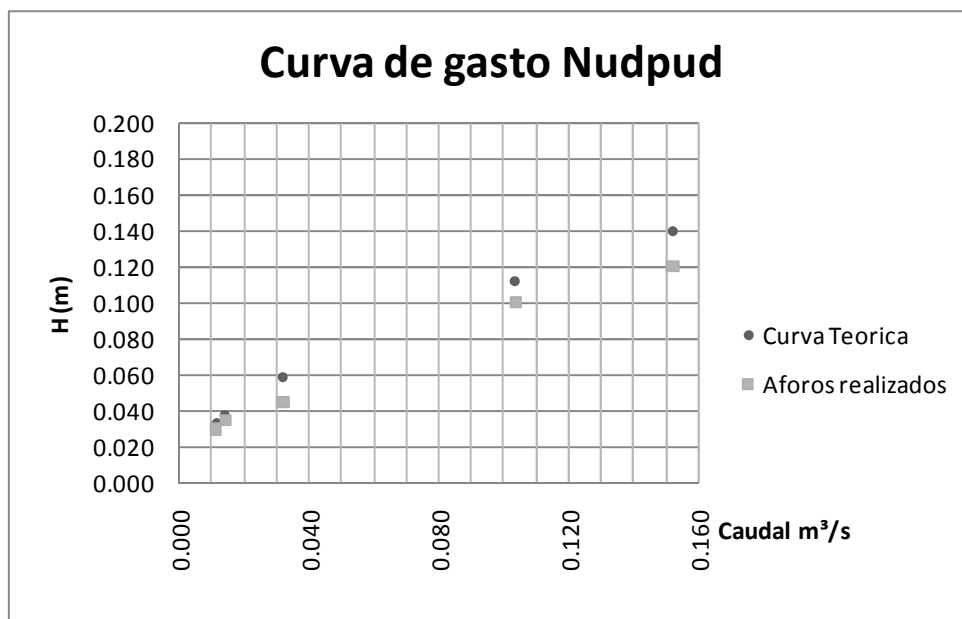


Figura 4.8 Curva de gasto. Estación Nudpud AJ Tabacay

4.4 Caracterización del sedimento en suspensión

Se realizó el análisis de carga de sedimento en suspensión recopilada mediante las estaciones de muestreo y medición automáticas ISCO 6712 (Pacheco, 2007). Se estableció la relación entre caudal líquido y el caudal de sólidos en suspensión para determinar la cantidad anual de sedimento. La información de sedimento en suspensión utilizada corresponde a las estaciones de Nudpud, y Mapayacu.

La relación entre el volumen de un cauce y la concentración de sedimentos en suspensión está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{ss} = Q \cdot C_m$$

Donde:

Q = Caudal líquido (l.s^{-1})

C_m = Concentración media de sedimentos en suspensión (gr.l^{-1})

Q_{ss} = Caudal de sólidos en suspensión (gr.s^{-1})



Se obtuvieron los siguientes resultados:

