



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**INVESTIGACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓGRAFA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**“Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la
deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y
almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del
Río San Pedro”**

Paola Karina Valenzuela Cárdenas

Sangolquí, 2005

DATOS INFORMATIVOS

TEMA:

Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y el almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro

INSTITUCIONES:

Proyecto Manejo Colaborativo de Recursos Naturales:
MANRECUR III de la Corporación Grupo Randi Randi
IDRC - Canadá
Consortio para el Desarrollo Sostenible del Cantón Mejía:
CODECAME
Escuela Politécnica del Ejército

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:

Provincia de Pichincha, jurisdicción del Cantón Mejía, partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro.

INVESTIGADORA DEL PROYECTO:

Paola Karina Valenzuela Cárdenas. Egresada de la Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente de la Escuela Politécnica del Ejército.

CERTIFICACION

Certifico que la Señorita Paola Karina Valenzuela Cárdenas, realizó el presente Proyecto de Grado titulado “Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y el almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro”, bajo la dirección de:

Ing. Guillermo Beltrán

DIRECTOR

Ing. Milton Silva

CODIRECTOR

Sangolquí, Enero 2005

DEDICATORIA

A Mery Salgado

Amiga y compañera,
por los gratos momentos compartidos
y porque su vida es ejemplo
para quienes la conocemos...

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que en determinada manera colaboraron con la realización de esta investigación.

Agradezco en primer lugar a mi familia, en especial a mis padres Hugo y Anita, que día a día permanecieron a mi lado, siempre consiguiendo la manera adecuada de apoyarme y darme ánimos de seguir adelante. Definitivamente a ellos debo el éxito de mis estudios y mis deseos de constante superación.

Al Ing. Mauricio Proaño M.Sc. y a Susan Poats PhD, codirectores del Proyecto Manrecur III de la Corporación Grupo Randi Randi, por brindarme la oportunidad de realizar mi tesis, y ofrecerme todas las facilidades para elaborarla y culminarla satisfactoriamente.

A la Ing. Carla Gavilanes por compartir conmigo su tiempo, sus conocimientos y experiencias, por ayudarme a aclarar mis ideas, y darme pautas que hicieron más fácil el camino.

A los Ingenieros Guillermo Beltrán y Milton Silva, director y codirector de tesis, por sus valiosas observaciones y su generosa voluntad para colaborar en todo cuanto estuvo a su alcance.

Un agradecimiento muy especial al Ingeniero Joel Constante por su inmensa colaboración en la salida al campo, y por compartir conmigo sus amplios conocimientos que me ayudaron a conseguir mejores resultados en el estudio.

Deseo mencionar a las instituciones que me pusieron a disposición su información, sin la cual hubiera resultado imposible concluir la tesis: Fondo para el Agua de la Empresa de Agua Potable de Quito, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Departamento de Fotografía Aérea del Instituto Geográfico Militar, SIG-AGRO del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Gracias por su confianza y apertura.

Y a Christian, por construir sueños conmigo y luchar por hacerlos realidad, sencillamente gracias por ser así....

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. RESUMEN	10
1.2. ABSTRACT	11
1.3. ANTECEDENTES	11
1.3.1. Creación del Consorcio para el Desarrollo Sostenible del Cantón Mejía – CODECAME..	11
1.3.2. La importancia de los páramos en una Cuenca Hidrográfica	13
1.3.3. La deforestación y la degradación de los páramos y bosques	14
1.3.4. Modelo Hídrico SWAT.....	16
1.4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.6. OBJETIVOS.....	20

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. BASES CONCEPTUALES DE UN ANÁLISIS MULTITEMPORAL	23
2.3. BASES CONCEPTUALES DEL MODELO HÍDRICO SWAT	24
2.3.1. Estimación de producción de caudales y sedimentos	28

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	30
3.2. HIDROGRAFÍA	33
3.3. SUELOS	34
3.4. CLIMA.....	39
3.5. USO DEL SUELO	41
3.6. ÁREAS PROTEGIDAS	45

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍAS

4.1. ANÁLISIS MULTITEMPORAL UTILIZANDO FOTOGRAFÍAS AÉREAS	48
4.1.1. Fase Preparatoria.....	48
4.1.2. Fase de ejecución	50
4.1.3. Fase de Validación	52
4.2. APLICACIÓN DEL MODELO HÍDRICO SWAT.....	55
4.2.1. Recopilación de información cartográfica base.....	55
4.2.2. Digitalización de la información cartográfica base	55
4.2.3. Edición de la cartografía digitalizada	57
4.2.4. Estructuración y sistematización de cartografía temática para el modelo.....	57

4.2.4.1. Uso de Suelo y Cobertura Vegetal.....	57
4.2.4.2. Suelos	58
4.2.4.3. Información climática.....	62
4.2.5. Ingreso de la información a la interfase SWAT	62

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE USO DE SUELO.....	72
5.2. DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HÍDRICO SWAT	79
5.2.1. Situación actual de la Subcuenca	80
5.2.2. Situación de la Subcuenca en 1956.....	89
5.2.3. Primer Escenario: Simulación de la Subcuenca sin cobertura vegetal.....	94
5.2.4. Segundo Escenario: Simulación de la Subcuenca con proyección aproximada de 45 años..	97
5.2.5. Tercer Escenario: Simulación de la Subcuenca con medidas de protección del páramo y reforestación en zonas erosionadas y en laderas de quebradas	99

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES REFERENTES A LAS METODOLOGÍAS	103
6.2. CONCLUSIONES REFERENTES A LOS RESULTADOS.....	105
6.3. RECOMENDACIONES REFERENTES A LAS METODOLOGÍAS	108
6.4. RECOMENDACIONES REFERENTES A LOS RESULTADOS.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	111

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 3:

Cuadro 3.1: SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	37
---	----

CAPÍTULO 4:

Cuadro 4.1: ZONIFICACIÓN DE LAS PARTES ALTA Y MEDIA DE LA SUBCUENCA	51
Cuadro 4.2: COORDENADAS DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS.....	62
Cuadro 4.3: VARIABLES INGRESADAS AL MODELO SWAT.....	65

CAPÍTULO 5:

Cuadro 5.1: SUPERFICIE DE LAS UNIDADES DE USO DE SUELO AÑOS 1956 Y 2000.....	72
Cuadro 5.2: SUPERFICIE Y TASAS DE CRECIMIENTO O DECRECIMIENTO PARA LOS AÑOS 1956 Y 2000.....	72
Cuadro 5.3: ÍNDICES DE PROTECCIÓN DEL USO DEL SUELO DEL AÑO 1956.....	75
Cuadro 5.4: ÍNDICES DE PROTECCIÓN DEL USO DEL SUELO DEL AÑO 2000.....	76
Cuadro 5.5: DATOS GENERADOS POR SWAT EN LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA	80
Cuadro 5.6: DATOS DE CAUDALES POR MESES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA	81
Cuadro 5.7: DATOS DE CAUDALES POR AÑOS PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA	83
Cuadro 5.8: SEDIMENTOS POR MESES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA	85
Cuadro 5.9: CUADRO DE APORTE DE SEDIMENTOS Y EROSIÓN ACTUAL (CIDIAT) ..	86
Cuadro 5.10: DATOS DE SEDIMENTOS DIARIOS MULTIANUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA.....	87
Cuadro 5.11: DATOS DE LAS VARIABLES UTILIZADAS POR SWAT PARA REALIZAR EL BALANCE HÍDRICO	88
Cuadro 5.12: BALANCE HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO	89
Cuadro 5.13: DATOS GENERADOS POR SWAT PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956.....	90
Cuadro 5.14: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000.....	90
Cuadro 5.15: DATOS DE AGUA INFILTRADA PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000.....	91
Cuadro 5.16: DATOS DE SEDIMENTOS PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000.....	92

Cuadro 5.17: CUADRO GENERAL COMPARATIVO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS POR SWAT EN LOS AÑOS 1956 Y 2000	93
Cuadro 5.18: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 1, Y LOS AÑOS 1956 Y 2000.....	94
Cuadro 5.19: DATOS DE AGUA INFILTRADA PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.....	95
Cuadro 5.20: DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.....	96
Cuadro 5.21: CUADRO COMPARATIVO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS POR SWAT EN DIFERENTES CONDICIONES DE USO DE SUELO.....	97
Cuadro 5.22: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000.....	97
Cuadro 5.23 DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000.....	98
Cuadro 5.24: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3, ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000	100
Cuadro 5.25: DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 3, ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2:

Gráfico 2.1: CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA.....	25
--	----

CAPÍTULO 3:

Gráfico 3.1: UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO.....	31
---	----

Gráfico 3.2: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	32
---	----

Gráfico 3.3: RED HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO	34
--	----

Gráfico 3.4: DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE LA ESTACIÓN IZOBAMBA	40
--	----

CAPÍTULO 4:

Gráfico 4.1: CARTAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN	48
---	----

Gráfico 4.2: FOTOGRAFÍAS AÉREAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO AÑO 1956.....	49
---	----

Gráfico 4.3: FOTOGRAFÍAS AÉREAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO AÑO 2000.....	50
---	----

Gráfico 4.4: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	54
--	----

Gráfico 4.5: VENTANA DE SETEO DE LA MESA DIGITALIZADORA.....	56
--	----

Gráfico 4.6: VENTANA DE INGRESO DE TOLERANCIA	56
---	----

Gráfico 4.7: ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	57
--	----

Gráfico 4.8: VENTANA DE INGRESO A BASES DE DATOS DEL SWAT	63
---	----

Gráfico 4.9: VENTANA DE EDICIÓN DE BASE DE DATOS DE SUELOS	63
--	----

Gráfico 4.10: VENTANA DE EDICIÓN DE BASE DE DATOS DE CLIMA	64
--	----

Gráfico 4.11: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA APLICACIÓN DEL SWAT.....	71
--	----

CAPÍTULO 5:

Gráfico 5.1: COMPARACIÓN DEL USO DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS	73
1956 Y 2000.....	73

Gráfico 5.2: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS Y CAUDALES REALES POR MESES.....	81
--	----

Gráfico 5.3: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS CALIBRADOS Y CAUDALES REALES POR MESES.....	82
---	----

Gráfico 5.4: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS CALIBRADOS Y CAUDALES REALES POR AÑOS.....	83
--	----

Gráfico 5.5: PROMEDIOS DIARIOS MULTIANUALES DE LAS PRECIPITACIONES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN IZOBAMBA.....	84
---	----

Gráfico 5.6: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS MENSUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA.....	85
---	----

Gráfico 5.7: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS DIARIOS MULTIANUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA.....	87
--	----

Gráfico 5.8: COMPARACIÓN DE CAUDALES MENSUALES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000	91
--	----

Gráfico 5.9: COMPARACIÓN DE INFILTRACIÓN POR MESES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000	92
Gráfico 5.10: COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS POR MESES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000	93
Gráfico 5.11: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.....	95
Gráfico 5.12: AGUA INFILTRADA PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.	95
Gráfico 5.13: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.....	96
Gráfico 5.14: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 2 Y PARA EL 2000.....	98
Gráfico 5.15: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL ESCENARIO 2 Y PARA EL 2000.	99
Gráfico 5.16: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3 Y PARA 2000.....	100
Gráfico 5.17: SEDIMENTOS MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3 Y PARA EL 2000	101

ÍNDICE DE MAPAS Y ANEXOS

MAPAS

Mapa 1: Mapa Base.....	114
Mapa 2: Mapa de Microcuencas.....	115
Mapa 3: Mapa de Suelos.....	116
Mapa 4: Mapa de Relieves.....	117
Mapa 5: Ubicación de Estaciones Climáticas.....	118
Mapa 6: Mapa de Áreas Protegidas.....	119
Mapa 7: Mapa de Pendientes.....	120
Mapa 8: Ubicación de Puntos de Muestreo.....	121
Mapa 9: Modelo Digital de Elevaciones.....	122
Mapa 10: Mapa de Uso del Suelo 1956.....	123
Mapa 11: Mapa de Uso Actual del Suelo.....	124
Mapa 12: Comparación de Páramos entre los años 1956 y 2000.....	125
Mapa 13: Mapa de Uso del Suelo Escenario 1.....	126
Mapa 14: Mapa de Uso del Suelo Escenario 2.....	127
Mapa 15: Mapa de Uso del Suelo Escenario 3.....	128

ANEXOS

Anexo 1: Resultados de los Análisis de Suelos.....	130
Anexo 2: Triángulo Textural para Conductividad Hidráulica.....	131
Anexo 3: Índices de Protección que caracterizan a las diferentes coberturas vegetales.....	132
Anexo 4: Siglas correspondientes a las corridas del modelo SWAT.....	133

GENERALIDADES

1.1. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue calcular el balance hídrico de la Subcuenca del Río San Pedro mediante la relación de entrada, almacenamiento y salida de agua en la Subcuenca, aplicando el Modelo de Simulación Hidrológica SWAT (Herramienta para la evaluación de suelo y agua), desarrollado por investigadores del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Además se evaluó el grado de erosión de los suelos a través de la simulación diaria de la producción de sedimentos.

Una de las ventajas del modelo es que permite ser calibrado. Los datos utilizados en este proceso consistieron en 10 años de información diaria de caudales (1990-2000), medidos en la estación hidrométrica San Pedro en Machachi del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI-.

La aplicación del modelo se llevó a cabo en diferentes escenarios de uso de suelo contruidos con la ayuda del análisis multitemporal, utilizando para el efecto fotografías aéreas de la zona de estudio correspondientes a los años 1956 y 2000.

Estos escenarios demostraron que la intensa actividad agrícola y ganadera de la zona de estudio, localizada íntegramente en la Provincia de Pichincha, en el cantón Mejía, ejerce una fuerte presión sobre los recursos naturales, lo que provoca una degradación de la cobertura vegetal, la disminución de la capacidad de los suelos de almacenar agua, el incremento de su proceso erosivo, y el arrastre de sólidos hacia los causes de agua.

1.2. ABSTRACT

The objective of this project was to calculate the water balance of the San Pedro Watershed through the relationship between water income, outcome and storage, using the SWAT Model (Soil and Water Assessment Tool), developed by researchers of the Agriculture Research Service Department from USDA. Surface runoff is also calculated through daily modeling of sediment production.

One of the advantages of the SWAT Model is that it allows validation. The data used for this purpose consist on a 10 year-series information of daily water flow (1990 to 2000) obtained by the National Meteorological and Hydrological Institute (INAMHI) in the “San Pedro en Machachi” Meteorological Station.

The model was run using different land use scenarios which were extracted from a multi temporal analysis that used 1956 and 2000 aerial photographs. Such scenarios showed that intense agricultural and livestock activities within the area (which is entirely circumscribed in the Mejía County, in the Pichincha Province) generate a high demand of natural resources, thus producing predation of natural vegetation, soil water storage capability reduction, and erosion process and surface runoff increase.

1.3. ANTECEDENTES

1.3.1. Creación del Consorcio para el Desarrollo Sostenible del Cantón Mejía – CODECAME

El Proyecto Manejo de Recursos Naturales - MANRECUR - de la Corporación Grupo Randi Randi, fue planificado con el objetivo de promover la gestión participativa y equitativa de cuencas andinas a través de la investigación socioambiental a múltiples escalas, y el aprendizaje social colectivo de múltiples actores y actoras. Desde el inicio, sus intereses se enfocaron en la realización de trabajos de investigación y desarrollo en la Subcuenca del Río El Ángel, provincia del Carchi. Por esta razón, en el año de 1992, junto con el apoyo

de investigadores externos, y bajo los lineamientos del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina - CONDESAN -, crearon el Consorcio Carchi como una mesa de concertación, es decir, un espacio de intercambio y negociación entre un equipo multidisciplinario formado por organizaciones públicas y privadas, e instituciones nacionales e internacionales con intereses y acciones en la Subcuenca del Río El Ángel y su área de influencia. Junto con numerosas comunidades locales, los miembros del Consorcio trabajan en forma libre, independiente y coordinada desde sus capacidades y competencias, para conseguir el manejo sustentable de la región y un desarrollo duradero para sus habitantes.

Luego de 10 años de esfuerzos, constancia, logros y experiencias, el Grupo Randi Randi se plantea el reto de replicar el trabajo en otras dos Subcuencas Andinas: en la Subcuenca del Río La Chimba en el cantón Cayambe, y en la Subcuenca del Río San Pedro en el cantón Mejía.

De esta manera, el 17 de Agosto del 2002, en las instalaciones del Municipio de Mejía, un grupo de hombres y mujeres preocupados por el futuro del Cantón, formaron el Consorcio para el Desarrollo Sostenible del Cantón Mejía, como una organización sin fines políticos partidistas, religiosos o étnicos, que se enmarca dentro de la Constitución y varias leyes que permiten la participación ciudadana dentro de los gobiernos locales; sus máximos objetivos son apoyar al Municipio y a la población para ejecutar acciones inmediatas encaminadas a solucionar problemas, especialmente de carácter social y ambiental; y, promover la investigación dentro de la Subcuenca del Río San Pedro.

La Corporación Grupo Randi Randi ha implementado un sistema de becas, otorgadas a estudiantes de Pregrado, cuyos proyectos de Tesis se realicen en alguna de las tres Subcuencas de trabajo. El presente estudio, está incluido dentro de los 10 proyectos de investigación que actualmente se están desarrollando en la Subcuenca del Río San Pedro, y

que cubren temas relacionados a sistemas productivos, agua, suelo, páramos y desechos sólidos.

1.3.2. La importancia de los páramos en una Cuenca Hidrográfica

Se define a una cuenca hidrográfica como una unidad espacial de límites geográficos naturales, en donde todas las aguas captadas alimentan el mismo sistema hídrico. Sin embargo hay que reconocer que además de las delimitaciones hidrográficas, una cuenca se define también desde los procesos de construcción social y cultural de los territorios. De esta manera se puede decir que en una cuenca existen estrechas relaciones entre los páramos ubicados dentro de las zonas más altas, los cauces de agua como ríos, quebradas y acequias, y diversos usuarios generalmente en diferentes situaciones de inequidad de poder.