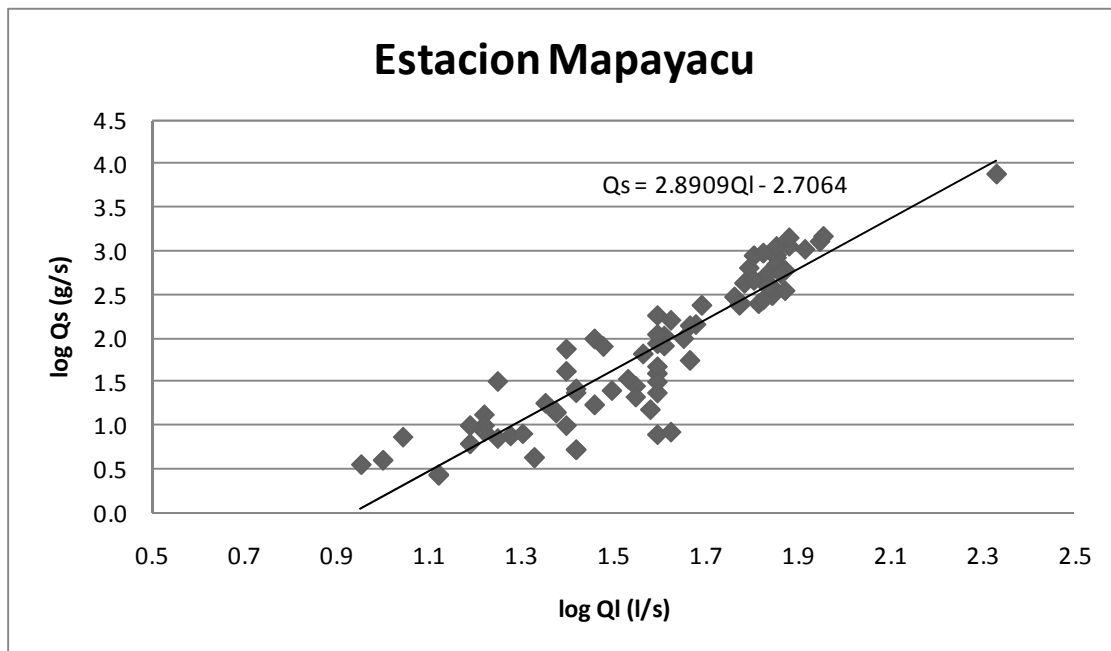


Figura 4.9 Relación de Q_l y Q_s de la estación Mapayacu

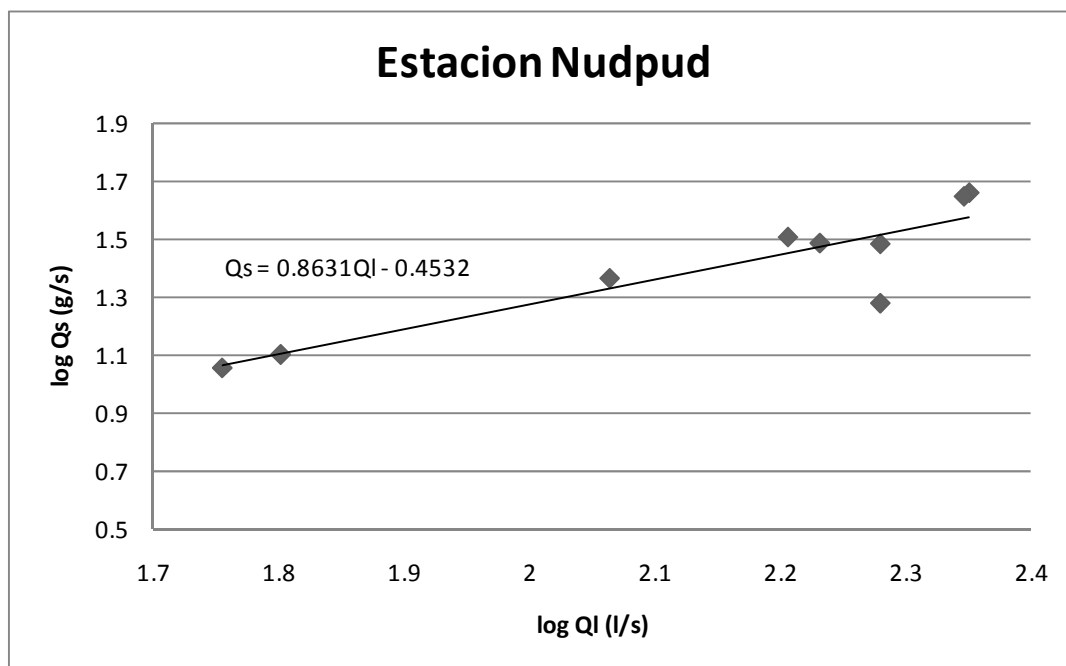


Figura 4.10 Relación de Q_l y Q_s de la estación Nudpud

Se presenta una tabla resumen de las ecuaciones que relacionan el caudal de sedimento en suspensión con el caudal líquido para las 2 estaciones:



Tabla 4.8 Ecuaciones de relación de caudal líquido y sólido

Estación	Ecuación
Mapayacu	$Q_s = 2.89Q_l - 2.71$
Nudpud	$Q_s = 0.86Q_l - 0.45$

Finalmente se determinó la cantidad de masa de sedimentos correspondiente a los ríos monitoreados (carga de sedimentos en suspensión), mediante la determinación del área bajo la curva de duración de caudal de sólidos.

$$SL_s = \frac{\sum Q_{ss} \cdot \Delta t}{1000 \cdot T}$$

Donde:

Q = Caudal líquido ($l.s^{-1}$)

C_m = Concentración media de sedimentos en suspensión ($gr.l^{-1}$)

Q_{ss} = Caudal de sólidos en suspensión ($gr.s^{-1}$)

Δt = Tiempo correspondiente al incremento del porcentaje en la curva de duración.

T = Tiempo de monitoreo (años)

SL_s = Carga anual de sedimentos en suspensión ($t.a^{-1}$)

Tabla 4.9 Producción de sedimentos en las estaciones Mapayacu y Nudpud

Estación	Área	Tiempo	Carga de sedimento	Producción de sedimentos
	(ha)	(meses)	(t)	(t/ ha/año)
Mapayacu	357	8	10535	39.8
Nudpud	3087	1	142	0.6

Los valores indicados corresponderían a las tasa de transporte de sedimento en suspensión establecidas a partir de la información obtenida de concentración de sedimento en los cauces. Se establece considerables diferencias con los valores obtenidos para erosión mediante el modelo RUSLE, lo cual se justifica dado que el modelo en mención pronostica posibles tasas de erosión, más no el aporte como sedimento en concentración en cauces. Sin embargo, se observa una gran variabilidad de valores entre las cargas de los cauces del Mapayacu y Nudpud, lo que permite establecer que una vez identificada la microcuenca del Mapayacu como una zona con procesos erosivos considerables de movimiento de masa, su aporte en cuanto a producción de sedimentos es mayor que el aporte de Nudpud, ya que esta última, relativamente, no posee zonas degradadas.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado el análisis de información de precipitación para la microcuenca del río Tabacay, estableciéndose los siguientes indicadores:

- Precipitación anual para el periodo de registro en la microcuenca de 715mm (estación Nudpud).
- Precipitación mensual máxima registrada de 112mm (mes de Marzo, estación Guapán).

El análisis de los eventos de precipitación en la microcuenca nos lleva a concluir que las lluvias de duración de 5 minutos, son las más importantes en cuanto a intensidad llegando hasta valores de 80mm/h. Para efectos de erosión, se consideran las intensidades de 30 minutos, cuyo máximo valor obtenido del análisis es 36.5mm/h.

Se ha realizado el análisis de información de carga de sedimento en suspensión para la microcuenca del río Tabacay, estableciéndose los siguientes indicadores para el periodo de registro de información disponible:

- Producción media anual máxima proyectada de 39.8 (t /ha/año), Mapayacu.
- Producción media anual mínima proyectada de 0.6 (t/ha /año), Nudpud.

Estas tasas deberán ser tomadas como referenciales únicamente dado que se requerirá de campañas de muestreo de más larga duración y homogeneidad de registro.

Se ha proyectado mediante la aplicación del modelo de la RUSLE, las tasas de erosión anual para las diferentes zonas de la microcuenca, estableciéndose lo siguiente:

- La zona baja de la microcuenca presenta coberturas de cultivos anuales y pasto, de donde se obtienen valores de tasas de erosión entre 4 t/ha/año y 53 t/ha/año. Se observa además zonas de alrededor de 50m de longitud de pendiente efectiva sin cobertura, en las cuales se obtienen valores de 18 t/ha/año - 27 t/ha/año. Las pendientes predominantes son de 12-30%.
- En la zona media de la microcuenca predomina las coberturas de pasto y pino cuyos valores están en un rango de 2 t/ha/año - 25 t/ha/año. Las pendientes en esta zona son de 30-45%.
- La zona alta presenta, para suelos, cuyas coberturas son cultivos anuales, tasas de erosión en un rango de 6 t/ha/año - 86 t/ha/año.



Suelos con cobertura de pastos y bosques presentan valores de 1 t/ha/año a 8 t/ha/año. Zonas que no poseen cobertura alguna dan valores de 6 t/ha/año – 46 t/ha/año. Todos estos valores varían de acuerdo a la intensidad de lluvia que se presenta y a su respectiva pendiente. En general las pendientes que se observan son de 30%.

Los valores de erosividad pluvial o factor R, varían de $21 \cdot 10^2 \text{tf.m.cm/ha.h}$ - $84 \cdot 10^2 \text{tf.m.cm/ha.h}$.

En general, de los resultados obtenidos, se desprende que las tasas de erosión estimadas, con valores mínimos, corresponden a suelos en donde se tiene cobertura de pasto y bosques, razón por la cual se requieren medidas de protección de suelo con este tipo de cobertura, para así disminuir la erosión en la zona.

Se recomienda en lo posterior, la realización de un estudio de los valores de cada tipo de suelo presentes en la microcuenca del Río Tabacay, para lograr de esta manera obtener datos más precisos y de mejor resolución espacial, debido a que los valores del factor K, fundamental en la obtención de las tasas de erosión estimados representan condiciones medias posibles a las que existen en la microcuenca.