En el Ecuador los sistemas de clasificación ecológica que se han aplicado para las formaciones vegetales son los de Acosta Solís en 1966, el del Doctor Gunnar Harling en 1979 y el de Cañadas en 1983. La clasificación ecológica de Cañadas (1983) es una aplicación de la clasificación de Holdridge para nuestro país, en la cual se identificaron 25 de las 37 zonas de vida posibles en este sistema, y ha servido como base para levantar el Mapa Ecológico del Ecuador.

Los páramos están incluidos en todas las clasificaciones ecológicas aplicadas en nuestro país, como una zona de vida de alta importancia en aspectos biológicos, hidrológicos, económicos y culturales. Su vegetación se caracteriza por el dominio de varias formas de vida siendo las más notables: a.- roseta gigante (ej: frailejón); b.- penacho (ej: paja); c.- roseta sin tallo (ej: achicoria); d.- almohadilla (ej: Azorella pedunculata); e.- arbusto (ej: chuquiragua).¹ El páramo es un ecosistema con alto valor faunístico por ser el hábitat

¹ Mena Patricio, Medina Galo. Los Páramos del Ecuador. La Biodiversidad de los Páramos en el Ecuador. Proyecto Páramo 2001. Página 31.

de muchas especies silvestres, de numerosas especies endémicas y de varias especies de aves y de mamíferos que están consideradas en peligro de extinción.

La importancia de los páramos en términos hidrológicos debe ser reconocida, entendida, difundida y valorada. La satisfacción de necesidades básicas, el desarrollo de actividades de sobrevivencia y el mejoramiento de la calidad de vida de los ecuatorianos dependen directa o indirectamente del agua de los páramos y de su capacidad de regulación de caudales. “Se puede considerar que el páramo es el ecosistema más sofisticado para el almacenamiento de agua debido principalmente a la gran acumulación de materia orgánica (que aumenta los espacios para el almacenamiento de agua) y a la morfología de ciertas plantas de páramo (que actúan como una verdadera esponja)”.² Esta función hidrológica que cumplen los páramos determina su valor económico por ser fuente de agua para consumo y riego para la mayoría de localidades y asentamientos que se encuentran en las faldas de los Andes.

La ubicación geográfica de los páramos y sus características climáticas, los han convertido en ecosistemas frágiles que requieren ser protegidos y manejados adecuadamente para garantizar su integridad.

1.3.3. La deforestación y la degradación de los páramos y bosques

De todos los ecosistemas existentes en el mundo, los bosques se encuentran entre los más valiosos e importantes debido a que albergan al sesenta por ciento, aproximadamente, de la biodiversidad del planeta. Además de sus funciones ecológicas, entre ellas, la protección del suelo y de las cuencas hidrográficas, se pueden mencionar otros aportes como brindar sustento y bienestar al hombre a través de plantas comestibles y medicinales, animales silvestres, refugio, fuentes de energía, entre otros productos;

² Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador, Medina Galo. Serie Páramo. El Páramo como Fuente de Recursos Hídricos. Volumen 3. Diciembre de 1999. Página 3.

muchos pueblos han evolucionado al amparo de los bosques y en torno a ellos han erigido sus valores culturales y espirituales.

A nivel mundial los bosques desempeñan un papel imprescindible en la regulación del clima por ser uno de los principales sumideros de carbono del planeta. Su existencia condiciona el avance del efecto invernadero y sus consecuencias. El Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (GIECC) señala que una hectárea de plantación arbórea sana puede absorber alrededor de 10 toneladas anuales de carbono, dependiendo de las condiciones del lugar.³

De acuerdo a los informes de la FAO, el principal órgano responsable de los bosques dentro del Sistema de las Naciones Unidas, las tasas de deforestación de los años 1995 – 2001 son menores a las tasas registradas entre 1990 y 1995, período en el cual la pérdida neta de superficie de bosque en todo el mundo había sido de 56.3 millones de hectáreas.⁴ Pero a pesar de la disminución en los índices éstos todavía se mantienen altos y la deforestación sigue siendo una amenaza para el equilibrio ecológico global.

En el Ecuador, las cifras de deforestación publicadas varían dentro de un amplio rango, y van desde las 34000 has/año hasta 400000 has/año en el mejor y peor de los casos respectivamente. Estos índices tienden a variar por la ambigüedad que existe en torno a la definición del bosque.

Pero a pesar de la gran importancia que tienen los bosques y los páramos, pocas veces se tiene en cuenta la necesidad de conservarlos y protegerlos. Para corroborar esta afirmación se puede mencionar como ejemplo la sustitución que han sufrido valiosos ecosistemas de bosques primarios por plantaciones de especies exóticas, en muchos casos de eucalipto o pino, o por bosques biológicamente pobres. La principal causa de la

³ Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (GIECC) para el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 22 de enero de 2001

⁴ Informe de Avance sobre Programa 21 de la FAO para la Sesión Especial de la Asamblea General de la ONU. Capítulo 11: Lucha contra la Deforestación. 1997

deforestación, ha sido el aprovechamiento de la fertilidad del suelo mediante la conversión de bosques a productivas tierras de labradío y crianza de ganado. Estas actividades se aceleraron en los siglos XVIII y XIX generando capitales que contribuyeron al desarrollo del país; en aquel entonces no existía el actual conocimiento sobre el funcionamiento de estos ecosistemas y su notable influencia en el ambiente total del planeta.

Otras actividades humanas que causan directamente deforestación son: la urbanización y la construcción de infraestructura, la minería y la explotación de petróleo, y los incendios.

La deforestación y la degradación de bosques y páramos reducen notablemente la capacidad que poseen los suelos para retener los nutrientes además de producir su erosión, fomentando de esta manera inundaciones y procesos de sequías por la desestabilización de las capas freáticas del suelo. La consecuencia final de estos procesos es la reducción o la pérdida total de la biodiversidad y su capacidad de albergar hábitats, especies y variabilidad genética.

1.3.4. Modelo Hídrico SWAT

El S.W.A.T. (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Universidad de Texas y, entre otras cosas, permite predecir el impacto del manejo del suelo en la generación de sedimentos y la regulación del agua en cuencas hidrográficas. El SWAT es una interfase que trabaja sobre la plataforma del software ArcView 3.2, y su objetivo es organizar datos geográficos para generar archivos de entrada y analizar información resultante a partir de simulaciones hídricas.

El SWAT trabaja con Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) las cuales son el cruce de los diferentes tipos de suelo con las diferentes coberturas o usos de suelo, y a cada una de estas combinaciones les atribuye un número para diferenciarlas de las demás. El

nombre de URH se debe a que el comportamiento del agua en el suelo depende de estos dos factores.⁵

En el Ecuador se han realizado pocos estudios de cuencas hidrográficas utilizando el modelo SWAT. Quizá uno de los más importantes es el trabajo realizado en la subcuenca del Río El Ángel por el Consorcio Carchi con el auspicio del Proyecto Manrecur de la Corporación Grupo Randi Randi. Este trabajo ha sido desarrollado a lo largo de diez años por un equipo multidisciplinario de organizaciones públicas y privadas cuyo interés común es el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de esta subcuenca mediante la aplicación de mecanismos de acción para el adecuado uso del agua del Río El Ángel.

El modelo Swat ha sido aplicado por la Universidad Técnica Particular de Loja en el proyecto para la Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Catamayo. El estudio generó claros resultados dentro del diagnóstico de esta importante cuenca hidrográfica, y permitió plantear una nueva cobertura según el uso potencial del suelo, que permita disminuir la producción de sedimentos sin afectar la disponibilidad de agua.

También se puede mencionar el estudio de generación de sedimentos y procesos de erosión realizado en la Cuenca del Río Paute, con resultados satisfactorios referentes a la utilización de este software.

1.4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El cantón Mejía, productivo por excelencia, tiene como cabecera a la ciudad de Machachi y su situación actual se describe a continuación:

- ◆ En varios sectores de la zona en estudio existe un inadecuado uso del suelo, resultado de la intensa actividad agropecuaria que provoca un incesante avance de la frontera

⁵ Tutorial del Software Swat. Bases Teóricas. Página 1

agrícola y la deforestación de los bosques andinos; por tanto, una gran parte del suelo se encuentra ocupado por pastos como producto de la colonización, cultivos de cereales, y cultivos de hortalizas.

- ◊ El decrecimiento de la cobertura vegetal disminuye el caudal de agua disponible en las vertientes de la Subcuenca, debido a que la destrucción de los páramos altera las características del suelo de infiltrar y almacenar agua, por lo tanto la población cada vez tiene mayores problema de escasez de agua para riego y consumo humano.
- ◊ La vegetación de páramo existente en la subcuenca, requiere medidas de protección y conservación debido a la presencia de actividades de pastoreo, quema de pajonales y el avance de la frontera agrícola, especialmente en áreas de pendientes fuertes.
- ◊ En la subcuenca se encuentran bosques que pertenecen a la clasificación de matorral húmedo, bosque montano y montano alto. Existen remanentes de vegetación nativa que pueden servir de base para proyectos de restauración ecológica; se evidencia también la existencia de bosques formados por especies exóticas, especialmente de eucalipto y de pino, que a pesar de cumplir con objetivos de producción de madera como alternativas de ingreso para las comunidades locales, empresas madereras, etc., han causado impactos en el ecosistema al alterar las condiciones naturales, la biodiversidad, la suplantación de cobertura natural, etc.
- ◊ La presencia de éstas áreas de vegetación nativa, arbustiva y plantada, y el intenso incremento de actividades antrópicas hicieron necesaria la declaratoria de cuatro áreas protegidas y dos bosques protectores en la subcuenca del Río San Pedro. Las áreas protegidas existentes en esta área son: Reserva Ecológica Los Illinizas, Parque Nacional Cotopaxi, Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Área Nacional de Recreación El Boliche.

- ◊ Es evidente en la Subcuenca media del río la proliferación de construcciones y expansión urbana, causando fuertes impactos a la vegetación de las riberas, sin previsión del control de erosión, de los efluentes de las fábricas y de la contaminación por basura.
- ◊ Parte de la problemática, ha constituido la ley de Reforma Agraria y Colonización y la creciente apertura de carreteras por parte del Estado y de las empresas madereras. Estos factores llevan consigo nuevos frentes de expansión agrícola con fines de apropiación de nuevas tierras e incorporación de su producción a la demanda de mercados locales, nacionales e internacionales.
- ◊ No existen datos sobre las tasas de deforestación de los páramos, no se cuenta con información cartográfica ni temática a escalas adecuadas a la Subcuenca, no se han realizado análisis multitemporales para determinar las tendencias de expansión urbana, ni se han ejecutado proyectos de manejo de recursos naturales a nivel de la Subcuenca del Río San Pedro.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El siguiente estudio ha sido planteado tomando en cuenta que la Subcuenca del Río San Pedro se caracteriza por ser una zona preferentemente agrícola y ganadera, y que éstas actividades provocan la deforestación y la destrucción de los páramos, causando un fuerte impacto en el almacenamiento de agua y acelerando los procesos erosivos de los suelos de la Subcuenca. Además se ha considerado que resulta muy necesario contar con información cartográfica, temática y climática como una línea base para la ejecución de futuros proyectos sociales, ambientales, productivos y económicos, que en conjunto lleven a un manejo integral de la Subcuenca. También se ha valorado la importancia de la protección de los páramos para asegurar a la población la disponibilidad de agua tanto para riego como para consumo humano.

Por estas razones he querido aplicar la utilidad de las herramientas geográficas existentes, como las imágenes satelitales, las fotografías aéreas y los Sistemas de Información Geográficos, para realizar esta investigación y establecer un diagnóstico de la producción de agua y sedimentos en la Subcuenca del Río San Pedro. Dentro de la metodología se incluye, en primer lugar, un estudio multitemporal del uso del suelo para determinar tasas de deforestación en un período de tiempo de 44 años, con la finalidad de conocer las tendencias del avance de la frontera agrícola. En segundo lugar, se incluye la aplicación de un modelo para calcular el balance hídrico de la Subcuenca, y para generar simulaciones que involucren el comportamiento del agua con respecto al uso que se da al suelo. Este trabajo pretende ser una base para futuras investigaciones a llevarse a cabo en la Subcuenca por los miembros del Consorcio para el Desarrollo Sostenible del Cantón Mejía -CODECAME- con el auspicio del proyecto MANRECUR III de la Corporación Grupo Randi Randi.

1.6. OBJETIVOS

General:

Aplicar un modelo de simulación hídrica en la Subcuenca alta y media del Río San Pedro para determinar el impacto que tiene la disminución del manejo del suelo, la deforestación y la destrucción del Páramo sobre la producción de caudales y sedimentos, y sobre el almacenamiento de agua, con el soporte de un sistema de información geográfica (SIG) y sensores remotos.

Específicos:

- Calcular el balance hídrico de la Subcuenca hidrográfica para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la Subcuenca.

- Realizar un análisis multitemporal de la zona para calcular las tasas de deforestación, y las tendencias del avance de la frontera agrícola, con el apoyo de fotografías aéreas.
- Hacer simulaciones de la producción de caudales y sedimentos en las dos fechas en las que se realice el análisis multitemporal.
- Hacer simulaciones de la producción de caudales y sedimentos en escenarios futuros obtenidos mediante proyecciones derivadas del estudio multitemporal.

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ocupan un lugar prominente entre las herramientas computacionales que, a través del análisis de información espacial, constituyen un apoyo invaluable en la toma de decisiones. Estos modelos matemáticos permiten representar, visualizar y analizar adecuadamente algunos problemas que se presentan dentro de los procesos físicos que ocurren en la naturaleza.

En una cuenca hidrográfica, el empleo de un SIG puede resultar sumamente ventajoso para llevar a cabo estudios de erosión, creando escenarios presentes y/o futuros, que simulen la respuesta hidrológica de la cuenca ante un cambio en el uso del suelo, o de otra variable. Pero además del empleo de este tipo de programas, se pueden aplicar técnicas que ayudarán a calcular, confirmar o aclarar los resultados arrojados por el software.

Para esta investigación se realizó un análisis multitemporal para determinar los cambios en el uso del suelo y las tendencias del avance de la frontera agrícola. Este análisis constituye un importante aporte para interpretar los resultados de la aplicación del modelo de simulaciones hidrológicas SWAT en el cálculo del balance hídrico de la Subcuenca del Río San Pedro.

2.2. BASES CONCEPTUALES DE UN ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Un análisis multitemporal es una técnica que se basa en la comparación de dos o más fotografías aéreas o imágenes satelitales de distinta fecha, para determinar las diferencias que existen en ellas, de acuerdo a un determinado caso de estudio. Por ejemplo, en el presente estudio, sirvió para analizar patrones de expansión urbana, las dinámicas de intervención de cobertura vegetal, tendencias de avance de la frontera agrícola y decrecimiento de los páramos, reducción en la extensión de glaciares, entre otros.

En el caso de las imágenes de satélite, existen diversos métodos para tratarlas, a fin de garantizar su comparabilidad. Las principales correcciones que se aplican a las imágenes, utilizando Sistemas de Información Geográficos, son los filtros, realces de color, clasificación de imágenes, homogeneización radiométrica, entre otras, y su aplicación permite conseguir resultados más precisos.

Dentro de este estudio, el análisis multitemporal representa un importante apoyo en la determinación del impacto de la deforestación en la producción de agua, mediante el cálculo de hectáreas deforestadas, y las tendencias de expansión de la frontera agrícola y los centros urbanos hacia los páramos. Pero considerando que no representa el objetivo principal de la investigación, y que además no se disponía de suficientes recursos económicos para adquirir imágenes satelitales, esta metodología ha sido efectuada utilizando fotografías aéreas de los años 1956 y 2000, cuya interpretación brindó claros resultados de los cambios de uso de suelo en las dos fechas.

2.3. BASES CONCEPTUALES DEL MODELO HÍDRICO SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)⁶ es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas; su obtención es gratuita y se encuentra disponible en Internet en la dirección Web: <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>. La versión 99.2 es una interfase con ArcView 3.x, y se instala como una extensión de este SIG, lo que hace más sencillo su manejo y utilización.

El principal objetivo del modelo es predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos en una cuenca hidrográfica. Entre otras cosas, también permite calcular la calidad del agua por el efecto de las prácticas agronómicas de los cultivos como la utilización de herbicidas y fertilizantes.

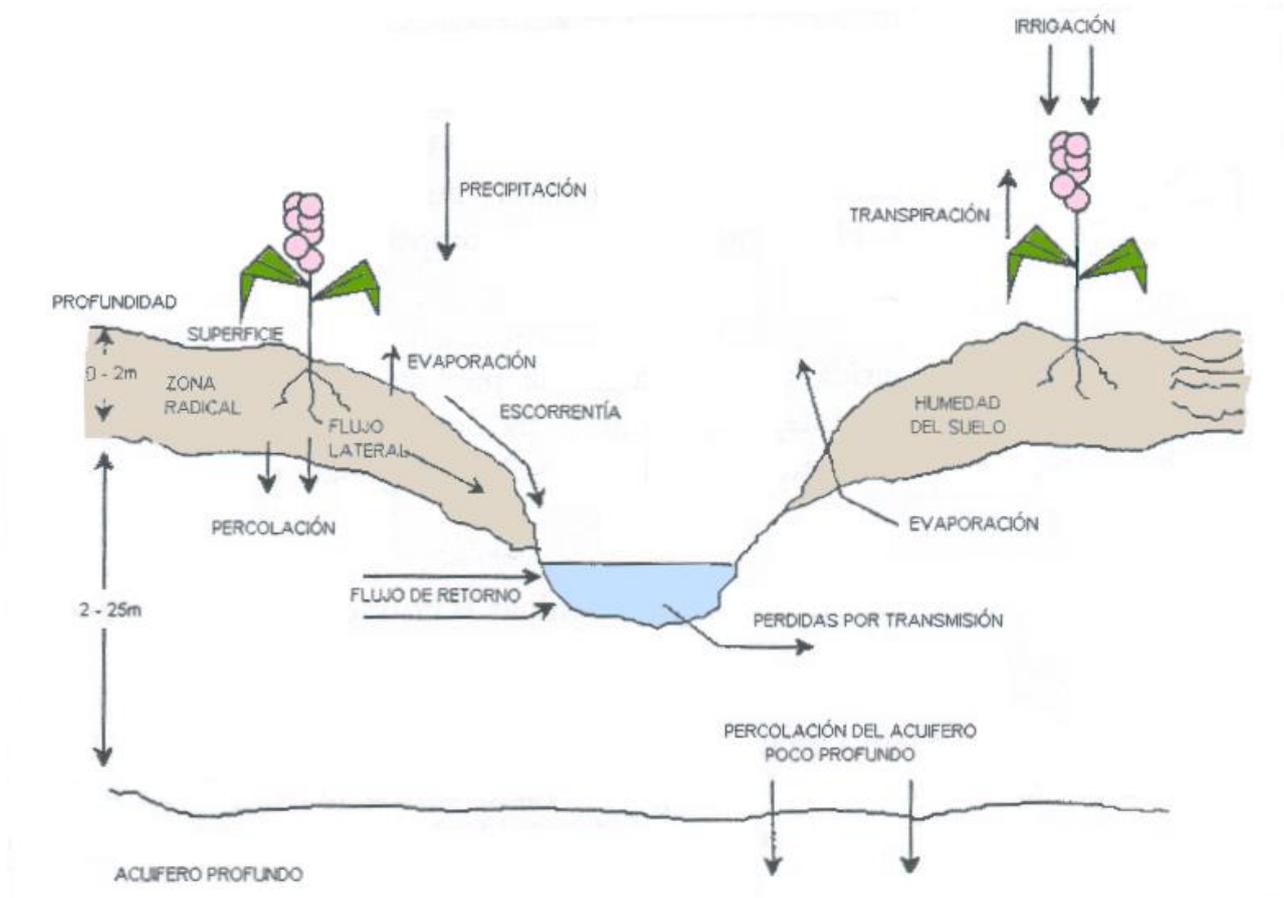
Para realizar los análisis de las cuencas hidrográficas, el modelo divide el espacio geográfico de estudio seleccionado en pequeñas microcuencas, de manera que los cálculos que se realicen tengan la mayor exactitud posible. Además, trabaja con el cruce de 2 coberturas temáticas: uso del suelo y cobertura vegetal y el tipo de suelo dando como resultado las denominadas UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA - HRU debido a que el comportamiento del agua en el suelo depende de estos dos factores.

El Swat tiene sus bases en los conceptos de Balance Hídrico, es decir determina la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca hidrográfica. El movimiento del agua en la cuenca se ilustra en el gráfico 2.1.

El agua entra en la cuenca a través de la precipitación e irrigación, la cual al llegar al suelo forma los flujos de infiltración y escorrentía. La escorrentía es el agua que fluye más rápido hasta los drenajes de la cuenca, mientras que la infiltración es la vía por la cual se recargan los acuíferos, aunque también existen flujos subterráneos que son más lentos y descargan en los canales de drenaje.

⁶ Traducción: "Herramienta de Evaluación para el Suelo y Agua"

Gráfico 2.1: CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA



Un balance hídrico es el cálculo de la relación que existe entre las ganancias y pérdidas de agua sufridas por el suelo, en un determinado período de tiempo. El modelo Swat realiza esta evaluación mediante la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t = el contenido de agua en el suelo en el día t

SW = el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15-bar⁷

t = es el tiempo en días

R = la precipitación diaria

⁷ Contenido de agua del suelo a una tensión o potencial mátrico del agua de 15 bares.

Q = la cantidad de escorrentía diaria

ET = la evapotranspiración diaria

P = la percolación diaria

QR = el flujo de retorno o flujo base

Escorrentía o escurrimiento superficial: El escurrimiento superficial o escorrentía es la porción de la lluvia que fluye sobre el suelo en zonas de ladera o de pendiente. La escorrentía se origina de dos formas: por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse) fluye por la superficie pendiente abajo, por el camino de menor resistencia; o por las lluvias de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua de exceso (Morgan 1986). Estos flujos superficiales transportan hasta los canales de drenaje, naturales o no, los sedimentos que han sido desprendidos por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo y los que este flujo puede desprender de la capa superficial del suelo.

Infiltración: El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua también llegará hasta los canales de drenaje (flujos de retorno) y recargar acuíferos profundos. En todo caso es importante recordar que el agua se mantiene en un continuo ciclo y aunque el agua se encuentre en acuíferos profundos, esta puede ser parte nuevamente de la precipitación.

Flujo lateral: El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos.

Percolación: El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual Swat considera entre 0 y 2m. Esta agua de percolación puede llegar

hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m. El componente percolación del Swat usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez el agua es percolada al acuífero profundo, ésta no puede alimentar el escurrimiento.

Flujo de retorno: Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las agua subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación.

Evapotranspiración: La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. El modelo Swat ofrece algunos métodos para estimar la Evapotranspiración potencial, el modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) es el que se recomienda para zonas con cobertura vegetal típica de montaña como los bosques de ceja andina y vegetación de páramo, por esta razón ha sido empleado en el presente estudio.

Variables Climáticas: Las variables climáticas para el Swat son precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diaria del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Esta información debe provenir de una o más estaciones meteorológicas ubicadas dentro o muy cerca de la zona de estudio, y debe ser una serie de datos de un período de tiempo de por lo menos 10 años consecutivos.

Si la precipitación y la temperatura diaria son disponibles, pueden entonces ser ingresadas directamente al modelo. Si no, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y la precipitación diaria. Un juego de variables climáticas puede ser simulado para toda la cuenca o para cada una de las microcuencas y/o unidades de respuesta hidrológica. Sin embargo esta opción no es recomendada para Ecuador considerando que el modelo fue desarrollado en Estados Unidos y las simulaciones no se ajustan completamente a las condiciones de nuestro país.

Sedimentación: Los sólidos perdidos o sedimentos es el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de agua lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depositados en el cauce de estos canales.

2.3.1. Estimación de producción de caudales y sedimentos

Para estimar la producción de caudales y sedimentos fruto del impacto de las prácticas de manejo de aguas y suelos en los páramos de la Subcuenca del río San Pedro, se realizó un análisis de tipos de suelos, cobertura vegetal y usos de la tierra de las microcuencas más representativas ubicadas dentro de la zona de estudio.

Uno de los componentes del modelo Swat corresponde a la simulación de todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico, lo cual permite realizar un balance hídrico en toda la cuenca; este ciclo controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen a través de las microcuencas hacia las redes de drenaje.

Para poder definir el número de microcuencas que conforman la Subcuenca del Río San Pedro, se tomaron en cuenta las siguientes variables: vegetación predominante y uso actual de la tierra, tipo de suelos, precipitación y temperatura diaria.

El modelo Swat permite ser calibrado; para esto es necesario conocer las condiciones actuales de la subcuenca. Es ideal contar con datos medidos en una estación dentro de la zona de estudio para comparar los datos observados con los datos simulados y garantizar que se asemejen en la mayor medida posible. En el proceso de calibración, Swat ofrece primero la opción de que el usuario ajuste los valores de las curvas que contienen los índices de crecimiento de las diferentes coberturas vegetales; si este parámetro no satisface el objetivo de ajuste, se proceden a calibrar los valores de capacidad de almacenamiento de agua y el factor de evaporación de las diferentes coberturas. En caso de que los datos de caudales simulados no coincidan en valor con los datos reales, pero las curvas graficadas a

partir de estos datos tengan mucha semejanza (respecto a las tendencias) entre sí, se procede a calibrar la variable que contiene el tiempo que tarda el ciclo hidrológico, es decir el número de días que se demora el agua que ingresa en la cuenca a partir de la precipitación, hasta su salida por medio de un cause.

Para la calibración del modelo en el presente caso de estudio han sido necesarios los datos de caudales diarios medidos en la estación Hidrométrica San Pedro en Machachi por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI.

Después de la calibración de los volúmenes de agua se pasa a la segunda fase de este proceso que consiste en calibrar la producción de sedimentos en toda la cuenca, pero en el caso de nuestro estudio no se pudo realizar debido a la falta de datos.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA DE LA SUBCUENCA

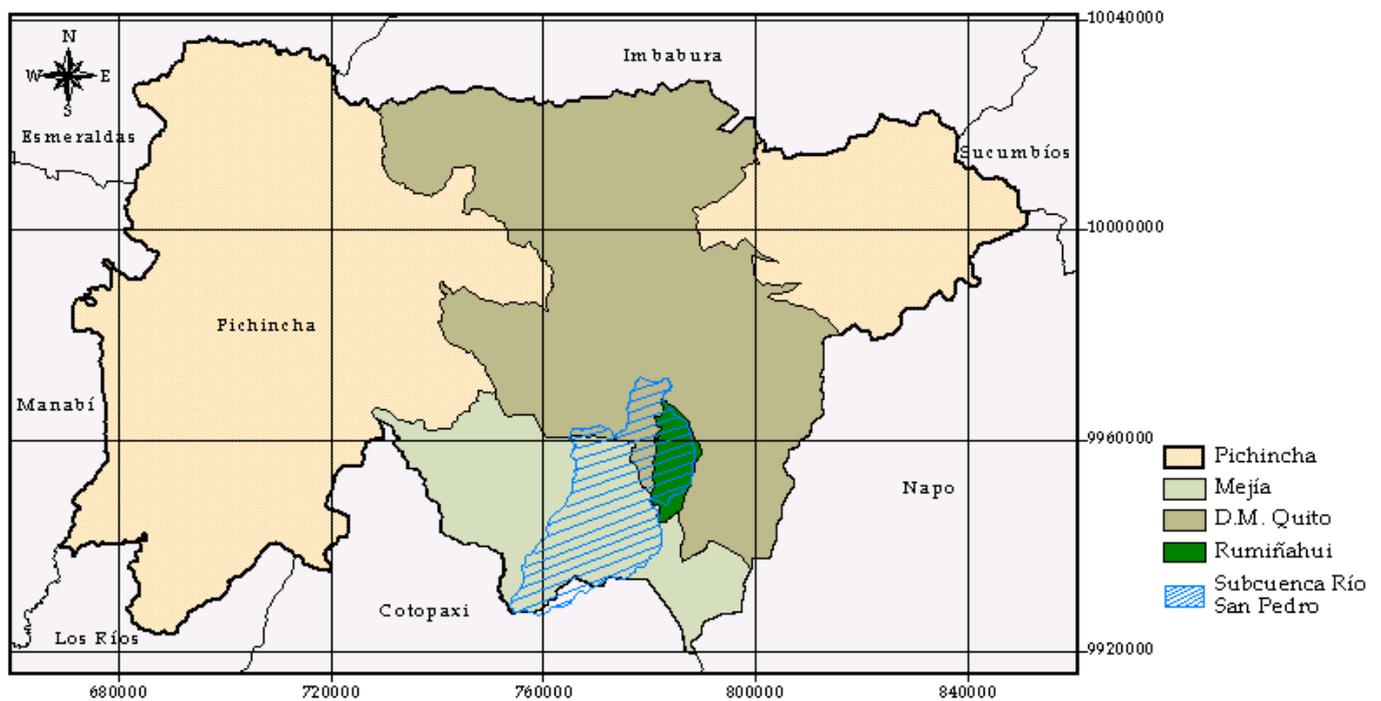
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

De los deshielos de los montes Illinizas, en las estribaciones orientales de la Cordillera Occidental, nace el Río San Pedro. Atraviesa el valle de Machachi, pasando por la población del Chaupi, llega al Valle de los Chillos donde cerca de Sangolquí recibe pequeños afluentes y poco antes de Conocoto se junta con las aguas del río Capelo.

La Subcuenca del río San Pedro casi en su totalidad, está localizada en la Provincia de Pichincha, dentro de los cantones Mejía, Rumiñahui y Quito. Su superficie es de aproximadamente 76433 has, y su principal afluente es el río Pita, que nace al sureste del volcán Cotopaxi, y con el cual confluye en el sector sur este del cerro Ilaló, para dar origen al río Guayllabamba. Esta confluencia determina que los dos ríos formen una sola Subcuenca; sin embargo, con la finalidad de ajustarse a los objetivos planteados en este estudio, se ha considerado al río San Pedro como una Subcuenca independiente, y está comprendida desde su nacimiento en las elevaciones: Illinizas, Rumiñahui, Corazón y Pasochoa, hasta el Reservorio de Guangopolo, muy cercano a la desembocadura del río San Pedro en el río Guayllabamba.

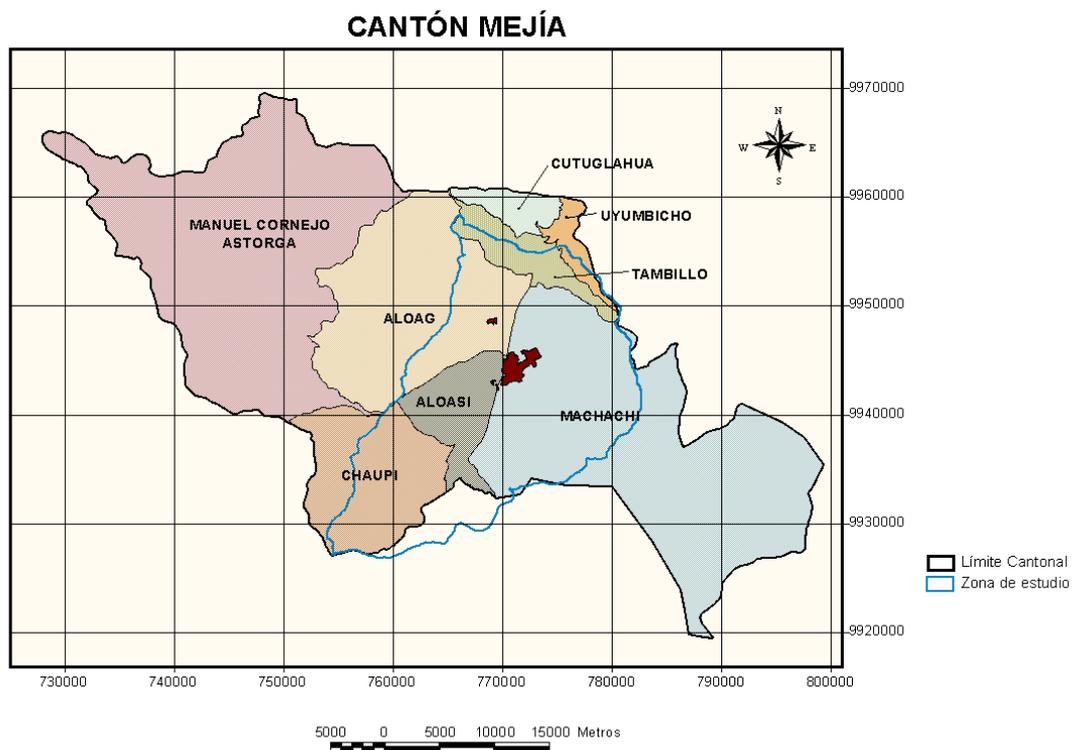
La localización de la Subcuenca del Río San Pedro dentro de la división política de la provincia de Pichincha puede apreciarse en el gráfico 3.1.

Gráfico 3.1: UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO



Para el presente estudio se seleccionaron como áreas de análisis solamente las partes alta y media de la Subcuenca por diferentes razones: en primer lugar la zona alta es la que contiene la franja de páramos que es donde el agua se almacena garantizando la existencia del recurso en épocas secas; la zona media se caracteriza por la intensa actividad agropecuaria de los pobladores que representa una amenaza a la permanencia de la cobertura vegetal, por esto es en estas zonas conflictivas en donde deben tomarse medidas de protección y/o conservación a fin de asegurar agua de calidad y en cantidad óptima para los habitantes. De esta manera las áreas seleccionadas dentro de la Subcuenca del Río San Pedro para esta investigación están comprendidas exclusivamente dentro del Cantón Mejía. La zona elegida (Gráfico3.2) tiene una superficie aproximada de 49056 has. Las parroquias ubicadas dentro del área de estudio son: la parroquia urbana de Machachi, y las parroquias rurales Aloasí, Chaupi, Alóag, Tambillo y Uyumbicho.

Gráfico 3.2: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Geográficamente la zona de estudio está enmarcada dentro de las siguientes coordenadas:

Coordenadas Geográficas:

Latitud	0°35' a 0°10' Sur
Longitud	78°25' a 78°35' Oeste

De acuerdo a la proyección Universal Transversa de Mercator, está localizada en la zona 17, y sus correspondientes coordenadas son:

Coordenadas UTM:

Nor-este	753977.26	99583660.51
Sur-oeste	782702.18	9926748.68

3.2. HIDROGRAFÍA (Ver Mapa 2: Mapa de Microcuencas de la Subcuenca del Río San Pedro)



río Pita, y al oeste por la cuenca del río Napo.