Con la realización de aforos en las estaciones de muestreo de la microcuenca; Nudpud, Guapán y Mapayacu, se pudo validar las curvas de gasto teóricas de cada una de ellas. Este análisis nos permite comprobar que la ecuación obtenida para la estación de Mapayacu, posee un porcentaje de separación de 15%, con respecto a los aforos realizados. En el caso de la estación Nudpud AJ Tabacay, se ha comprobado que existe una separación en los valores teóricos y los correspondientes a los aforos realizados en un porcentaje de 12%, por tanto se recomienda realizar un ajuste a las ecuaciones, mediante una campaña de aforos en época de lluvia para obtener caudales mayores y de esta forma comprobar su comportamiento.

Para el caso de la estación Tabacay AJ Burgay, los valores teóricos difieren de los valores aforados en 29%, pero se observan imperfecciones en el fondo del aforador, por lo que se recomienda realizar las readecuaciones necesarias.

Es importante que se proyecte para la microcuenca del río Tabacay la generación de suficiente información climatológica, hidrológica y de otros procesos que permita a futuro disponer de mejor resolución espacial y temporal para proceder con estudios complementarios. El muestreo de sedimentos debe llevarse a cabo en una cantidad de lugares suficientes y representativos que proporcionen estimaciones de volumen por microcuenca para que se pueda a



futuro desglosar de mejor manera los diferentes aportes. Es por esto que se ha propuesto un programa piloto de muestreo y monitoreo hidrológico de sedimentos en suspensión, y monitoreo climatológico (ver Anexo 1).



6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Chanson H., The Hydraulics of open channel flow: An Introduction, second edition.
- Chow Ven Te., Maidment David R., Mays Larry W., 1994. Hidrología Aplicada.
- Pacheco E., 2004. Equilibrio del proceso de transporte de sedimentos en cárcavas y torrentes intervenidos en la cuenca hidrográfica del río Paute. Tesis de Maestría de Ciencias.
- Pacheco E., Cisneros F., Mora D., Govers G., 2007. Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la producción de sedimento en la cuenca hidrográfica del río Paute. Congreso Internacional sobre Desarrollo Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cochabamba, Bolivia. Publication of the Universidad Mayor de San Simón
- Heras R., 1972. Manual de Hidrología.
- Kilpatrick F.A., Schneider V.R., Techniques of Water-Resources Investigation of the United States Geological Survey. Use of flumes in measuring discharge.
- Morgan, R.P.C., 1995. Soil Erosion and conservation, second edition.
- Morgan R.P.C., 1997. Erosión y Conservación del suelo.
- Ray K. Linsley., Max A., Kohler, J., Paulus L.H. Hidrología para Ingenieros, segunda edición.
- Wohl, E., 1962. Mountain Rivers.
- Zavgorodniaya., 1996. UMACPA 1987-a y 1987-b.
- United States department of the Interior., 1980. Diseño de Presas Pequeñas: Publicación técnica de recursos hidráulicos.



7. ANEXOS

ANEXO 1 PROPUESTA DE UN PROGRAMA DE MONITOREO
HIDROMETEOROLOGICO Y MEDICIÓN PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO
TABACAY

ANEXO 2 TABLAS DE VALORES DE LA EROSIVIDAD DEL SUELO EN LA
MICROCUENCA, FACTOR R

ANEXO 3 METODO DE GUMBEL PARA EL CALCULO DE CAUDALES Y
PRECIPITACIONES MAXIMAS

ANEXO 4 METODO SCS "SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS"
NUMERO DE CURVA

ANEXO 5 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION MÉTODO DE LA
FAO PENMAN-MONTEITH

ANEXO 6 ANEXO FOTOGRAFICO



ANEXO 1

Propuesta de un Programa de monitoreo hidrometeorológico y medición para la Microcuenca del Río Tabacay

Introducción

La red hidrográfica de la cuenca del río Tabacay está integrada principalmente por los ríos Tabacay y Nudpud considerándose necesario el monitoreo del caudal líquido y de carga de sedimentos en sus cauces. El equipo para monitoreo de carga de sedimentos se encuentra en tres estaciones: Nudpud AJ Tabacay y Tabacay AJ Burgay (sector Guapán) y Mapayacu.

El programa piloto para monitoreo y medición meteorológica de la microcuenca del río Tabacay consta de un manual que guía el proceso de operación al momento de medir las variables y monitorear la microcuenca.

El manual contiene todos los lineamientos y elementos conceptuales que permitan el uso adecuado de los equipos. Presenta también la descripción de los parámetros que serán medidos así como los recursos necesarios para montaje y seguimiento de estos sistemas.

La base sobre la cual se apoyan los estudios hidrológicos son las mediciones de cada uno de los parámetros y métodos de análisis, en donde se encuentran variaciones por lo que es necesario realizar mediciones con gran frecuencia en las estaciones.

Otro aspecto de gran importancia es el manejo de esta información para lo que se requiere de técnicos capacitados en cada uno de los diferentes procesos y actividades.

La red de monitoreo y medición consta de una estación meteorológica completa, estación pluviométrica y estaciones hidrográficas “ISCO 6712”. Las actividades que se llevan a cabo son aforo líquido, aforo sólido (sedimentos en suspensión) y medida de parámetros meteorológicos.



Términos

Parámetros hidrometeorológicos

Las estaciones hidrometeorológicas son instalaciones destinadas a medir y registrar regularmente diversas variables hidrometeorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

Estas estaciones están equipadas por instrumentos de medición correspondientes a cada variable.

1. Precipitación

Definición: es el conjunto de partículas de agua líquida o sólida que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Constituye el principal proceso por el cual el agua retorna a la Tierra. La mayor parte de la precipitación cae como lluvia.

Medición de precipitación: La precipitación es medida por instrumentos que pueden ser pluviómetros o pluviógrafos.

El pluviómetro consta de tres secciones: una boca receptora, una serie de retención con capacidad para 390mm de precipitación y dentro de ella una parte recolectora para trasvasar a una probeta el agua recogida para su medición.

La precipitación ingresa por la boca y pasa a la sección colectora luego de ser filtrada. La boca del recipiente deberá estar instalada en posición horizontal, al aire libre y con los recaudos para que se mantenga a nivel y protegida del viento. La probeta debe estar graduada teniendo en cuenta la relación que existe entre el diámetro de la boca del pluviómetro y el diámetro de la probeta. El pluviómetro debe estar instalado a una altura de 1,50 metros.

Los pluviógrafos son usados para precipitaciones de corta duración y alta intensidad. Deben ser colocados donde no exista interrupción con árboles, edificaciones etc. La precipitación cae a un recipiente que tiene un flotador unido a una pluma inscriptora que actúa sobre una faja de papel reticulado. Esta faja está colocada sobre un cilindro que se mueve a razón de una vuelta por día gracias a un sistema de relojería.

La unidad de medida es mm.

Existen distintas marcas de equipo entre las cuales se recomiendan:

- DAVIS



- HOBO

Relleno de datos

Se sugieren 5 métodos:

- Regresión lineal o múltiple.
- Método de la razón: Para pares de estaciones, la razón entre sus valores mensuales, anuales o medios, tiende a ser constante.

1. Si se tienen dos estaciones (A y B), se requiere determinar q de la siguiente manera:

$$q = \frac{\sum b_i}{\sum a_i}$$

Desde $i = 1$ hasta N .

Donde N = número total de datos de la serie

b_i = dato i de la estación B

a_i = dato i de la estación A

2. Si el valor b_j falta en la estación B:

$$b_j = q * a_j$$

- Método de la razón-normal: Este procedimiento estima cantidades de lluvia con base en 2 o 3 estaciones cercanas y uniformemente espaciadas con respecto a la estación en estudio.

1. Este método se sugiere para cuando las diferencias en las precipitaciones anuales normales de las estaciones consideradas son mayores que un 10%.
2. Para obtener la precipitación anual de una estación $X(P_x)$ para un año determinado, utilizando los datos de dos estaciones A y B, se usa la siguiente expresión:

$$P_x = \frac{1}{2} \left(\frac{N_x P_A}{N_A} + \frac{N_x P_B}{N_B} \right)$$

Donde N_x es la lluvia promedio de la estación X para el mismo período que se obtiene la lluvia promedio de la estación A (N_A) y B (N_B). P_A y P_B son los valores correspondientes a P_x (precipitación anual) de las estaciones A y B.

- Método de la razón ajustada: Este método es básicamente el método de la razón, pero utiliza los promedios de lluvia de años lluviosos, secos y normales en vez del promedio anual normal.



1. Puede ser usado además para obtener una clasificación de la precipitación anual de la estación en estudio (B) y una estación cercana (A), con base en el valor medio de sus series (X_p) y sus desviaciones estándar (S), clasificando los totales anuales de dichas estaciones según se indica a continuación:

Lluvioso si b_i o $a_i \geq X_p + S$

Normal si $X_p - S \leq b_i$ o $a_i \leq X_p + S$

Seco si b_i o $a_i < X_p - S$

2. Para calcular un dato faltante b_i de la estación en estudio, se utiliza la información obtenida anteriormente de la estación cercana para determinar el año que se desea estimar y obtener el valor de q .
3. Si el total anual faltante es b_j , representa el total anual correspondiente a la estación cercana.

Procesamiento de datos

- Las determinaciones de intensidades de lluvia se harán a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos.
- Se procesarán los datos, dividiendo en intervalos de cinco minutos, para evitar perder registros de precipitación debido a que existen períodos en donde puede transcurrir un tiempo pequeño cuando se produce una lluvia de gran intensidad y pasa sin ser registrada o períodos muy largos cuando se produce el fin de la misma.
- Para duraciones de 30 minutos, importantes en cuanto a erosión, se acumularán los datos de precipitación de 5 minutos cada 30 minutos, con un desplazamiento de 5 minutos en cada una.
- Una vez que se vaya complementando la información de los datos que se tiene hay que seleccionar para cada año el máximo de precipitación para cada duración.
- Se deberá encontrar los valores de intensidad correspondientes a cada duración. Se pueden obtener además distribuciones en intervalos de 10, 20, 60 minutos y cada 24 horas.



Transformación lluvia-escorrentía

Una vez que se ha estudiado el régimen de precipitaciones de una cuenca, obteniendo una lluvia de diseño asociada a un determinado período de retorno manera de encontrar la lluvia neta o efectiva, se transforma esa lluvia efectiva en escorrentía o caudal.

Construcción de hidrogramas: Se recomienda el método del hidrograma unitario. (Diseño de Presas Pequeñas, 1980).

El Hidrograma Unitario es el hidrograma de escorrentía directa causado por una lluvia efectiva unitaria (1 cm ó 1 mm), de intensidad constante a lo largo de la duración efectiva y distribuida uniformemente sobre el área de drenaje.

El método se basa en dos hipótesis:

1. La respuesta de la cuenca ante el proceso de escorrentía sigue un comportamiento lineal. Esto significa que son aplicables los principios de proporcionalidad y superposición.
2. Una misma lluvia efectiva produce siempre el mismo hidrograma de escorrentía directa.

Para la construcción del hidrograma se requiere la obtención del flujo base, es decir el caudal base estimado, para cada día u hora si es el caso.

NOTA: Para la obtención del flujo base referirse a Chow Ven Te., Maidment David R., Mays Larry W., 1994. *Hidrología Aplicada*.

- Calcular el caudal directo estimado, mediante la diferencia entre el caudal observado en campo (m^3/s) y el caudal obtenido en el párrafo anterior.
- Para el cálculo del volumen de escurrimiento directo V_e , se suman los valores del caudal directo estimado (m^3/s) y se multiplica por el correspondiente tiempo en segundos. Es decir si los datos han sido tomados cada 2 horas, el valor tiempo será 7200seg.
- La altura de precipitación en exceso (mm) se calcula mediante:

$$h_{pe} = \frac{V_e}{Area.cuenca}$$

- Las ordenadas correspondientes al Hidrograma Unitario de la cuenca se obtienen del cociente entre los valores del caudal directo y h_{pe} .
- Las abscisas son los valores del tiempo en horas.



Otro método utilizado para la obtención de la escorrentía o caudal es el Método empírico, elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos 1985 denominado numero de curva (ver Anexo 4).

Construcción de curvas IDF

- Para el proceso de construcción se requieren al menos datos de precipitación horarios.
- Encontrar los valores de precipitación máximos anuales para cada duración.
- El cociente entre las precipitaciones máximas anuales y la duración en h, proporciona los valores de intensidad en mm/h.
- Estos valores se ajustan a una función de distribución de probabilidad para obtener los valores de intensidades máximas correspondientes a diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 25, y 50 años) según el caso.
- Se recomienda el uso de la distribución de Gumbel (ver Anexo 3).
- Determinadas las intensidades máximas se procede a graficar intensidades vs duración en horas para cada período de retorno.
- Una vez obtenidas las curvas, se pueden obtener sus ecuaciones con la siguiente expresión:

$$I = A(t + C)^B$$

Donde:

I = intensidad en milímetros por hora,

t = es el tiempo en minutos,

- A y B son parámetros que se obtienen por ajuste lineal de mínimos cuadrados entre los logaritmos de la intensidad y los logaritmos del tiempo más C ; este último es un tercer parámetro obtenido maximizando el coeficiente de correlación de la regresión lineal anterior.
- Cuando se dispongan datos de menos de un año se pueden obtener las intensidades máximas para este tiempo, la más relevante será para efectos de erosión que recomienda tomar en intervalos de 30 minutos que pasen los 12.5mm/h, es decir se tomaran de todos los meses, cada día las intensidades que pasen los 30 minutos y se vera de ellas el máximo para encontrar dicho valor. Intensidades de 30minutos son consideradas las más erosivas.