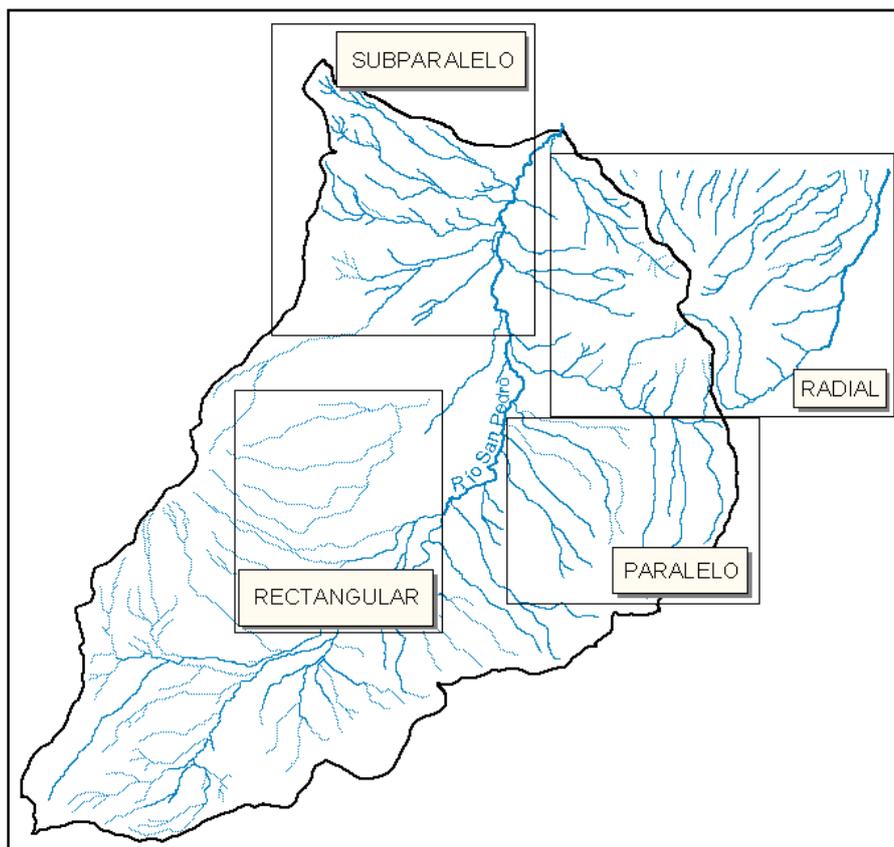
La Subcuenca tiene un drenaje que corre en dirección de sur a norte. De esta manera, se encuentra delimitada al sur por la Cuenca del río Pastaza, al norte las microcuencas de los ríos Machángara y Chiche, al este por la microcuenca del

Los sistemas hídricos de la Subcuenca son elementos determinantes para su desarrollo, debido que a lo largo de los años hasta la época actual, han sido aprovechados por los habitantes tanto para la actividad agrícola y ganadera, como para su consumo. Además sus aguas son captadas y utilizadas para abastecimiento de agua potable y generación de energía eléctrica para la ciudad de Quito.

Los principales drenajes que conforman el área de la Subcuenca del río San Pedro son, entre otros, el río Blanco que luego recibe el nombre de Jambelí, y el río Pedregal. Además la red hidrográfica está compuesta por varias quebradas que son alimentadas por los deshielos y vertientes de los volcanes Illinizas, Rumiñahui, Corazón, Atacazo, y Pasochoa. La longitud del cauce principal es aproximadamente de 43 kilómetros, desde las quebradas que originan su nacimiento en el Illiniza Sur, hasta el límite de las zonas Media y Baja.

En la Subcuenca se pueden diferenciar patrones de drenaje rectangulares determinados por la presencia de fallas geológicas, patrones de drenaje paralelos presentes en zonas con pendientes fuertes, patrones subparalelos que también indican pendientes escarpadas en regiones de alto relieve y patrones radiales centrífugos que se caracterizan porque las corrientes fluyen radialmente desde conos volcánicos y otro tipo de cumbres. Estos patrones de drenaje pueden apreciarse en el Gráfico 3.3.

Gráfico 3.3: RED HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO



3.3. SUELOS⁸ (Ver Mapa 3: Mapa de Suelos de la Subcuenca del Río San Pedro)

Los Mapas de Suelos del Ecuador, elaborados en 1984 por el Proyecto MAG-ORSTOM a escala 1:50000, se realizaron siguiendo el Sistema Norteamericano SOIL TAXONOMY. Este sistema se basa primordialmente en la morfología de los suelos, descrita en términos de sus horizontes. Este sistema utiliza cuatro categorías de clasificación, cada una de las cuales tiene sus propias características diferenciadoras. Las categorías desde el nivel más alto, es decir más general, hasta el más bajo o específico son:

ORDEN: permite agrupar los suelos de acuerdo a los procesos de formación indicados por la presencia o ausencia de horizontes diagnóstico.

⁸ González Augusto, Maldonado Fausto, Mejía Luis; Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Memoria Explicativa del Mapa General de Suelos del Ecuador. 1986. Quito-Ecuador.

SUBORDEN: indica una homogeneidad genética; es una subdivisión de los órdenes de acuerdo a la presencia o ausencia de propiedades asociadas con la humedad del suelo, material de partida dominante y efectos de la vegetación.

GRAN GRUPO: subdivisiones de los subórdenes de acuerdo con la clase y disposición de los horizontes, temperatura y humedad del suelo; además presencia o ausencia de capas diagnósticas.

SERIE: son los suelos de cada subgrupo diferenciados por la clase y disposición de los horizontes, color, textura, consistencia o reacción de los horizontes, sus propiedades químicas y mineralógicas.

El sistema utiliza para definir las series normalmente una combinación de dos letras, por ejemplo Db, Mn, etc. Existen algunos suelos cuya serie se ha definido con tres letras, por ejemplo JHa. En ocasiones se añade una tercera adicional que puede ser x, y ó z, que indican un determinado porcentaje de grabas en el suelo.

De acuerdo a este sistema, en la Subcuenca del Río San Pedro se encuentran 27 clases de suelos, que pertenecen a dos órdenes: a) Inceptisoles, y b) Mollisoles.

Los suelos inceptisoles evidencian un incipiente desarrollo, dando lugar a la formación de algunos horizontes alterados; ocurren en cualquier tipo de clima y se han originado a partir de diferentes materiales parentales (materiales resistentes o cenizas volcánicas), en condiciones de relieve extremo, fuertes pendientes o depresiones abruptas.

Los suelos mollisoles son en su mayoría de color negro, ricos en bases y materiales orgánicos, por lo que normalmente se localizan en áreas de pradera y bajo cultivos.

Todos los suelos inceptisoles de la Subcuenca, pertenecen al suborden Andepts, y dentro de éstos se pueden encontrar los siguientes grandes grupos: Cryandepts, Dystrandepts, Eutrandepts y Vitrandepts.

En los Mollisoles, sólo existen suelos del suborden Udolls y del gran grupo de los Argiudolls.

A continuación se describen los suelos de la Subcuenca del Río San Pedro de acuerdo a la clasificación del Gran Grupo.

Cryandepts: Se localizan en las partes altas de las montañas bajo condiciones climáticas húmedas y nubosas. Presentan texturas medias: franco a franco limosas. Tienen alto contenido de materia orgánica y potasio, pero son pobres en nitrógeno y fósforo. La temperatura del suelo es inferior a 10°C.

En la Subcuenca están localizados en las partes más altas de los volcanes Illinizas, Corazón, Rumiñahui y Pasochoa, en las zonas de arenales y páramos.

Dystrandepts: Son suelos que poseen una retención de humedad inferior al 100%. Tienen gran cantidad de carbón orgánico y bajo contenido de bases. Se han desarrollado en climas húmedos pero con estaciones secas. Pese a la poca cantidad de bases, estos suelos no son particularmente ácidos. Poseen alto poder de fijación del fósforo, lo cual limita su capacidad de uso. Son profundos de color muy negro en las zonas frías y amarillentos en las zonas cálidas y templadas.

En la Subcuenca del Río San Pedro, estos suelos se ubican en las partes altas pero por debajo del límite de los páramos y matorrales, ocupando los declives en ambas márgenes del río.

Eutrandepts: Presentan gran cantidad de materiales amorfos, carbón orgánico y alto contenido de bases. Son suelos profundos, de cenizas recientes, suaves y permeables. Presentan texturas francas o limosas con arena muy fina; pH ligeramente ácido a neutro. Son ricos en materia orgánica y buena fertilidad natural. Su utilización es muy amplia soportando toda clase de cultivos, pastizales y arboladas.

Están localizados en la Subcuenca media, ocupando principalmente la margen izquierda del Río. La mayor parte de estos suelos está cubierta por pastos cultivados, en menor cantidad se encuentran cultivos, y en muy pocos sectores por bosques plantados.

Vitrandepts: Presentan grandes cantidades de materiales piroclásticos como vidrio, ceniza y pómez. De texturas arenosas, francas, franco arenosas y a veces gravilosas. Son profundos, con un bajo contenido de materia orgánica. Son aptos para cultivos, especialmente bajo riego, teniendo como limitaciones su permeabilidad y baja fertilidad.

En la Subcuenca, se los puede encontrar en la parte central, que pertenece a la Subcuenca media, que se caracteriza por la presencia de asentamientos poblacionales, además son utilizados para agricultura y ganadería.

Argiudolls: Poseen un horizonte argílico bajo. De texturas arcillosas o arcillo arenosas, pH ligeramente ácido y buena fertilidad natural, pudiendo encontrarse cangahua a más de un metro de profundidad. Se han desarrollado sobre proyecciones volcánicas de cenizas recientes suaves y permeables, en climas húmedos y templados. Son suelos muy aptos para la agricultura y ganadería.

Los Argiudolls se localizan en el sector norte de la Subcuenca, en el límite entre las partes media y baja de la misma. Son suelos que soportan coberturas de pastos y cultivos y una intensa influencia humana.

En el cuadro 3.1. se muestra un resumen de los suelos de la Subcuenca del Río San Pedro:

Cuadro 3.1: SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUELO	
Inceptisoles	Andepts	Cryandepts	Db	
		Dystrandepts	De	
			Df	
			Dm	
			Dn	
			Dnx	
			Dny	
			Ha	
		Eutrandepts	Ha-Hb	
			Hb	
			Hb-Hc	
			JHa	
				JHi
		Vitrandepts	Jcy	

			Jdy
			JHv
			JHvy
			Jky
Mollisoles	Udolls	Argiudolls	Hc
			Md

Fuente: Mapa de Suelos escala 1:50000. SIGAGRO.

En las siguientes fotos pueden observarse algunos ejemplos de los suelos presentes en la Subcuenca del Río San Pedro:



Foto 1. Tomada en un sector de la zona media de la Subcuenca. Se puede apreciar el perfil del suelo con sus diferentes horizontes.



Foto 2. Ejemplo de suelo Jcy (Vitrandept). Pese a su poca permeabilidad y fertilidad están bajo cultivos.



Foto 3. Ejemplo de suelo Hb (Eutrandept). Suelos permeables ricos en materia orgánica.

3.4. CLIMA

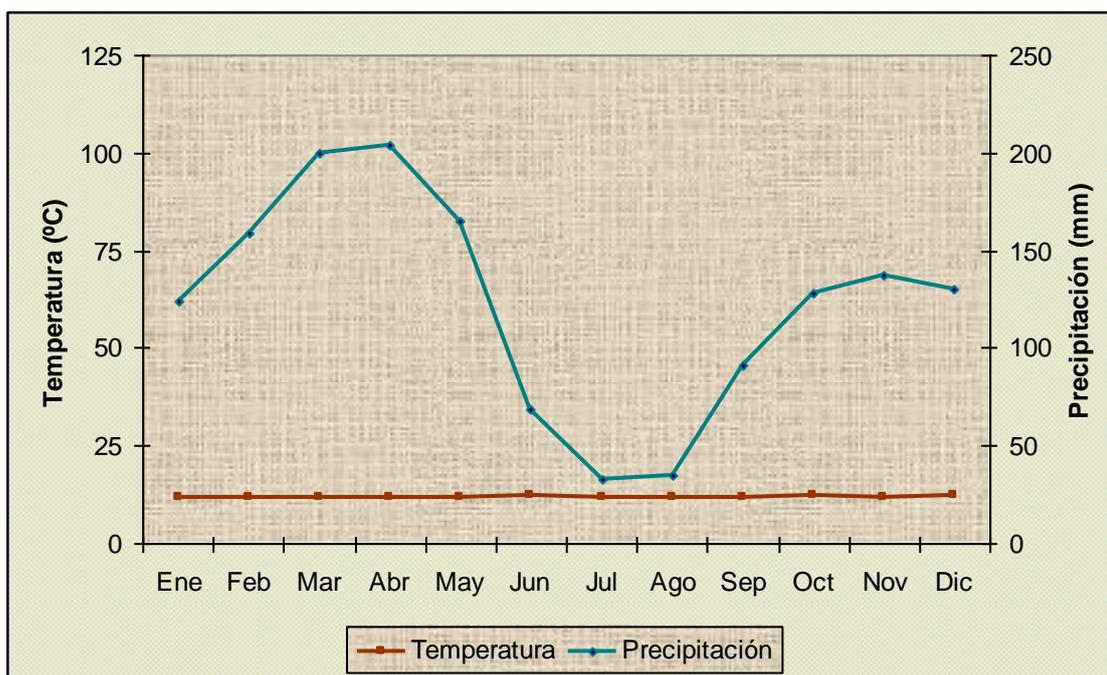
Se considera al clima como el conjunto de condiciones meteorológicas existentes en un lugar determinado. Los principales elementos que lo componen son: temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica, vientos y evaporación. Estos elementos dependen de varios factores propios del lugar, tales como: latitud, altitud, topografía, cobertura vegetal, distribución de mares y corrientes.

En el caso de la Subcuenca del Río San Pedro, el factor determinante de su clima es la topografía. Las características orográficas que presenta, tales como la altura, la orientación sur-norte y la presencia de fuertes pendientes, son un obstáculo para la circulación de los vientos provocando su ascenso. De esta manera se crea una zona de alta pluviosidad con una variada distribución de microclimas. Para visualizar mejor las diferencias de alturas se puede observar el TIN de la Subcuenca. (Ver Mapa 4: TIN de la Subcuenca del Río San Pedro).

De acuerdo a los datos medidos en la estación Izobamba del INAMHI (Ver Mapa 5: Mapa de Ubicación de Estaciones Climáticas), la temperatura media de la Subcuenca es de 11.62 °C, con valores diarios promedios máximos y mínimos de 18.23 y 6.25 °C respectivamente. La precipitación anual media es de 1472.79 mm.

Graficando los valores promedios de temperatura y precipitación de la estación Izobamba en el diagrama ombrotérmico propuesto en la década de los años 50 por Gaussen, se puede determinar que en la Subcuenca del Río San Pedro existen dos épocas climáticas: seca y lluviosa (Gráfico 3.4). Sin embargo cabe aclarar que Gaussen aplicó su modelo para identificar el índice de aridez, considerando que un mes es árido cuando las precipitaciones en milímetros son inferiores al doble de las temperaturas ($P < 2T$).

Gráfico 3.4: DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE LA ESTACIÓN IZOBAMBA



Fuente: INAMHI. Serie de datos 1990-2000

Del análisis del diagrama se puede concluir que se trata de una zona húmeda que no presenta época de aridez. Las características de sus épocas diferenciadas son:

- a) **Época Lluviosa:** Se presenta dos veces al año. Desde Enero hasta Mayo, y desde Octubre a Diciembre. En esta época se registra alrededor del 85% de la precipitación anual, es decir 1250 mm aproximadamente. Se caracteriza principalmente por la presencia de días con neblinas y nevadas con temperaturas que pueden llegar hasta los 0 °C.
- b) **Época Seca:** Dura desde Junio hasta Septiembre. La precipitación registrada durante estos meses es aproximadamente de 250 mm. Esta época presenta vientos fuertes, sol intenso durante el día y heladas durante las noches con ocasionales precipitaciones ligeras acompañadas de alta nubosidad.

3.5. USO DEL SUELO (Ver Mapa 11: Uso Actual del Suelo de la Subcuenca del Río San Pedro)

En la Subcuenca del Río San Pedro se han identificado seis clases de uso de suelo y cobertura vegetal, siendo éstos:

- i) Pecuario: Pastos cultivados
- ii) Agrícola: Cultivos de ciclo corto
- iii) Forestal: Bosque Natural, Bosque Plantado, Vegetación Arbustiva
- iv) Poblacional: Sectores Urbanos y Rurales
- v) Páramo: de Pajonal y Arbustivo
- vi) Otros: Nieve, Arenales

Es importante destacar que debido a que el presente estudio analiza el impacto de la destrucción de los páramos y la importancia de su conservación para la producción de agua, se los ha considerado como una cobertura independiente.

Además, en el Mapa de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal de la Subcuenca se pueden encontrar zonas en las que están combinados varios usos. Estas zonas constan en la leyenda como: Uso1/Us02, en donde el uso mencionado en primer lugar predomina sobre el segundo.

i) Uso Pecuario



La Subcuenca del río San Pedro se caracteriza principalmente por su vocación pecuaria. En la zona de estudio existen grandes extensiones cubiertas exclusivamente por pastos, en un total de 11712.302 ha. Los pastos restantes se encuentran formando asociaciones con bosques (generalmente pastos cultivados o potreros, con cercas vivas, sembrados en fila, doble fila o en pequeñas franjas), ocupando un área de 81.325 ha, y con

cultivos de ciclo corto, en 8693.102 ha. En total, el área del uso pecuario es de 20486.729 ha, que representa el 42% de la zona de estudio.

ii) Uso Agrícola



La característica más importante de la producción agrícola en la Subcuenca del Río San Pedro es que se encuentra distribuida en pequeñas UPAs (Unidades de Producción Agrícola) de menos de 1 ha. Existe un gran predominio de los minifundios, dando como consecuencia una agricultura dedicada básicamente al consumo familiar sin generar mayores riquezas a este nivel, a pesar de que abastece parte de la demanda de la ciudad de Quito y de la amplia población que se asienta en el valle de Machachi.

Los principales cultivos identificados son de ciclo corto, como maíz, habas, fréjol, arveja y papas. En menor proporción se encuentran también cultivos en invernaderos generalmente con plantaciones de flores y hortalizas.

De acuerdo a un análisis comparativo entre los censos agropecuarios de 1974 y 2000, se puede apreciar que la producción agrícola actual ha disminuido en un 21% principalmente por el avance del área urbana. Sin embargo la frontera agrícola también ha tenido un avance, especialmente hacia las áreas de páramos y zonas de conservación.⁹

En la Subcuenca los cultivos agrícolas se ubican en sitios de pendiente baja y media, aunque con diferente altitud, especialmente el cultivo de papas que se siembran a alturas mayores a los 3500 msnm.

Esta cobertura abarca una superficie de 9420.104 ha y significa el 19% del área total de esta subcuenca.

⁹ Ilustre Municipalidad de Mejía. Plan de Desarrollo Estratégico Mejía 2010.

iii) Uso Forestal



Para fines del presente estudio, dentro de este tipo de cobertura se han incluido: los bosques plantados y naturales que abarcan en conjunto alrededor de 3800 ha que representan el 7.7%, y la vegetación arbustiva que se caracteriza porque no alcanza alturas mayores de cinco

metros y es producto de la tala de la cobertura de bosque primario. Se localiza en las zonas de fuertes pendientes, a lo largo de las quebradas principales que drenan al río San Pedro y junto a las áreas de páramos. Abarca una superficie 1473 ha, siendo aproximadamente el 3% del área de la Subcuenca.

iv) Uso Poblacional



Esta cobertura incluye a los asentamientos poblacionales de carácter urbano y rural que existen en la Subcuenca, los cuales tienen características especiales que los diferencian. Los principales centros poblados que se encuentran son:

- **Alóag:** Es una parroquia antigua cuya principal característica es ser punto de paso entre las dos regiones naturales, sierra y costa.
- **Aloasí:** Siguiendo la dirección del Río San Pedro, este asentamiento humano se ubica al occidente de Machachi. Sus habitantes se dedican a actividades rurales, siendo la agricultura su principal fuente de ingreso.
- **Chaupi:** Está localizado al occidente de la Subcuenca. Predominan las haciendas, por lo que no se han formado asentamientos humanos muy compactos.
- **Machachi:** Es la cabecera cantonal de Mejía. Su zona urbana constituye un asentamiento de primer orden con una población de 12469 habitantes, de acuerdo al censo del 2001. Es una zona con importante desarrollo, que requiere de una planificación adecuada en

beneficio del ordenamiento del avance urbanístico y de descongestión de determinados servicios públicos como el transporte.

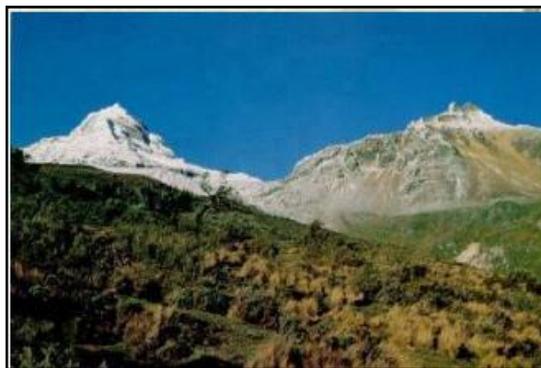
Esta cobertura tiene una extensión de 1063.081 ha, que corresponde al 2% del área total de la Subcuenca.

v) Cobertura de Páramos



Los sectores altos o suelos paramales cubren un área significativa de 10442.183 ha, el 21% del área total de estudio. Los páramos identificados en la Subcuenca se encuentran en formaciones herbáceas puras (9420.633 ha que representan el 19.2%), o mezclados con vegetación arbustiva baja (445.859 ha con el 0.9%). Están presentes en las cordilleras o en sitios aledaños a grandes cerros o volcanes, que en este caso son los Illinizas, Rumiñahui, Corazón y Pasochoa, a partir de los 3500 msnm.

vi) Otros Usos



Comprende las zonas volcánicas de gran altura, en donde se pueden encontrar: a) Nieve (Illinizas, y ocasionalmente en el Rumiñahui y Corazón), b) Arenales mezclados con rocas alrededor de los edificios volcánicos, y c) Suelo desnudo, especialmente en los escarpes del Rumiñahui en donde existe un fuerte proceso de erosión.

3.6. ÁREAS PROTEGIDAS (Ver Mapa 6: Mapa de áreas protegidas de la Subcuenca del Río San Pedro)

La presencia de áreas de vegetación nativa, y el intenso incremento de actividades antrópicas, han hecho necesaria la declaración de cuatro áreas protegidas y dos bosques protectores en la Subcuenca del Río San Pedro, descritos a continuación:

i) Refugio de Vida Silvestre Pasochoa

El Gobierno Nacional, mediante acuerdo ministerial del 26 de noviembre de 1982, declaró Bosque y Vegetación Protectora a una superficie de 319.6 has. de la Hacienda “Pilopata”, propiedad del Ministerio de Salud. En 1996 dada la importancia del área, el Pasochoa fue declarado Refugio de Vida Silvestre, con una extensión de 632.03 has., y está ubicado en la parroquia de Uyumbicho. En la Zona protegida se encuentran tres formas de vegetación bien definidas: el Matorral Húmedo Montano, el Bosque Siempreverde Montano Alto, y el Páramo Herbáceo o Pajonal.

La Caldera es la zona ecológica más importante del Pasochoa, aquí se encuentra la mayor extensión del bosque andino que no ha sufrido intervención humana y permite que se constituya en el hábitat del cóndor, especie en extinción.

El 97.6% de esta reserva, es decir 616.85 hectáreas, se encuentran dentro de la zona de estudio.

ii) Reserva Ecológica de Los Illinizas

Fue creada el 2 de Diciembre de 1996, con una superficie aproximada de 130000 hectáreas, de las cuales 7411.2 que representan el 5.8% están dentro de la zona de estudio, La reserva está localizada entre los 800 y 5265 msnm. La temperatura es de 0°C en la zona alta y alcanza un máximo de 24°C en la zona baja con precipitaciones de entre 1000 y 2000 mm. Está ubicada entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi y abarca, entre otras áreas, los páramos occidentales de los cerros Illinizas y Corazón.

Al pie de los volcanes Illinizas y Corazón se encuentra un Refugio de Vida Silvestre, que aún conserva importantes extensiones de asociaciones vegetales, donde todavía vive fauna silvestre.

iii) *Parque Nacional Cotopaxi*

Fue creado el 11 de Agosto de 1975, con una superficie aproximada de 33000 hectáreas. Posee clima frío de alto andino con temperaturas que varían entre los 0 y 15°C y precipitaciones anuales de 500 a 1500 mm. Los ríos que bañan esta zona son la fuente para el abastecimiento de agua potable y riego para Machachi, Quito, Latacunga y la región Oriental.

El parque cubre los páramos del sureste de la zona de estudio cubriendo 2833.322 hectáreas, que representan el 8.9% de esta área protegida.

iv) *Área Nacional de Recreación El Boliche*

Creada el 26 de julio de 1979 mediante acuerdo ministerial. Está ubicada a 60 kilómetros de Quito en los límites de las provincias de Cotopaxi y Pichincha. Tiene una superficie total de 392 hectáreas, de las cuales 189.026 (48.2%) están dentro de la zona de estudio.

El rango altitudinal está comprendido entre los 3000 y 3600 msnm. Es la zona protegida más pequeña y tiene características similares a las del Parque Nacional Cotopaxi.

El Boliche se caracteriza por su estratégica ubicación, cercana a los principales centros poblados. Su factor escénico, la inmensa masa boscosa, su ambiente natural, la flora y fauna nativa, la geología e infraestructura existente, hacen de esta unidad de conservación un rincón ecuatoriano con suficientes estímulo para ser visitado y aprovechado sabiamente.

En este lugar se desarrollan proyectos de manejo de venados, alpacas y llamas. Estos proyectos se basan en objetivos fundamentales como proteger y fomentar especies en peligro de extinción, cumplir actividades de educación ambiental e investigación básica,

obtener beneficios biológicos económicos que permitan ampliar los campos de acción en varios lugares del país.

v) *Bosque Protector Umbría*

A través del Acuerdo Ministerial No. 24 del 18 de abril de 1994, se establece dentro de la categoría de Bosque y Vegetación Protectoras al predio Umbría, el mismo que se ubica en la parroquia Aloasí del Cantón Mejía, con una superficie de 1723.2 ha, que es parte del drenaje del río San Pedro. Está ubicada entre los 3.700 a 4.523 msnm. correspondiente a la cumbre del Cerro Corazón, con una temperatura que en invierno va desde los 6 a 0 °C. Su manejo es privado. Este bosque protector se encuentra totalmente dentro de la zona de estudio.

vi) *Bosque Protector del Río Pita*

Está localizado al este de la Subcuenca del Río San Pedro y tiene una superficie de 10167.84 hectáreas. Sólo una pequeña parte de este bosque se extiende por la zona de estudio con 179.018 hectáreas que representan el 1.8%.

METODOLOGÍAS

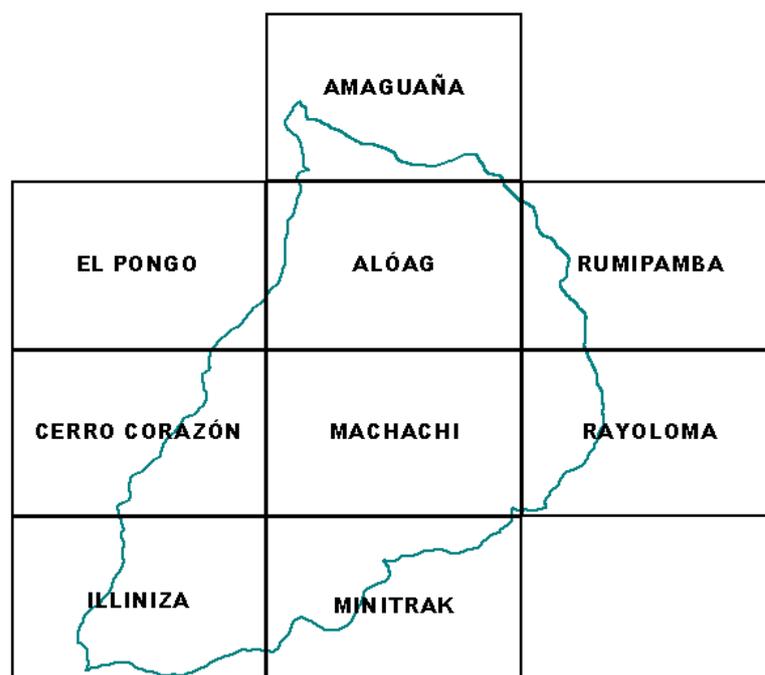
4.1. ANÁLISIS MULTITEMPORAL UTILIZANDO FOTOGRAFÍAS AÉREAS

El análisis comparativo del uso del suelo en la Subcuenca del Río San Pedro, comprende tres fases: preparatoria, de ejecución, y de validación especialmente para el mapa de uso actual de suelo.

1.6.1. Fase Preparatoria

El primer paso dentro de esta fase fue determinar las herramientas, materiales y equipos de inmediata disposición o de posible acceso, para llevar a cabo el estudio. Se adquirieron acetatos, marcadores, las cartas topográficas escala 1:25000 representadas en el Gráfico 4.1, y otros implementos necesarios para la interpretación.

Gráfico 4.1: CARTAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN

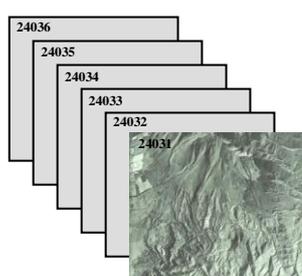


Posteriormente fue necesaria la revisión de los archivos del Departamento de Fotografía Aérea del Instituto Geográfico Militar para identificar fechas, escalas y calidad de las fotografías pertenecientes a la zona.

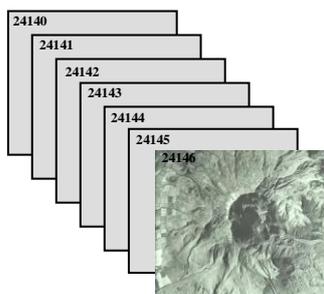
De esta manera, se seleccionaron las fotografías de los años 1956 y 2000, tomando en cuenta que fueron las fotografías de mejor calidad y considerando que este período de tiempo de 44 años, es muy favorable para determinar las diferencias del uso del suelo, antes y después de las Reformas Agrarias, aplicadas en 1964 y 1973.

Para elaborar el mapa de uso de suelo de 1956, se utilizaron 20 fotografías a escala 1:60000, tomadas con una cámara T-II de distancia focal 153.57mm, como se puede ver en el Gráfico 4.2. La calidad de las fotografías fue muy aceptable ya que sus imágenes son nítidas, sin presencia de nubes. Sin embargo la dirección tomada por el avión al momento de tomar las fotografías dejó una pequeña zona sin información entre dos líneas de vuelo. La interpretación de esta zona se realizó asumiendo las mismas condiciones de uso del suelo de los sectores aledaños ya que se trataba de una amplia extensión de cultivos.

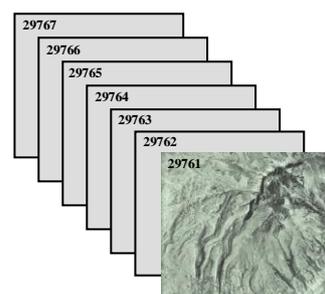
Gráfico 4.2: FOTOGRAFÍAS AÉREAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO AÑO 1956



Fecha de toma: 09 - 01 - 56
Línea de vuelo: A545
Rollo: 153



Fecha de toma: 09 - 01 - 56
Línea de vuelo: A544
Rollo: 153

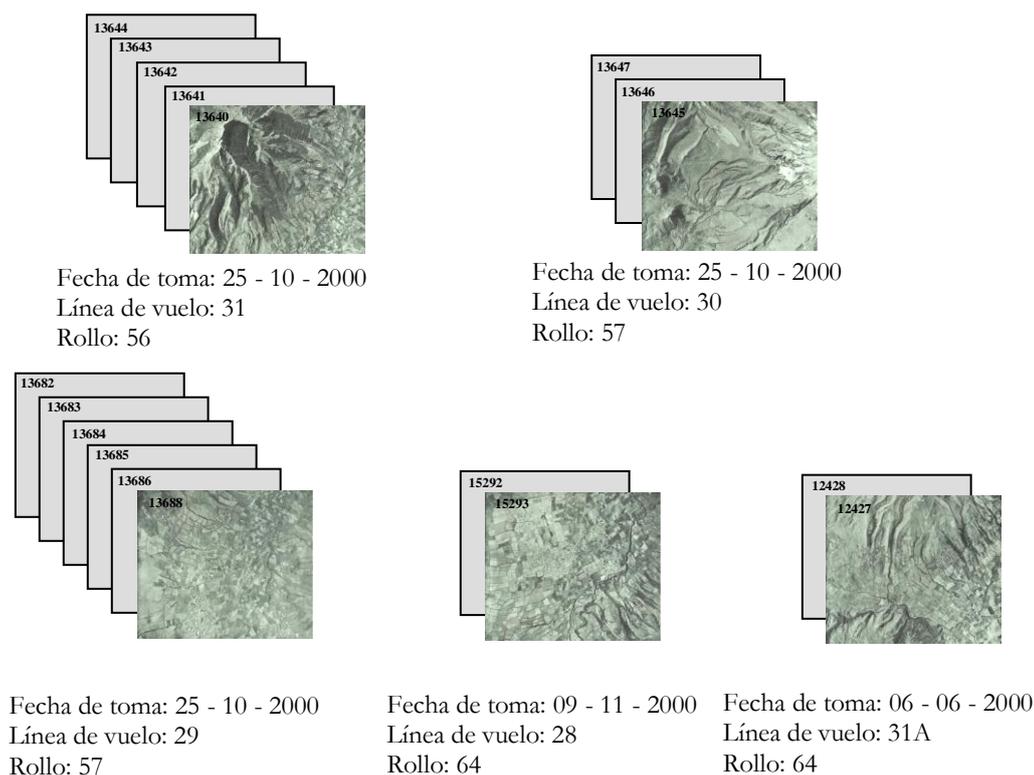


Fecha de toma: 25 - 11 - 56
Línea de vuelo: A543
Rollo: 153

En la generación del mapa de uso de suelo del año 2000, se utilizaron 18 fotografías a escala 1:60000 del proyecto Carta Nacional, tomadas con la cámara Wild RC30, de distancia focal 152.92 mm, descrita en el Gráfico 4.3. La mayor parte de las fotografías son

de buena calidad, a excepción de un par de ellas que abarcan un sector de los nevados Illinizas que se encuentran cubiertas de nubes, esto impidió la interpretación de esta zona, para lo cual el uso del suelo se determinó en la salida de campo utilizando como herramienta un GPS.