NOTA: *Todavía no se dispone de registros completos de precipitación que permitan la construcción de las curvas IDF en la microcuenca, sin embargo según se siga recopilando información se pueden conseguir los puntos iniciales de las mismas.*

- No solo se tendrán para lapsos de 30 minutos sino según la información que se requiera, es decir 5, 10, 15, 20, 60 minutos e incluso diarios.



- Se construyen las curvas, para intensidad su correspondiente duración, en cada período de retorno analizado, según se requiera.

Se recomienda al menos tener un registro de 10 años para conseguir las curvas IDF de la zona.

2. Temperatura

Definición: es el indicador de la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire. Aunque existen otras escalas para otros usos, la temperatura del aire se suele medir en grados centígrados.

La temperatura depende de diversos factores, por ejemplo, la inclinación de los rayos solares. También depende del tipo de sustratos, la dirección y fuerza del viento, la latitud, la altura sobre el nivel del mar y la proximidad de masas de agua.

Temperatura máxima diaria: Es la mayor temperatura registrada en un día, y que se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas.

Temperatura mínima diaria: Es la menor temperatura registrada en un día, y se puede observar entre las 06:00 y las 08:00 horas.

Medida de temperatura: para la medida de temperatura la estación meteorológica consta de un instrumento denominado termómetro, siendo los más comunes de mercurio y los de alcohol. Pero las estaciones modernas están provistas de termógrafos o termómetros registradores, que registran la temperatura sobre un papel a escala graduada.

3. Radiación solar

Definición: es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatios por metro cuadrado).

Medida de radiación solar: se usan los piranómetros o denominados también solarímetros, son sensores destinados para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra.



4. Viento

Velocidad

Definición: es la distancia recorrida por una masa de aire en una unidad de tiempo (min, s, h, etc). El resultado se expresa en km/h, en m/s o en una unidad en escala bitraña Beaufort, que es la más utilizada.

Dirección

Definición: indica de donde viene el viento, es decir, si indica el Norte, es que el viento va hacia el Sur. Se expresa con diferentes magnitudes según el país.

Medida de velocidad y dirección de viento: El viento se mide con diversos aparatos para saber su dirección y velocidad. La dirección se mide con diversos tipos de veletas, que giran según la dirección del viento y están sobre una base con los puntos cardinales fijos, donde se puede determinar la dirección desde la cual sopla el viento.

La velocidad del viento se mide con los anemómetros, siendo el más común el de molinete, que registra sobre una escala la velocidad en forma automática. La velocidad de los vientos se mide por escalas, según los efectos que producen en el ambiente. Como se menciona anteriormente la escala más conocida es la Beaufort, concebida por el almirante inglés F. Beaufort en 1805. Esta escala tiene grados de 0 a 12 y expresa la velocidad en nudos (1 nudo = 1,8 km/hora).

5. Presión atmosférica

Definición: es la presión ejercida por el aire atmosférico en cualquier punto de la atmósfera.

Medida de presión: Se mide con el barómetro. El barómetro registrador se le llama barógrafo. El resultado se expresa en mb (milibares) o en mm Hg (milímetros de mercurio). La presión normal es de 1013mb, que es igual a 760mm Hg.

6. Humedad

Definición: la humedad indica la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Depende en parte, de la temperatura, ya que el aire caliente contiene más humedad que el frío.

Puede expresarse como humedad relativa o absoluta. La humedad relativa se expresa en forma de tanto por ciento (%) de agua en el aire. La humedad absoluta se refiere a la



cantidad de vapor de agua presente en una unidad de volumen de aire y se expresa en gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3).

Medida de humedad: Para medir la humedad se utiliza un instrumento llamado higrómetro. Puede ser de diversos tipos: de condensación, eléctrico, de absorción y psicrómetro.

Estos instrumentos se encuentran disponibles en las mismas marcas especificadas en la precipitación. Aunque las más usadas son DAVIS y HOBO.

Los datos que se obtienen de estos factores meteorológicos permitirán el cálculo de la evapotranspiración mediante el método de FAO Penman-Monteith (ver Anexo 5).

Sedimento en suspensión

Definición: Los sedimentos en suspensión son finos que llegan a la corriente por procesos de erosión pluvial de la cuenca vertiente o por lavado de material suelto de las márgenes. Se mantienen en suspensión mientras la fuerza ascensional que se genera por la velocidad del flujo sea mayor que su propio peso.

De todos los sedimentos que transporta un río, los que se trasladan suspendidos en el agua son cuantitativamente los más importantes y su determinación resulta un aspecto central en cualquier investigación sobre el tema, a fin de evitar errores en los cálculos.

Medición de sólidos en suspensión: En cada uno de los cauces seleccionados Tabacay, Nudpud y Mapayacu se instalaron estaciones hidrográficas que monitorean la caga de sedimentos en suspensión de forma automática. Se denominan muestreadores portables Teledyne ISCO 6712.

Una vez cumplidos los intervalos de tiempo de medida o eventos programados, se retiran las muestras y se llevan a laboratorio para su análisis. Se recomienda usar el método del cono de imhoff.

La toma de muestras manual se realizará siguiendo los procedimientos establecidos en la literatura técnica. Se recomienda el método de selección de verticales.

Se deberá obtener medidas de caudal líquido simultáneamente a la toma de muestras de concentración de carga de sedimento en suspensión.

Medicion de Caudal



Definición: El caudal de un río es la cantidad, o volumen, de agua que pasa por una sección determinada en un tiempo dado. Se expresa en litros o metros cúbicos por segundo (l/s o m³/s). Está en función de la altura del calado, medida que se toma en campo.

Los equipos de medida colocados en las estaciones descritas tienen una relación nivel-caudal y de igual manera estarán programadas para que la recolección de datos se de acuerdo a eventos de crecida o descenso de nivel. Están complementadas con estructuras aforadoras construidas para su análisis.