Gráfico 4.3: FOTOGRAFÍAS AÉREAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO AÑO 2000



4.1.2. Fase de ejecución

a) Delimitación de la Zona de estudio

En primer lugar se delimitó la Subcuenca, tomando como referencia la divisoria de aguas desde donde convergen los cauces que desembocan en el Río San Pedro. Luego se establecieron los límites de las partes alta y media de la Subcuenca, que representan las zonas de interés del presente estudio. Para determinarlas, se tomaron en cuenta varios factores, entre ellos: alturas de los lugares en donde el cambio de uso de suelo es evidente, patrones de producción, relaciones de los pobladores con los recursos naturales. Este

análisis fue complementado con salidas de campo y entrevistas informales con la gente local. Las zonas son:

Cuadro 4.1: ZONIFICACIÓN DE LAS PARTES ALTA Y MEDIA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO

ZONA	ALTURAS (m.s.n.m)	
	Desde	Hasta
Baja	1600	2660
Media	2660	3100
Alta	3100	5220

b) Determinación de Leyenda Temática

Luego de realizar una interpretación previa de las fotografías aéreas en gabinete, se organizaron varias salidas para recorrer la zona de estudio, y aplicar breves entrevistas a los habitantes de las parroquias urbanas y rurales para reconocer las principales actividades a las que se dedican y el uso que le dan al suelo de sus propiedades. De esta manera se determinó la siguiente leyenda temática:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Cultivos | <input type="checkbox"/> Vegetación arbustiva |
| <input type="checkbox"/> Pastos | <input type="checkbox"/> Invernaderos |
| <input type="checkbox"/> Bosque natural | <input type="checkbox"/> Nieve |
| <input type="checkbox"/> Bosque plantado | <input type="checkbox"/> Arenales |
| <input type="checkbox"/> Páramos | <input type="checkbox"/> Urbano |

c) Interpretación Visual de las Fotografías Aéreas

Es importante aclarar que las fotografías del año 2000 no pudieron ser adquiridas por su elevado costo de venta, razón por la cual su interpretación se llevó a cabo dentro del Departamento de Fotografía Aérea del Instituto Geográfico Militar. Por este motivo, la metodología utilizada siguió las normas convencionales de la fotointerpretación, y criterios

específicos como tono, textura y configuración geométrica: tamaño y forma. Para este trabajo fueron necesarios un estereoscopio de espejos con lentes de aumento y una lupa.

A pesar de que fue posible comprar las fotografías de 1956, el método utilizado fue el mismo que para las fotografías actuales, con el fin de conservar los mismos márgenes de error en los dos años.

La fotointerpretación se llevó a cabo sobre acetatos o transparencias, utilizando marcadores permanentes de punta muy fina.

En las cartas topográficas a escala 1:25000 se seleccionaron puntos de coordenadas conocidas y de fácil visualización como cruces de vías o uniones de ríos, los mismos que se identificaron también en las fotografías aéreas, para marcarlos en los acetatos y obtener de esta manera un control fotogramétrico que facilite la transferencia de la interpretación al mapa base.

d) Elaboración de mapas preliminares

Para pasar la información de los acetatos al mapa base de escala 1:25000, se utilizó el Zoom Transfer de la Facultad de Ingeniería Geográfica de la Escuela Politécnica del Ejército.

Una vez culminado este proceso, se procedió a la digitalización de las unidades transferidas a las cartas topográficas, mediante una mesa digitalizadora enlazada al software ArcView 3.2. La tolerancia ingresada en este programa fue de 0.03 mm.

4.1.3. Fase de Validación

a) Comprobación de campo

Para verificar la información resultante de la fotointerpretación y la exactitud de los mapas preliminares, se realizaron algunas salidas de campo con el objetivo de comprobar que las unidades identificadas en las fotografías coincidan con el uso del suelo, y definir los productos cultivados, y las especies forestales de los bosques plantados, en el caso del mapa actual; además la salida sirvió para realizar entrevistas informales con los pobladores de

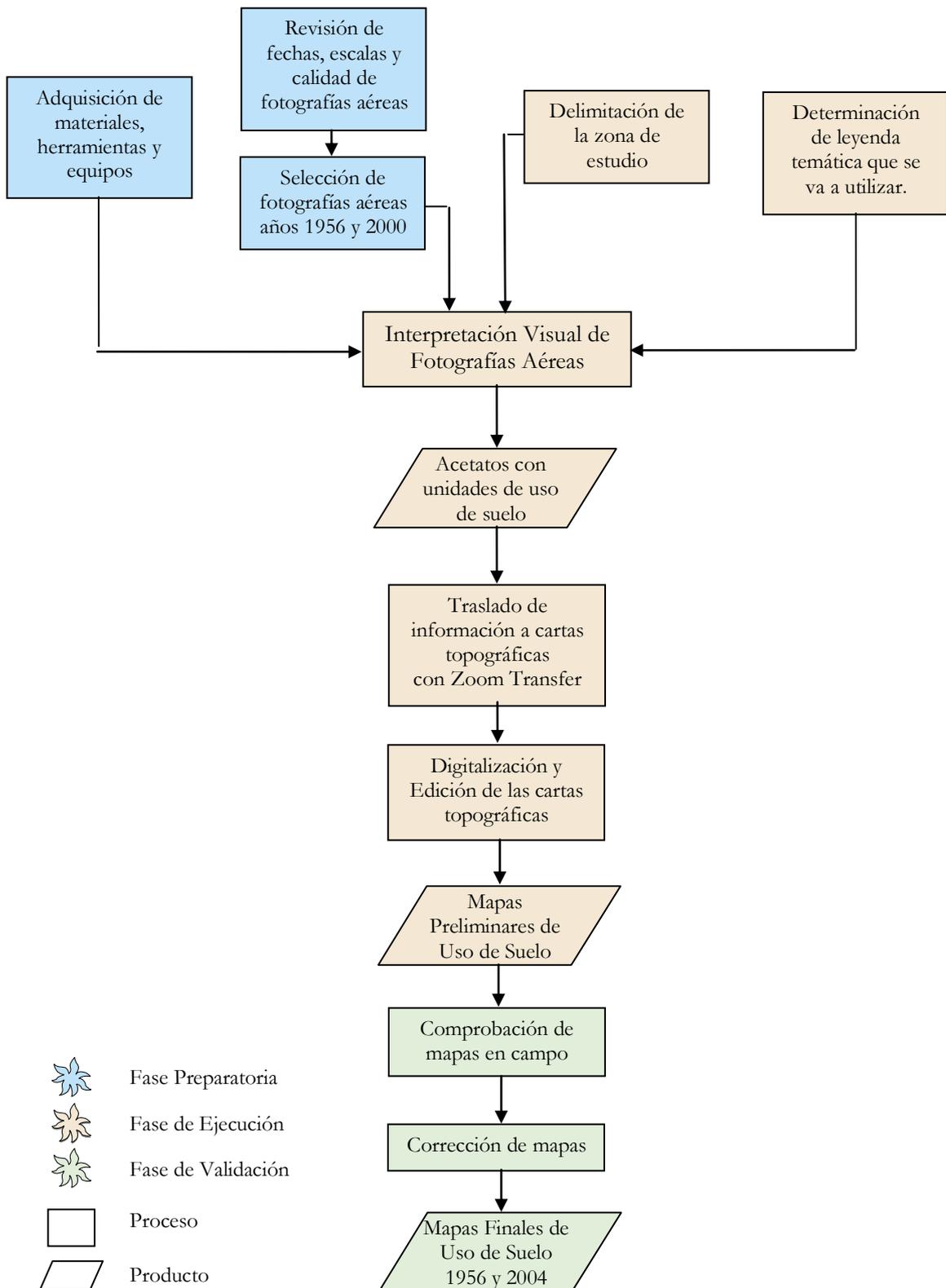
diferentes sectores para obtener información del uso del suelo en épocas pasadas. Las herramientas utilizadas en esta fase fueron principalmente un GPS, cartas topográficas, y toma de fotografías.

b) Elaboración de mapas definitivos

Luego de terminar las comprobaciones de campo y efectuar las correcciones necesarias, se elaboraron los dos mapas finales de uso de suelo para los años 1956 y 2000. (Ver Mapa 10: Uso del Suelo de la Subcuenca del Río San Pedro en 1956; y Mapa 11: Mapa de Uso Actual del Suelo de la Subcuenca del Río San Pedro).

En el Gráfico 4.4 se presenta un diagrama de flujo de la metodología empleada en el análisis multitemporal.

Gráfico 4.4: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL



4.2. APLICACIÓN DEL MODELO HÍDRICO SWAT

Para calcular el balance hídrico de la Subcuenca del Río San Pedro, y analizar el impacto de la deforestación en la producción y almacenamiento del agua, se utilizó la siguiente metodología:

4.2.1. Recopilación de información cartográfica base

Para la recopilación de esta información, se utilizaron los índices de Cartas Topográficas, escala 1:25000, disponibles en el Instituto Geográfico Militar. En estas cartas las curvas de nivel se encuentran a intervalos de 20 metros; el Datum Vertical es la Estación Mareográfica de la Libertad, Provincia del Guayas, del año 1959. El Datum Horizontal es el Provisional de 1956 para América del Sur en La Canoa-Venezuela. La información se encuentra en la zona 17 y utiliza la Proyección Transversa de Mercator. Las cartas topográficas utilizadas están descritas en el Gráfico 4.1.

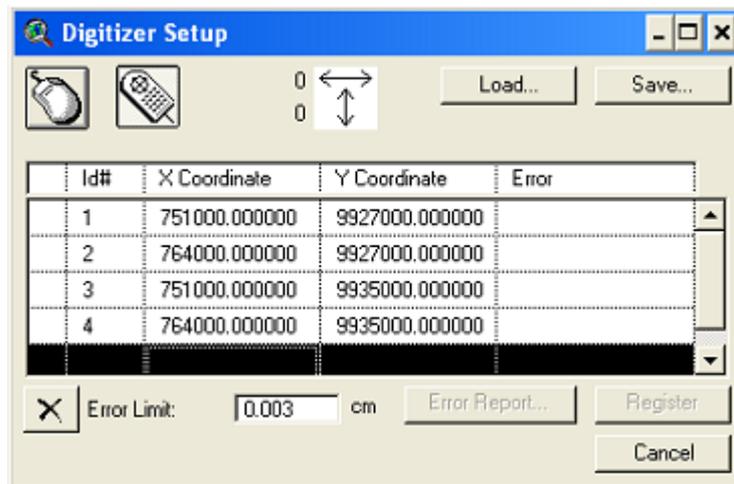
La información de las cartas topográficas representa la base para este trabajo, ya que establece la escala de análisis del presente estudio, y además contiene variables determinantes como: red hidrográfica, red vial, centros poblados y curvas de nivel que representan el relieve de la zona.

4.2.2. Digitalización de la información cartográfica base

Para este proceso, se utilizó la extensión Digitizer del software ArcView 3.2, enlazado a una mesa digitalizadora Calcomp DrawinBoard III.

Primero es necesario ingresar los cuatro puntos extremos de la carta topográfica a digitalizar, proceso que permite setear la mesa de digitalización; la precisión con la que deben ser ajustados los datos no debe ser mayor a 0.003 cm. Un ejemplo de las coordenadas utilizadas para digitalizar una carta topográfica se muestra en el Gráfico 4.5.

Gráfico 4.5: VENTANA DE SETEO DE LA MESA DIGITALIZADORA



Luego se debe calcular e ingresar los datos de la Tolerancia, que depende de la escala de trabajo. Para esto se toma en cuenta la mínima distancia visible que corresponde a $\frac{1}{3}$ mm.

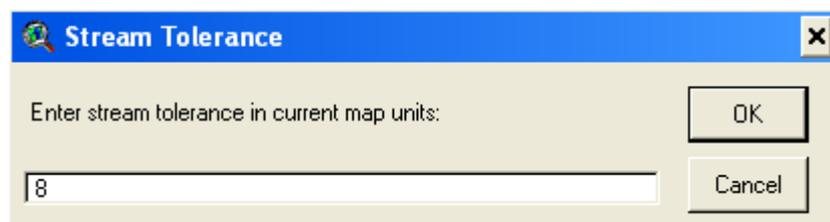
$$\delta = \text{Factor de Escala} \times \frac{1}{3}$$

$$\delta = 25 \text{ m} \times \frac{1}{3}$$

$$\delta = 8.33 \text{ m.}$$

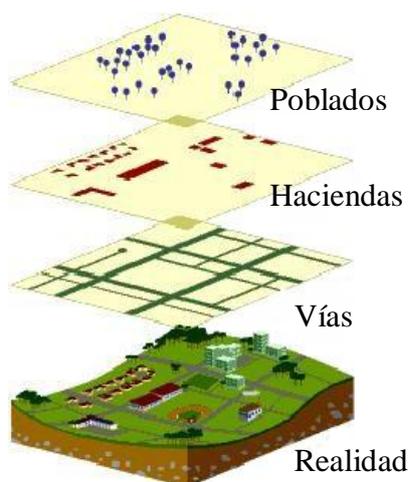
De esta manera se define que el valor de la tolerancia no puede ser mayor a 8.33 m. Para este estudio se consideró un valor de 8 m, que fue ingresado en el software como lo muestra el gráfico 4.6.

Gráfico 4.6: VENTANA DE INGRESO DE TOLERANCIA



En esta etapa, es necesario realizar una diferenciación entre los elementos, ya sean estos puntos, líneas o polígonos y digitalizar cada uno de ellos en diferentes coberturas con sus respectivas bases de datos. En el Gráfico 4.7 se muestran ejemplos de las diferentes coberturas que forman parte de la cartografía base y la diferenciación de sus elementos.

Gráfico 4.7: ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN



4.2.3. Edición de la cartografía digitalizada

La edición de cada uno de los elementos digitalizados es necesaria para obtener productos de calidad. Consiste en una depuración de la información para eliminar duplicados, agregar nombres, códigos o cotas a los elementos, modificar vértices de las curvas de nivel procurando que sus cruces con los ríos tengan un corte en “v”.

La edición de la cartografía se realizó en el software ArcView 3.2, ya que al momento de la digitalización, efectuada en el mismo programa, se crearon las bases de datos, y esto facilitó la corrección de la información.

4.2.4. Estructuración y sistematización de cartografía temática para el modelo

La estructuración y sistematización de la información temática para el modelo, está directamente relacionada con cada una de las coberturas y bases de datos necesarias para hacer simulaciones utilizando el modelo.

4.2.4.1. Uso de Suelo y Cobertura Vegetal

Este proceso es uno de los puntos más importantes en la investigación, pues una de las variables consideradas en el modelo Swat es la cobertura vegetal del área de estudio. La metodología seguida para generar este mapa a escala 1:25000 está descrita en el Capítulo 3.

4.2.4.2. Suelos

La información digital de esta cobertura se obtuvo del Mapa de Suelos del Ecuador, escala 1:50000, generado por el ex-PRONAREC y disponible en SIGAGRO (antes Dirección Nacional de Recursos Naturales DINAREN).

Sin embargo, la base de datos del mapa concedido por esta Institución, no completaba las variables requeridas por el modelo Swat. Por esta razón se procedió a planificar salidas al campo para tomar muestras de suelos y analizarlas en laboratorio (Ver Anexo 1: Resultados de análisis de suelos)

Para determinar los puntos en donde realizar el muestreo, se llevó a cabo el siguiente método:

- El mapa incluye 20 clases de suelos, mencionadas en el Cuadro 3.3. El primer paso fue editar la base de datos de este mapa de suelos, creando un nuevo campo para dar un código a cada clase de suelo, desde el número 1 hasta el 20.
- Luego se elaboró un mapa de pendientes, a partir de las curvas de nivel, utilizando la extensión Spatial Analyst de ArcView 3.2. (Ver Mapa 7: Mapa de Pendientes de la Subcuenca del Río San Pedro). La clasificación de los niveles de pendientes de este mapa se realizó siguiendo la metodología de la USDA, según la cual se diferencian los siguientes rangos:

Rango	Pendiente
0 – 2°	Terrenos Planos
2 – 5°	Zonas con pendiente suave
5 – 15°	Zonas con pendiente moderada
15 – 25°	Zonas con pendiente fuerte
25 – 35°	Zonas con pendiente muy fuerte
35 – 45°	Zonas escarpadas

- Se reclasificó este mapa, asignando valores de 100 a 600, siendo 100 las pendientes de menor inclinación; y 600 las más fuertes.
- La siguiente fase fue generar buffers a cada 100 metros de las vías localizadas dentro de la zona de estudio, a excepción de los caminos de verano, por su difícil acceso.
- Se reclasificaron los buffers asignando el valor de 1000 a los primeros 100 metros más cercanos a las vías, 2000 a los siguientes 100 metros, etc.
- Con la opción Map Calculador, se cruzaron los mapas de suelos, pendientes y buffers.
- Para seleccionar los puntos de muestreo, se fueron agrupando todos los números que terminen en 1, luego en 2, y así sucesivamente. Luego en cada grupo se seleccionaron como zonas prioritarias para muestreo a aquellas cuyas cifras de decenas de mil y centenas sean 1100, 1200, 2100 y 2200, debido a que son zonas que cuentan con vías de ingreso cercanas y fácil accesibilidad.
- Con la ayuda de los mapas digitales se tomaron las coordenadas de los puntos seleccionados. (Ver Mapa 8: Mapa de Suelos con la ubicación de los puntos de muestreo).

En el campo, el proceso para la toma de cada muestra fue el siguiente:

- Con la ayuda de un GPS y de las cartas topográficas se buscaron las coordenadas del punto a muestrear antes establecido.
- Una vez encontrado el lugar, con una pala manual, conocida como “pala de desfonde”, se cavó el terreno hasta cuando se podía diferenciar un cambio de horizonte. Todo el suelo extraído se colocó en un costal, y luego se procedió a homogeneizarlo.
- Luego se recogió la muestra en una funda plástica debidamente etiquetada.
- Con una cinta métrica, se midió la profundidad de la capa arable.



Las muestras recolectadas fueron enviadas al Laboratorio de Suelos y Aguas del Servicio Ecuatoriano de Sanidad Agropecuaria SESA, del Ministerio de Agricultura y Ganadería. El informe contiene datos de fertilidad, clase textural y agua aprovechable (Ver Anexo 1: Resultados del Análisis de Suelos).

Además de estos valores, en el modelo deben ser ingresados los datos de conductividad hidráulica, que no fue posible analizar en el laboratorio. Entonces, para obtener esta variable se utilizó el Triángulo de Textura según el porcentaje de arena, limo y arcilla, adaptado para conductividad hidráulica. (Ver Anexo 2: Triángulo Textural para Conductividad Hidráulica).

Es importante aclarar que, considerando que el mapa de Tipos de Suelo será posteriormente analizado junto al mapa de Uso de Suelo, es necesario que las dos coberturas se encuentren en la misma escala de trabajo. Resultaría sencillo pasar el mapa de Uso de Suelos 1:25000 que se obtuvo por fotointerpretación a una escala 1:50000, pero se tendría como consecuencia la pérdida del detalle en la cobertura vegetal, lo que dificultaría conseguir los objetivos planteados en el estudio. Por lo tanto, la solución óptima para esta situación hubiera consistido en obtener un mapa de Tipos de Suelo a escala 1:25000. Sin embargo cuando a tipos de suelo se refiere, el conseguir un mapa a mayor detalle involucra varias tareas muy específicas, laboriosas y económicamente costosas dignas de un trabajo en equipo.

La metodología comúnmente usada para este proceso, implica:

- Determinar el mínimo número y la ubicación de los puntos de muestreo, mediante un modelo estadístico que relacione: número de tipos de suelo del mapa inicial, extensión del área de estudio y escala a la que se desea llegar (mapa final).
- En cada punto de muestreo realizar por lo menos tres barrenaciones para identificar número de capas del suelo, profundidad de cada una de ellas, entre otros parámetros.

- Cubrir costos de análisis de todas las muestras, en un Laboratorio especializado de Suelos.
- Con los resultados obtenidos aplicar un método de interpolación que se ajuste a los datos existentes para generar las nuevas unidades de suelos.
- Realizar nuevas barrenaciones en campo, con la supervisión de un profesional especialista en suelos, para validar el mapa final.

Lamentablemente las condiciones para el presente proyecto, en lo que se refiere al cronograma y al presupuesto, limitaron la ejecución de este proceso.

Pero hay que mencionar que la experiencia de aplicar del modelo en otras subcuencas andinas, deja claro que las variables de mayor peso para los resultados de las corridas son la precipitación y el uso del suelo. Además, el modelo Swat ofrece al usuario algunas opciones para generar los reportes de resultados, siendo las más importantes las siguientes: a) Realizar el análisis de una o varias microcuencas, ubicadas dentro de la subcuenca en estudio, b) Realizar el análisis de una o varias Unidades de Respuesta Hidrológica, que resultan del cruce del mapa de Uso de Suelo y Tipos de Suelo, y c) Realizar el análisis de toda la Subcuenca, para lo cual el modelo trabaja con todas las variables de una manera integral pero independiente.

En el desarrollo de este trabajo se eligió la opción del análisis de toda la Subcuenca del Río San Pedro, debido a que los antecedentes y justificación del estudio plantean la necesidad del cálculo del balance hídrico a nivel general.

Por estas razones, se continuó adelante con el trabajo con la seguridad de que generar un mapa de tipos de suelo con mayor detalle no afectaría considerablemente en los parámetros del balance hídrico, que son las variables analizadas en la presente investigación.

4.2.4.3. Información climática

Para ingresar la base de datos climática al modelo, se trabajó con la información entregada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología -INAMHI-. Estos datos fueron: valores diarios de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima, y valores mensuales de radiación solar y velocidad del viento. Esta información corresponde a los años 1990 hasta 2000, medidos en la estación climatológica Izobamba, que a pesar de no encontrarse dentro de la zona de estudio, es la única estación cercana con datos diarios disponibles.

Además se obtuvo información de caudales diarios medidos en la estación San Pedro en Machachi por el INAMHI, también de 1990 hasta el 2000.

Las estaciones están ubicadas dentro de las siguientes coordenadas: (Ver Mapa 5: Mapa de Ubicación de Estaciones Climáticas)

Cuadro 4.2: COORDENADAS DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS

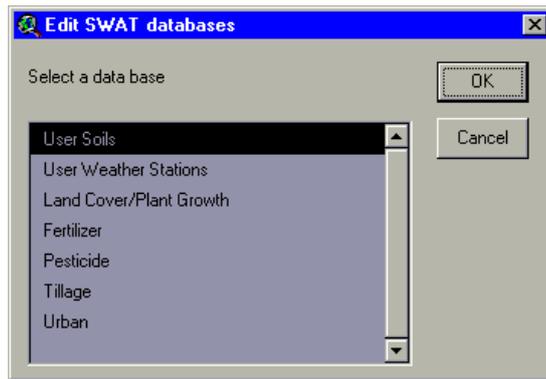
NOMBRE	CÓDIGO	ESTE	NORTE	ALTURA
Izobamba	M003	772362.58	9959895.902	3058
San Pedro en Machachi	H159	773503.427	9947603.049	2680

4.2.5. Ingreso de la información a la interfase SWAT¹⁰

Al acceder a la interfase SWAT, primero se ingresaron las bases de datos correspondientes al uso de suelo, tipos de suelo y clima para correr el modelo. Como se puede ver en el gráfico 4.8 además de esta información, el modelo permite editar otras bases de datos como fertilizantes, pesticidas, entre otras, que en este estudio no se utilizaron.

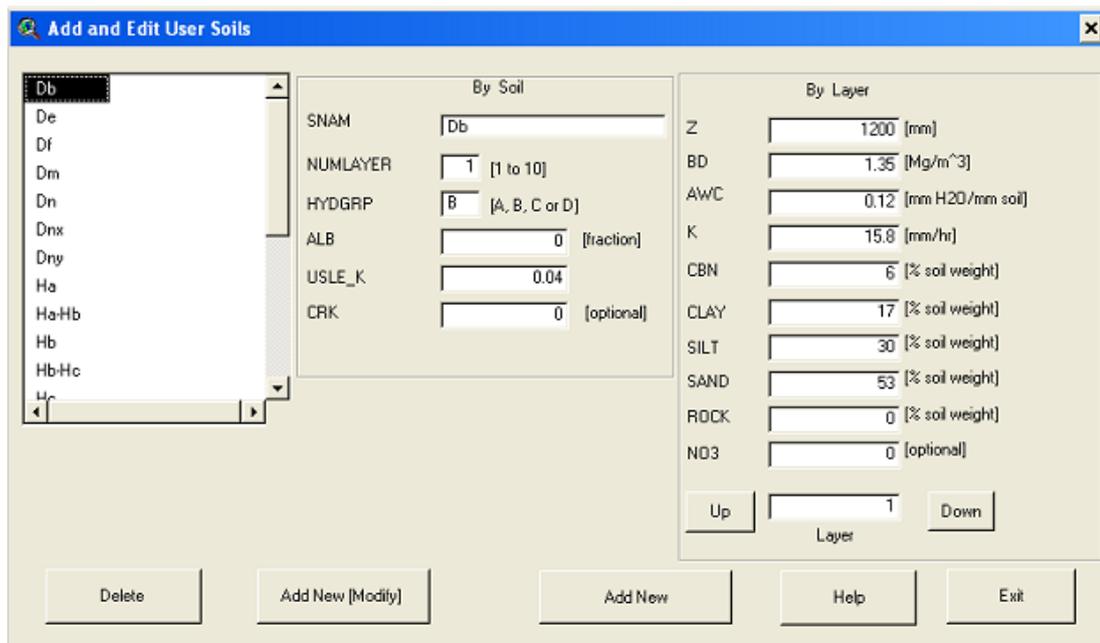
¹⁰ Para una explicación más detallada del manejo del modelo, consultar el Manual de Usuario de la Interfase SWAT elaborado por la Ing. Carla Gavilanes en su Tesis: Construcción de escenarios para una propuesta de Redelimitación de la Reserva Ecológica El Ángel usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica. ESPE. 2004.

Gráfico 4.8: VENTANA DE INGRESO A BASES DE DATOS DEL SWAT



El gráfico 4.9. muestra la ventana de edición de la base de datos de los tipos de suelos existentes en la Subcuenca, para lo cual es necesario ingresar a la opción User Soils.

Gráfico 4.9: VENTANA DE EDICIÓN DE BASE DE DATOS DE SUELOS



Para editar la base de datos de clima se debe seleccionar la opción User Weather Stations, como se muestra en el gráfico 4.10.

Gráfico 4.10: VENTANA DE EDICIÓN DE BASE DE DATOS DE CLIMA

The screenshot shows a software window titled "User Weather stations database". It contains a list of "User Defined Weather Station" with "Izobamba" selected. Below this is a "Monthly parameters" section with radio buttons for various climate variables, with "TMP_MX" selected. The main area displays the station's name "Izobamba" and various parameters: Rain_HH (5.01 mm), Rain_6H (25 mm), Rain_YRS (11 Years), IDIST (0 Numeric), REXP (0 Exponent), LAT. (-0.36 Dec Degrees), ELEV. (3058 m), XPR (772362), and YPR (9959895). A monthly temperature table is also present, showing values for each month from Jan. (13.72) to Dec. (12.89). At the bottom, there are buttons for "Delete", "Add New [Modify]", "Add New", "Help", and "Exit".

Month	Temperature
Jan.	13.72
Feb.	13.49
Mar.	13.15
Apr.	13.07
May	12.89
Jun.	12.58
Jul.	12.15
Aug.	12.83
Sep.	12.77
Oct.	12.77
Nov.	12.57
Dec.	12.89

Si se desea editar la base de datos de Uso de Suelo, se debe acceder a la opción Land Cover/Plant Growth e ingresar las variables requeridas. Cabe aclarar que la base de datos original del modelo incluye una amplia lista con diferentes tipos de coberturas y los valores de las variables. Por esta razón durante esta investigación se utilizaron estas coberturas ya que modificar los valores con los más adecuados para el país hubiera significado un estudio demasiado costoso y extenso en tiempo.

En el cuadro 4.3. se detallan todas las variables requeridas por el modelo Swat y su nivel de importancia para las corridas. Las variables opcionales son aquellas que si no se ingresan al modelo permanecen con valores de cero. Las variables simuladas son aquellas que si el usuario no dispone de información, el modelo asigna sus valores tomando en cuenta las demás variables almacenadas, y las variables obligatorias son las que de manera indispensable el usuario debe ingresar. En la casilla denominada Prioridad se encuentran marcadas las variables que tienen mayor influencia para las diferentes corridas. Este valor de prioridad es una apreciación personal como conclusión de los resultados obtenidos.

Cuadro 4.3: VARIABLES INGRESADAS AL MODELO SWAT

VARIABLE	Opcional	Simulada	Obligatoria	Prioridad
<i>SUELOS</i>				
SNAM: Nombre del suelo			<input checked="" type="checkbox"/>	
NUMLAYER: Numero de capas que tiene el suelo			<input checked="" type="checkbox"/>	
HYGDRP: Grupo hidrológico del suelo. Depende del valor de la conductividad hidráulica.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
ALB: albedo o porcentaje de radiación solar que es reflejada por el suelo.		<input checked="" type="checkbox"/>		
USLE_K: Erodabilidad del suelo			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CRK: es el volumen potencial de grietas	<input checked="" type="checkbox"/>			
Z: profundidad de la capa arable del suelo			<input checked="" type="checkbox"/>	
BD: Densidad aparente.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
AWC: Agua aprovechable en el suelo			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
K: Conductividad hidráulica saturada			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CBN: Porcentaje de carbón orgánico o materia orgánica			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CLAY: Porcentaje de arcillas.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
SILT: Porcentaje de limos.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
SAND: Porcentaje de arenas.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
ROCK: contenido de rocas.	<input checked="" type="checkbox"/>			
NO₃: Concentración inicial de NO ₃	<input checked="" type="checkbox"/>			
<i>USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL</i>				
Crop Name: Nombre del cultivo cobertor.			<input checked="" type="checkbox"/>	
CPNM: Nombre de la cobertura del suelo y la planta.			<input checked="" type="checkbox"/>	
WAVP: descenso en la eficiencia de uso de la radiación por unidad de incremento en el déficit de presión de vapor.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
VPTH: Umbral del déficit de presión de vapor (Kpa).			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
T_OPT: Temperatura óptima para el crecimiento de las plantas.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
T_BASE: Temperatura mínima para el crecimiento de las plantas.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺

BLAI: Máximo potencial del índice de área foliar.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
IDC : Clasificación de las plantas cobertoras de la tierra			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
DLP1: Primer punto de la curva de área foliar óptimo.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
DLP2: Segundo punto óptimo de la curva de índice de área foliar.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
USLE_C: Es el factor de manejo de USLE o factor C de la cobertura.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CHTMX: Máxima altura del dosel			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
RDMX: Máxima profundidad de raíces			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
DLAI: Fracción de crecimiento estacional cuando el área foliar desciende.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
PT2: Segundo punto en la curva de uso eficiente de la radiación.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CNYLD: Fracción normal de nitrógeno en semillas			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
WSYF: límite bajo del índice de cosecha			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BN1: Parámetro de extracción de nitrógeno # 1: fracción normal de nitrógeno en la biomasa de la planta en la emergencia.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BN 2: Parámetro de extracción de nitrógeno # 2: Fracción normal de nitrógeno o nitrógeno en la biomasa de las plantas en 0.5 de maduración			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BN 3: Parámetro de extracción de nitrógeno # 3: Fracción normal de nitrógeno o nitrógeno en la biomasa de las plantas en la madurez			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BP 1: Parámetro de extracción de fósforo # 1: Fracción normal de nitrógeno o nitrógeno en la biomasa de las plantas en la emergencia			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BP 2: Parámetro de extracción de fósforo # 2: Fracción normal de nitrógeno o nitrógeno en la biomasa de las plantas en 0.5 de maduración			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
BP 3: Parámetro de extracción de fósforo # 3: Fracción normal de nitrógeno o nitrógeno en la biomasa de las plantas en la madurez			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
GSI: Máxima conductancia de estomas a alta radiación y			<input checked="" type="checkbox"/>	☺

bajo déficit de presión de vapor.				
BIO_E: Coeficiente de Biomasa-Energía.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
HVSTI: Índice de cosecha. Esto es lo que produce la planta dividido por la biomasa.			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
CLIMA				
W S Name: Nombre de la estación			<input checked="" type="checkbox"/>	
RAIN_HH: Intensidad de lluvia para una frecuencia de 10 años y una duración de media hora			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
RAIN_6H: Intensidad de lluvia para una frecuencia de 10 años y una duración de seis horas			<input checked="" type="checkbox"/>	☺
RAIN_YRS: El número de años de máxima lluvia mensual en media hora.			<input checked="" type="checkbox"/>	
LAT: Latitud de la estación (decigrados).			<input checked="" type="checkbox"/>	
ELEV: Elevación de la estación (m)			<input checked="" type="checkbox"/>	
IDIST: Código de distribución de lluvias.			<input checked="" type="checkbox"/>	
REXP: Valor de exponente para distribución de lluvia exponencial mixta.		<input checked="" type="checkbox"/>		
TMP_MX: Promedio máximo de temperatura de aire mensual			<input checked="" type="checkbox"/>	
TMP_MN: Promedio mínimo de temperatura de aire mensual			<input checked="" type="checkbox"/>	
TMP_CV: Coeficiente de variación para el promedio de temperatura por mes			<input checked="" type="checkbox"/>	
SOLAR_AV: Promedio de radiación solar para el mes		<input checked="" type="checkbox"/>		
RAIN_HHMX: Máxima media hora de lluvia para todo el periodo por mes		<input checked="" type="checkbox"/>		
PR_W1: Probabilidad de un día seco después de un día seco.	<input checked="" type="checkbox"/>			
PR_W2: Probabilidad de un día seco después de un día húmedo.	<input checked="" type="checkbox"/>			
PCPD: Promedio del número de días de precipitación en el mes.		<input checked="" type="checkbox"/>		☺
PCP_STAT1: Promedio diario de precipitación al mes			<input checked="" type="checkbox"/>	☺

PCP_STAT 2: Desviación estándar para la precipitación diaria en el mes.			<input checked="" type="checkbox"/>	
PCP_STAT 3: Coeficiente sesgado (Skew) para la precipitación diaria en el mes.			<input checked="" type="checkbox"/>	
DEWPT: Promedio de la temperatura de punto de rocío en el mes	<input checked="" type="checkbox"/>			
WND_AV: Promedio de la velocidad de viento al mes		<input checked="" type="checkbox"/>		

Una vez ingresadas las bases de datos, y con la información base y temática listas, se procede a cargar el modelo de elevación del terreno en formato GRID (Ver Mapa 9: Modelo Digital de Elevaciones de la Subcuenca del Río San Pedro), la red hídrica en formato SHAPE, y una máscara en formato GRID que delimita el espacio geográfico en el cual se van a realizar los análisis. (La red hídrica permite calibrar el modelo de simulación, ya que éste se encarga de calcularla mediante el modelo de elevación del terreno, sin embargo su ingreso es opcional, al igual que la máscara. Para este estudio sí se ingresaron estas coberturas).

El siguiente paso es definir el área (en hectáreas) mínima que contendrá los drenajes requeridos para determinar el comienzo de cada flujo, esto depende del nivel de detalle para la red de drenaje. El área utilizada fue de 100 has. Cuando el modelo procesa esta información, se crea una cobertura de puntos ubicados en cada lugar donde una quebrada o río confluye con el drenaje principal. Con estos puntos el SWAT divide a la Subcuenca en pequeñas microcuencas, con el objetivo de mejorar la exactitud en los cálculos que se realizan al interior del programa. Mediante esta subdivisión es posible calcular con mayor precisión los caudales y los sedimentos presentes. El número de puntos y microcuencas depende del criterio del usuario. Para este estudio se seleccionaron tres puntos que dieron origen a 5 microcuencas. (Ver Mapa 2: Mapa de Microcuencas de la Subcuenca del Río San Pedro).

Siguiendo con el proceso, el próximo paso consiste en cargar los mapas de uso de suelo y tipos de suelos, los dos en formato GRID.

Con toda esta información se procede a correr el modelo que procesa los datos para generar reportes de resultados en forma diaria, mensual o anual dependiendo de la configuración establecida por el usuario.

Una de las variables calculadas por Swat es el caudal diario del drenaje principal de la Subcuenca. Estos valores fueron comparados con los caudales reales medidos en la estación San Pedro en Machachi para calibrar el modelo y realizar nuevas corridas.