El objetivo de estas es la toma o recolección de datos de nivel de agua de donde se obtiene la relación H-Q, denominada curva de descarga. Para encontrar esta curva, cada estación está regida por una determinada ecuación, a la que se llega mediante el uso de la ecuación de energía total (ver literatura técnica). Con estos datos se debe calibrar y validar las ecuaciones cada año para tener datos confiables, debido a que las condiciones de la zona pueden variar.

Con la realización de una campaña de aforos se podrá llegar a determinar las ecuaciones que seguirán rigiendo en la programación para el monitoreo de sedimentos en suspensión, mediante dispositivos mixtos (ver literatura técnica).

Los aforos se realizarán dependiendo de los eventos del clima, para evitar la toma de valores de caudal iguales.



ANEXO 2

Tablas de valores de la erodabilidad del suelo en la microcuenca, factor R

GUAPAN:

Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-3 cm/h			
05/12/2005	1.27	0.5	139.4
14/11/2005	1.32	0.5	146.0
13/11/2005	1.37	0.5	152.6
14/11/2005	1.42	0.5	159.3
14/11/2005	1.47	0.5	165.9
14/11/2005	1.52	0.5	172.7
14/11/2005	1.57	0.5	179.4
05/12/2005	1.63	0.5	186.2
05/12/2005	1.68	0.5	193.0
25/10/2005	1.73	0.5	199.9
25/10/2005	1.78	0.5	206.7
25/10/2005	1.83	0.5	213.6
2-3 cm/h			
25/10/2005	2.18	0.5	262.7
25/10/2005	2.39	0.5	291.2
25/10/2005	2.69	0.5	334.6
25/10/2005	2.74	0.5	341.9

1,25-2cm/h		
E	2114.68	tf.m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	6338.12	tf.m.cm/ha.h
R=	63.38	10^2tf.m.cm/ha.h
2-3 cm/h		
E	1230.48	tf.m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	3687.99	tf.m.cm/ha.h
R=	36.88	10^2tf.m.cm/ha.h



Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-3 cm/h			
07/04/2006	1.32	0.5	146.0
07/04/2006	1.42	0.5	159.3
07/04/2006	1.57	0.5	179.4
07/04/2006	1.63	0.5	186.2
07/04/2006	1.68	0.5	193.0
12/03/2006	1.73	0.5	199.9
2-3 cm/h			
12/03/2006	2.39	0.5	291.2
12/03/2006	2.49	0.5	305.6
12/03/2006	2.69	0.5	334.6
12/03/2006	2.90	0.5	364.0
12/03/2006	3.00	0.5	378.7

1,25-2cm/h		
E	1063.71	tf. m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	3188.16	tf.m.cm/ha.h
R=	31.88	10²tf.m.cm/ha.h
2-3 cm/h		
E	1674.17	tf. m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	5017.83	tf.m.cm/ha.h
R=	50.18	10²tf.m.cm/ha.h

Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-2 cm/h			
21/10/2009	1.32	0.5	146.0
30/09/2009	1.42	0.5	159.3
30/09/2009	1.47	0.5	165.9
30/09/2009	1.52	0.5	172.7
06/12/2009	1.63	0.5	186.2
06/12/2009	1.93	0.5	227.5
06/12/2009	1.98	0.5	234.5
2-3 cm/h			
06/12/2009	2.03	0.5	241.5
29/11/2009	2.08	0.5	248.5
29/11/2009	2.24	0.5	269.8
29/11/2009	2.39	0.5	291.2
29/11/2009	2.44	0.5	298.4
29/11/2009	2.49	0.5	305.6



1,25-2 cm/h		
E	1292.05	tf. m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	3872.53	tf.m.cm/ha.h
R=	38.73	10^2tf.m.cm/ha.h
2-3 cm/h		
E	1655.05	tf. m/ha
I30 MAX	3.00	cm/h
EI30MAX=	4960.52	tf.m.cm/ha.h
R=	49.61	10^2tf.m.cm/ha.h

NUDPUD:

Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-2 cm/h			
11/11/2005	1.02	0.5	107.1
10/10/2005	1.07	0.5	113.5
10/10/2005	1.12	0.5	119.9
10/10/2005	1.27	0.5	139.4
10/10/2005	1.42	0.5	159.3
10/10/2005	1.47	0.5	165.9

1.25-2 cm/h		
E	805.16	tf. m/ha
I30 MAX	3.66	cm/h
EI30MAX=	2944.97	tf.m.cm/ha.h
R=	29.45	10^2tf.m.cm/ha.h



Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-2 cm/h			
12/03/2006	1.32	0.5	146.0
12/03/2006	1.37	0.5	152.6
12/03/2006	1.42	0.5	159.3
12/03/2006	1.52	0.5	172.7
12/03/2006	1.57	0.5	179.4
12/03/2006	1.63	0.5	186.2
14/03/2006	1.68	0.5	193.0
14/03/2006	1.73	0.5	199.9
14/03/2006	1.78	0.5	206.7
04/04/2006	1.83	0.5	213.6
04/04/2006	1.93	0.5	227.5
04/04/2006	1.98	0.5	234.5
2-3 cm/h			
04/04/2006	2.29	0.5	276.9
06/04/2006	2.44	0.5	298.4
06/04/2006	2.64	0.5	327.4
3-4 cm/h			
06/04/2006	3.05	0.5	386.1
06/04/2006	3.51	0.5	453.5
06/04/2006	3.66	0.5	476.3

1,25-2 cm/h		
E	2271.36	tf. m/ha
I30 MAX	3.66	cm/h
EI30MAX=	8307.71	tf.m.cm/ha.h
R=	83.08	$10^{2tf.m.cm/ha.h}$
2-3 cm/h		
E	902.66	tf. m/ha
I30 MAX	3.66	cm/h
EI30MAX=	3301.56	tf.m.cm/ha.h
R=	33.02	$10^{2tf.m.cm/ha.h}$
3-4 cm/h		
E	1315.95	tf. m/ha
I30 MAX	3.66	cm/h
EI30MAX=	4813.21	tf.m.cm/ha.h
R=	48.13	$10^{2tf.m.cm/ha.h}$



CONDORYACU:

Fecha	Intensidad cm/h	Duración horas	Energía cinética (tf. m/ha)
1.25-2 cm/h			
23/05/2010	1.55	0.5	176.1
23/05/2010	1.75	0.5	202.9
23/05/2010	1.95	0.5	230.2
2-3 cm/h			
23/05/2010	2.40	0.5	293.0
23/05/2010	2.70	0.5	335.7
23/05/2010	2.95	0.5	371.9
3-4 cm/h			
23/05/2010	3.20	0.5	408.4
23/05/2010	3.35	0.5	430.5

1,25-2 cm/h		
E	609.26	tf. m/ha
I30 MAX	3.35	cm/h
EI30MAX=	2041.02	tf.m.cm/ha.h
R=	20.41	10^2tf.m.cm/ha.h
2-3 cm/h		
E	1000.57	tf. m/ha
I30 MAX	3.35	cm/h
EI30MAX=	3351.90	tf.m.cm/ha.h
R=	33.52	10^2tf.m.cm/ha.h
3-4 cm/h		
E	838.94	tf. m/ha
I30 MAX	3.35	cm/h
EI30MAX=	2810.44	tf.m.cm/ha.h
R=	28.10	10^2tf.m.cm/ha.h



ANEXO 3

Método de Gumbel

La distribución Gumbel se utiliza para el cálculo de valores extremos de variables meteorológicas (entre ellas precipitaciones y caudales máximos) y es uno de los métodos más empleados para el estudio de las precipitaciones máximas en 24 horas.

Este método tiene la forma:

$$x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$$

Donde: x presenta el valor a asumir por la variable aleatoria.

Para la determinación de los parámetros d y u, se utilizan las siguientes expresiones:

$$u = \bar{x} - 0.450074S$$

$$\frac{1}{d} = 0.779696S$$

Donde:

$\bar{x}$ = media aritmética de la serie de datos considerados.

S = desviación típica de la muestra de datos considerados.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Los valores 0,450047 y 0,779696, son válidos para un número de cincuenta datos. Sin embargo Heras los señala como admisibles para cualquier tamaño de población debido a la poca relevancia que poseen.

La probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número x, está dado por la función de distribución de probabilidad F (X).

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Teniendo los valores de F(x), para cada período de retorno y los respectivos coeficientes d y u se encuentran los valores de x que son los valores de intensidad máxima.



ANEXO 4

Número de curva

Consta de los partes: la primera estima el volumen de escorrentía resultante de una precipitación-escurrimiento directo, y en la segunda se determina el tiempo de distribución de escurrimiento.

La estimación del escurrimiento correspondiente a una lluvia, se hace con el siguiente procedimiento:

- Relacionando el escurrimiento con la lluvia se obtiene generalmente una relación

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Donde:

Q=escorrentia producida en mm.

P=precipitacion en mm.

S=capacidad de retencion en mm.

- El valor de S se asocia al número de curva CN:

$$S(mm) = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$S(pulg) = \frac{1000}{CN} - 10$$

- Para determinar el volumen de escurrimiento, debe hacerse una estimación del valor de CN, el cual depende de características de la cuenca tales como uso de la tierra, condiciones del suelo y condiciones de humedad de la cuenca en el momento de ocurrir, la precipitación.
- Se conocen y aceptan tres clases de condiciones de humedad antecedentes para una cuenca, según el SCS, como se muestra en el cuadro siguiente:



Clases de condiciones de humedad antecedentes	Lluvia total de los 5 días anteriores (mm)	
	Estacion sin desarrollo vegetativo	Estacion de crecimiento vegetativo
I	menos de 12.7mm	menos de 35.6mm
II	12.7 a 27.9 mm	35.6 a 53.3 mm
III	mas de 27mm	mas de 53.3mm

Tabla 1. Condiciones de humedad para determinar el numero de curva

- Los valores de CN se obtienen de la siguiente tabla. En las abscisas se tiene el valor de P en pulgadas y en las ordenadas el valor de Q en pulgadas.

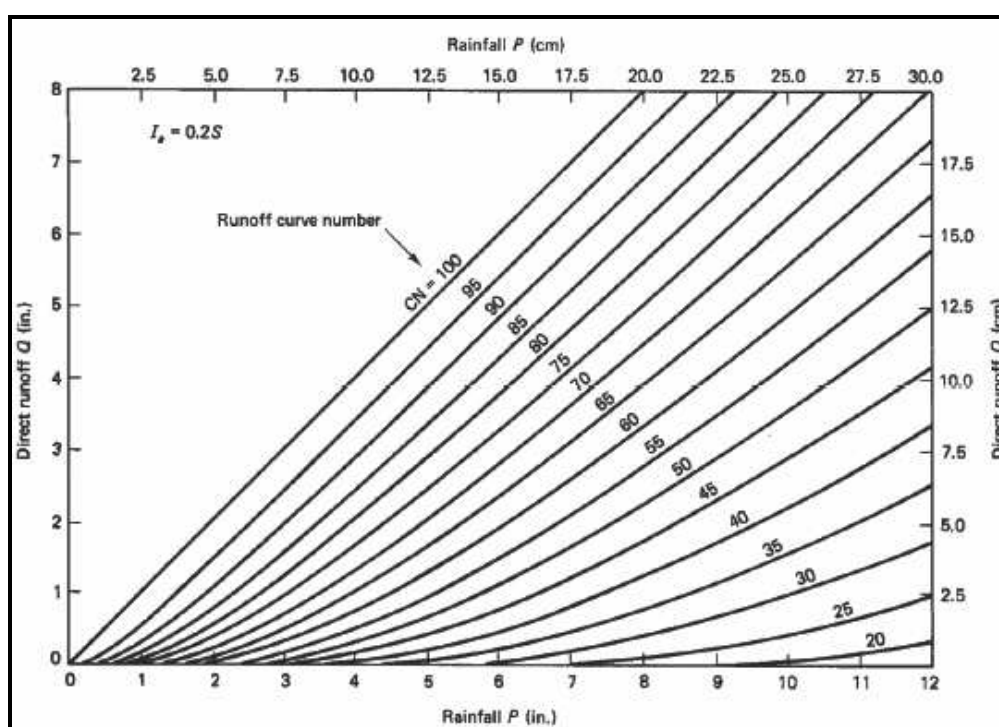
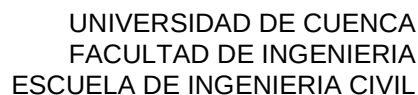


Figura 1. Valores de número de curva.

CN=1 significa una capacidad de retención máxima en la cuenca (Q=0)

- CN=100 significa una capacidad de retención nula (Q=P)
- En la práctica, los valores, más frecuentes están comprendidos entre 40 y 80m



Numero de curva de escorrentia para usos selectos de tierra agricola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia=0.2S				
Descripcion del uso de la tierra	Grupo hidrologico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamientos de conservacion	72	81	88	91
Tierra cultivada con tratamientos de conservacion	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
Pastizales: condiciones optimas	39	61	74	80
Vegas de rios: condiciones optimas	30	58	71	78
Bosques: Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Bosques: cubierta buena	25	55	70	77
Areas abiertas, cesp�d, parques, campos de golf, cementerios, etc:				
Optimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o mas	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Areas comerciales de negocios 85% impermeables	89	92	94	95
Distritos industriales 72% impermeables	81	88	91	93
Tamaño promedio del lote porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

CLASE A: Suelos con alta capacidad de infiltración. Arenas, gravas y loess profundos.

CLASE B: Suelos con capacidad de infiltración moderada. Loess poco profundos, marga arenosa.

CLASE C: Suelos con capacidad de infiltración bajas. Marga arcillosa, marga arenosa poco profunda, suelos de bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.

CLASE D: Suelos con muy baja capacidad de infiltración o en los que el nivel freático está cerca de la superficie. Suelos que aumentan de volumen cuando están mojados, arcillas plásticas pesadas y algunos suelos salinos.



ANEXO 5

Método de la FAO Penman-Monteith

Calculo de la evapotranspiración

Se basa en la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(Rn - G) + \left(\gamma \frac{900u_2}{T_{med} + 273} \right) \lambda(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

- ET_o = evapotranspiración de Penman-Monteith (mm día^{-1}).
- λ = calor latente de vaporización (MJ kg^{-1}).

$$\lambda = 2.501 - (0.002361)T_{med}$$

- Δ = pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

$$\Delta = \frac{4098(e^o T)}{(T + 237.3)^2}$$

$e^o (T_{med.})$ = es la presión de vapor en saturación a temperatura del aire.

$$e^o T_{med} = 0,6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 273}\right)$$

Siendo $\exp = 2,7183$ y $T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$

- Rn = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Donde:

R_{ns} = Radiación neta de onda corta ($\text{MJ/ m}^2 \text{ día}$)

R_{nl} = Radiación neta de onda larga ($\text{MJ/ m}^2 \text{ día}$)

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$\alpha = 0.23$

R_s = Radiación solar global diaria ($\text{MJ/ m}^2 \text{ día}$).



$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\max} K + T_{\min} K}{2} \right) \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

s = constante de Stefan-Boltzmann ($4903 \cdot 10^{-9}$ MJ/ K⁴ m² día).

T_{máx}.K = temperatura máxima absoluta del día (K= °C + 273,16).

T_{mín}.K = temperatura mínima absoluta del día (K= °C + 273,16).

e_a = presión de vapor actual (kPa).

R_s = Radiación solar diaria (MJ/ m² día).

R_{so} = radiación solar para un día sin nubes (MJ/ m² día).

$$e_a = \frac{e^{\circ} T_{\max} \frac{Hr_{\min}}{100} + e^{\circ} T_{\min} \frac{Hr_{\max}}{100}}{2}$$

Donde:

e^o (T_{máx}.) = presión de vapor de saturación a temperatura máxima (kPa).

$$e^{\circ} T_{med} = 0,6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 273} \right)$$

Siendo: exp = 2,7183.

Hr_{mín}. = humedad relativa mínima diaria (%).

e^o (T_{mín}.) = presión de vapor de saturación a temperatura mínima (kPa).

$$e^{\circ} T_{med} = 0,6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 273} \right)$$

Hr_{máx}. = humedad relativa máxima diaria (%).

$$R_{so} = (0.75 + 2.10^{-5} z) R_a$$

z = altura sobre el nivel del mar en que se encuentra la estación (m).

R_a = radiación extraterrestre para períodos diarios (MJ m⁻² día⁻¹).

$$R_a = \frac{24.60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s]$$

Donde:

G_{sc} = constante solar (0,0820 MJ/ m² min).

d_r = inversa de la distancia relativa entre la tierra y el sol.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi J}{365} \right)$$



Donde:

J = día juliano, 1^{ero} de enero y 366 ó 365 el 31 de diciembre según sea el año bisiesto o no.

ω_s = ángulo a la hora de la puesta del sol en radianes.

$$\omega_2 = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

Donde:

j = latitud en la que se encuentra la estación en radianes (rad). Si el valor se expresa en grados sexagesimales hay que multiplicar por $\pi/180$ para pasarlos a radianes.

d = declinación solar en radianes.

$$\delta = 0.049 \sin \frac{2\pi}{365} J - 1.39$$

- G = flujo térmico del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

$$G = c_s \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

Donde:

c_s = capacidad calorífica del suelo ($\text{MJ/ m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$).

T_i = temperatura media del aire del día actual ($^\circ\text{C}$).

T_{i-1} = temperatura media del aire del día anterior ($^\circ\text{C}$).

Δt = longitud del intervalo de tiempo (días), En nuestro caso, al realizar el cálculo diario el intervalo será de 1 día.

Δz = profundidad efectiva del suelo (m).

Debido a la variabilidad que puede presentarse en los parámetros c_s y Δz , se usa:

$$G = 0.1(T_i - T_{i-1})$$

T_i = temperatura media del aire del día actual ($^\circ\text{C}$).

T_{i-1} = temperatura media del aire del día anterior ($^\circ\text{C}$).

0,1 = factor de conversión empírico (para transformar a $\text{MJ/ m}^2 \text{ día}$).

- $(e_s - e_a)$ = déficit de presión de vapor (kPa).
- g = constante psicométrica ($\text{kPa/ }^\circ\text{C}$).
- T = temperatura media del aire en $^\circ\text{C}$.
- U_2 = velocidad del viento medida a 2 m de altura (m/s).

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda}$$

Donde:



c_p = calor específico a presión constante ($1,013 \cdot 10^{-3}$ MJ/ kg °C).

l = calor latente de evaporación (MJ/ kg).

ε = relación entre el peso molecular del aire húmedo y el aire seco. Su valor es 0,622.

P = presión atmosférica (kPa).

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$

Donde:

P = presión atmosférica (kPa).

z = altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra la estación (m).

$$\gamma = 0.0016286 \left(\frac{P}{\lambda} \right)$$

- e_s = presión de vapor de saturación (kPa).

$$e_s = \frac{e^{\circ T_{\max}} + e^{\circ T_{\min}}}{2}$$



ANEXO FOTOGRAFICO



Fotografía 1-4. Deslizamientos en la microcuenca



Fotografía 5-6 Formación de cárcavas



Fotografía 7. Cubierta de bosque



Fotografía 8. Uso del suelo para ganado



Fotografía 9-10. Cultivos en pendientes pronunciadas



Fotografía 11-12. Suelo desnudo



Fotografía 13. Siembra en las márgenes



Fotografía 14. Construcción de caminos sin control



Fotografía 15-16. Zonas extensas con poca o ninguna cobertura



Fotografía 17. Tala de arboles