Esta misma metodología fue utilizada para realizar una corrida de la situación de la Subcuenca en el año de 1956. Para esto, se ingresó el mapa de uso de suelo de este año y las variables calibradas con el mapa de uso actual. Se utilizó la misma serie de datos climáticos ya que no fue posible conseguir información correspondiente a esta época.

Con la ayuda del estudio multitemporal se diseñaron tres escenarios de uso de suelo. En el primero se eliminó toda la cobertura vegetal para analizar las situaciones extremas comparando este escenario con los resultados de 1956.

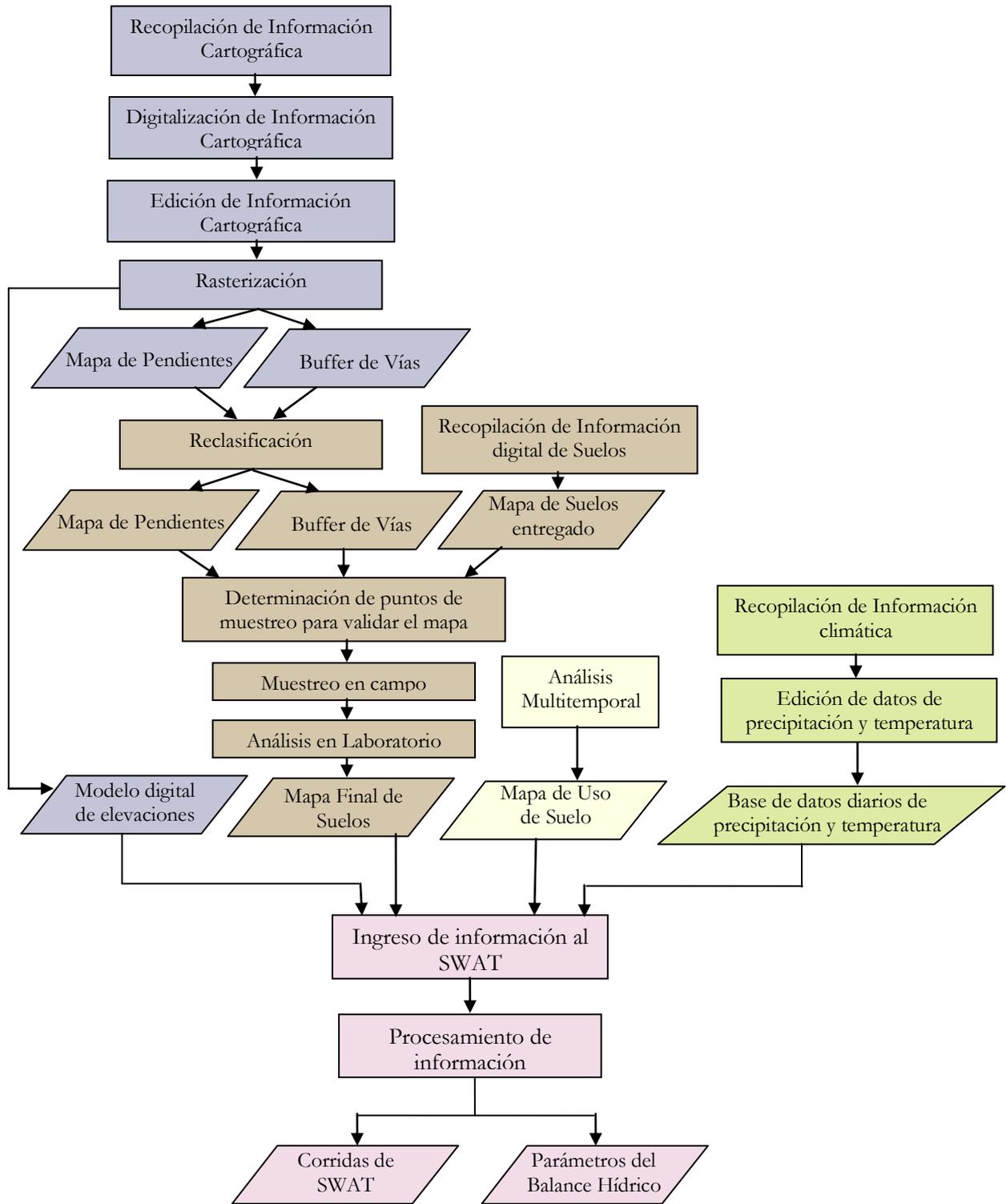
El segundo escenario consiste en una proyección de las tendencias, especialmente negativas, que ha tenido el uso de suelo en el período analizado. Es decir, se consideraron las tasas de crecimiento o decrecimiento anual de las diferentes unidades que conforman los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal para diseñar un mapa de la posible situación de la Subcuenca en un futuro de 40 años.

El tercer escenario se diseñó considerando alternativas de conservación que podría aplicar el Gobierno Local con el apoyo de la ciudadanía para mantener y mejorar la cobertura vegetal, por ejemplo, reforestación en áreas erosionadas y encañonados de quebradas, reforestación de los bosques plantados de pinos con especies nativas, detención del avance de la frontera agrícola considerando la presencia de áreas protegidas y bosques protectores, etc.

Una vez creados estos escenarios, se procedió a realizar las respectivas corridas del modelo y el análisis de los resultados.

En el Gráfico 4.11 se presenta un diagrama de flujo en el que detallan los procesos seguidos en la aplicación del modelo de simulación hídrica, y los productos obtenidos de esta metodología.

Gráfico 4.11: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA APLICACIÓN DEL SWAT



-  Información Base
-  Información de Suelos
-  Información de Uso de Suelos
-  Información de Clima
-  Aplicación SWAT
-  Proceso
-  Producto

CAPÍTULO

5

RESULTADOS

5.1. DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE USO DE SUELO

Los mapas generados mediante fotointerpretación, fueron digitalizados en el software ArcView 3.2. Utilizando las herramientas de este mismo programa, en las bases de datos de los dos mapas se cuantificaron las superficies de las unidades de uso de suelo de cada categoría de acuerdo a la leyenda temática establecida. Además se calculó el porcentaje que cada unidad de uso de suelo representa en relación a la extensión total de la Subcuenca. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1: SUPERFICIE DE LAS UNIDADES DE USO DE SUELO PARA LOS AÑOS 1956 Y 2000

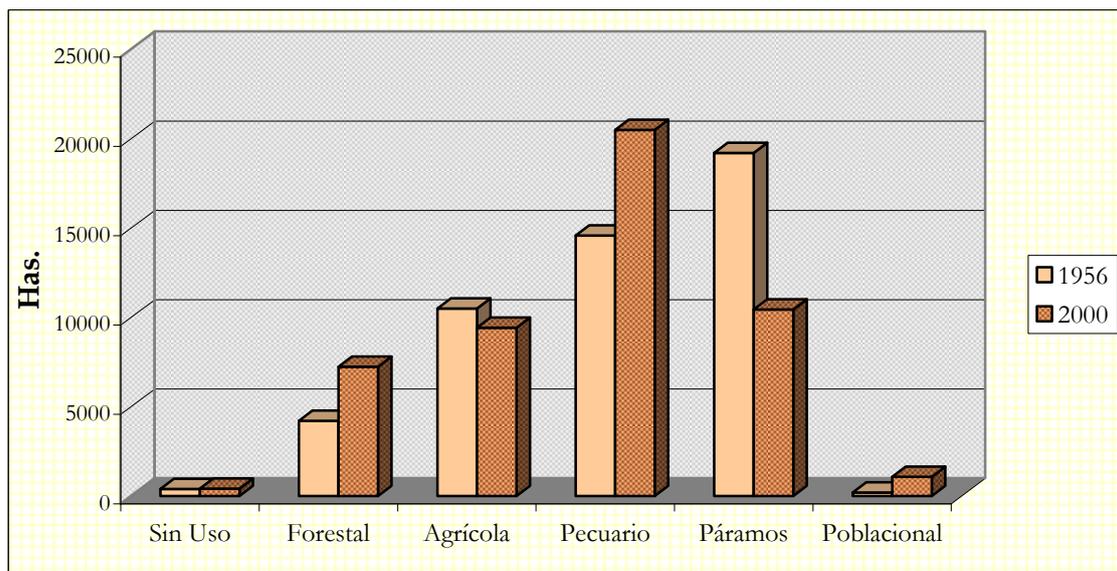
(Ver Mapa 10: Uso del Suelo de la Subcuenca del Río San Pedro en 1956; y Mapa 11: Mapa de Uso Actual del Suelo de la Subcuenca del Río San Pedro).

USO	AÑO 1956		AÑO 2000	
	HECTÁREAS	%	HECTÁREAS	%
SIN USO				
Arenales	0.000	0.00	372.964	0.76
Nieve	394.165	0.80	39.089	0.08
Total	394.165	0.80	412.053	0.84
FORESTAL				
Bosque Natural	3694.444	7.53	3205.193	6.53
Bosque Plantado	219.486	0.45	2495.090	5.09
Vegetación Arbustiva	293.124	0.60	1531.787	3.12
Total	4207.054	8.58	7232.070	14.74
AGRÍCOLA				
Cultivos	8489.343	17.31	8613.431	17.56
Cultivos/Pastos	97.092	0.20	70.535	0.14
Cultivos/Urbano	1903.373	3.88	691.969	1.41
Invernaderos	0.000	0.00	44.172	0.09
Total	10489.808	21.39	9420.107	19.20
PECUARIO				

Pastos	14469.714	29.50	11712.302	23.88
Pastos/Bosque Natural	112.775	0.23	81.325	0.17
Pastos/Cultivos	0.000	0.00	8693.108	17.72
Total	14582.489	29.73	20486.735	41.77
PÁRAMOS				
Páramo Arbustivo	642.951	1.31	528.822	1.08
Páramo de Pajonal	18554.531	37.82	9913.361	20.21
Total	19197.482	39.13	10442.183	21.29
POBLACIONAL				
Urbano	185.231	0.38	1063.081	2.17
Total	185.231	0.38	1063.081	2.17
TOTAL	49056.229	100	49056.229	100

En el gráfico 5.1. se presenta una comparación de las hectáreas ocupadas por cada categoría de uso de suelo para los dos años analizados. (Ver Mapa 12: Comparación de páramo existente en 1956 y en el 2000)

Gráfico 5.1: COMPARACIÓN DEL USO DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS 1956 Y 2000



Una vez obtenidas las áreas de las unidades de uso de suelo en los dos mapas, se procedió a realizar los cálculos de los porcentajes de crecimiento o decrecimiento y las tasas anuales de estos mismos valores. Los valores de las tasas anuales fueron obtenidos aplicando la ecuación de interés compuesto.

$$r = \sqrt[n]{\frac{Ef}{Eo}} - 1$$

Donde,

r es la tasa de crecimiento o decrecimiento anual

n es el número de años

Ef es la extensión final de la unidad de uso de suelo

Eo es la extensión inicial de la unidad de uso de suelo

Los resultados se pueden apreciar en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2: SUPERFICIES Y TASAS DE CRECIMIENTO O DECRECIMIENTO PARA LOS AÑOS 1956 Y 2000

Uso	1956 (Has)	2000 (Has)	Diferencia (Has)	Tasa de crecimiento o decrecimiento %	Tasa anual de crecimiento o decrecimiento %
SIN USO					
Arenales	0.000	372.964	372.964		
Nieve	394.165	39.089	-355.076	-90.083	-5.117
Total	394.165	412.053	17.888	4.537	0.101
FORESTAL					
Bosque Natural	3694.444	3205.193	-489.251	-13.243	-0.322
Bosque Plantado	219.486	2495.090	2275.604	1036.788	5.680
Veg. Arbustiva	293.124	1531.787	1238.663	422.573	3.830
Total	4207.054	7232.070	3025.016	71.903	1.239
AGRÍCOLA					
Cultivos	8489.343	8613.431	124.088	1.462	0.033
Cultivos/Pastos	97.092	70.535	-26.557	-27.352	-0.724
Cultivos/Urbano	1903.373	691.969	-1211.404	-63.645	-2.273
Invernaderos	0.000	44.172	44.172		
Total	10489.808	9420.107	-1069.701	-10.198	-0.244
PECUARIO					
Pastos	14469.714	11712.302	-2757.412	-19.056	-0.479
Pastos/Bos. Nat.	112.775	81.325	-31.450	-27.887	-0.740
Pastos/Cultivos	0.000	8693.108	8693.108		
Total	14582.489	20486.735	5904.246	40.489	0.776
PÁRAMOS					
Páramo Arbustivo	642.951	528.822	-114.129	-17.751	-0.443
Páramo de Pajonal	18554.531	9913.361	-8641.170	-46.572	-1.415
Total	19197.482	10442.183	-8755.299	-45.606	-1.374
POBLACIONAL					
Urbano	185.231	1063.081	877.850	473.922	4.051
Total	185.231	1063.081	877.850	473.922	4.051

El siguiente paso fue determinar el Índice de Protección Total que brinda la cobertura vegetal de cada época al suelo. El valor de este índice oscila entre 0 y 1, siendo 1

el valor máximo de protección y 0 el valor correspondiente a un suelo totalmente desprotegido.

Para realizar este cálculo se requieren las áreas de las diferentes unidades de uso de suelo y darle a cada una de ellas un valor de protección, de acuerdo a los valores establecidos por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial - CIDIAT - (Ver Anexo 3: Cuadro de Índices de Protección que caracterizan a las diferentes coberturas vegetales, CIDIAT). Los resultados de la protección del suelo para las dos épocas se resumen en los cuadros 5.3. y 5.4.

Cuadro 5.3: ÍNDICES DE PROTECCIÓN DEL USO DEL SUELO DEL AÑO 1956

USO DEL SUELO	ÁREA (Ha)	ÍNDICE DE PROTECCIÓN	ÁREA REDUCIDA (Ha)
Nieve	394.17	0.00	0.00
Bosque Natural	3650.56	1.00	3650.56
Bos. Natural/Páramo Herbáceo	43.88	0.90	39.49
Bosque Plantado	219.49	0.60	131.69
Veg. Arbustiva	293.12	0.80	234.50
Cultivos	8453.95	0.30	2536.18
Cultivos/Pastos	97.09	0.40	38.84
Cultivos/Urbano	1903.37	0.20	380.67
Cultivos/Veg. Arbustiva	35.40	0.40	14.16
Pastos	13989.95	0.60	8393.97
Pastos/Bosque Natural	112.78	0.70	78.94
Pastos/Bosque Plantado	34.31	0.50	17.16
Pastos/Veg. Arbustiva	445.46	0.60	267.27
Páramo Arbustivo	642.95	0.80	514.36
Páramo Herbáceo	18255.27	0.90	16429.74
Páramo Herbáceo/Veg. Arbustiva	299.26	0.80	239.41
Urbano	185.23	0.00	0.00
TOTAL	49056.22		32966.95

El Índice de Protección Total (IPT) se obtiene al dividir el valor de la sumatoria de las áreas reducidas, entre el valor de la sumatoria de las unidades de uso de suelo equivalente al área de la Subcuenca.

$$IPT = \frac{3296695}{4905622}$$

$$IPT = 0.672$$

Este valor nos indica que la Subcuenca en el año de 1956 tenía un Índice de Protección del 67.2% que equivale a una protección entre moderada y buena.

Cuadro 5.4: ÍNDICES DE PROTECCIÓN DEL USO DEL SUELO DEL AÑO 2000

USO DEL SUELO	ÁREA (Ha)	INDICE DE PROTECCIÓN	ÁREA REDUCIDA (Ha)
Arenales	372.96	0.00	0.00
Nieve	39.09	0.00	0.00
Bosque Natural	2518.41	1.00	2518.41
Bosque Natural/Páramo Herbáceo	686.78	0.90	618.10
Bosque Plantado	1277.78	0.60	766.67
Bosque Plantado/Cultivos	111.66	0.40	44.66
Bosque Plantado/Pastos	56.59	0.50	28.29
Bosque Plantado/Veg. arbustiva	1049.07	0.60	629.44
Vegetación Arbustiva	1472.67	0.80	1178.14
Veg. Arbustiva/Pastos	59.11	0.50	29.56
Cultivos	8613.43	0.30	2584.03
Cultivos/Pastos	70.54	0.40	28.21
Cultivos/Urbano	691.97	0.20	138.39
Invernaderos	44.17	0.50	22.08
Pastos	11712.30	0.60	7027.38
Pastos/Bosque Natural	81.33	0.70	56.93
Pastos/Cultivos	8693.10	0.40	3477.24
Páramo Arbustivo	445.86	0.80	356.69
Páramo Arbustivo/Bosque Plantado	82.96	0.80	66.37
Páramo Herbáceo	9420.63	0.90	8478.57
Páramo Herbáceo/Arenales	282.78	0.60	169.67
Páramo Herbáceo/Bosque Plantado	209.94	0.80	167.96
Urbano	1063.08	0.00	0.00
TOTAL	49056.22		28386.80

$$IPT = \frac{2838680}{4905622}$$

$$IPT = 0.579$$

En la actualidad la protección que brinda la cobertura vegetal al suelo de la Subcuenca es mediana con un 57.9%.

El análisis de los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal con sus respectivos IPT para los años de 1956 y 2000 demuestran los siguientes resultados:

- En el mapa del año 2000 se puede apreciar que el área ocupada por nieve ha disminuido en un 90% en relación con la extensión del año 1956. Estos espacios en donde la nieve ha retrocedido, han sufrido procesos de erosión y se los puede observar ahora como arenales o suelo desnudo. Por esto la categoría denominada “Sin Uso” mantiene similares porcentajes de ocupación en los dos años analizados, ya que los valores de nieve y arenales se han compensado.
- El suelo ocupado por vegetación natural no ha sufrido mayores cambios preferentemente en lugares de difícil acceso. En las zonas de fuerte pendiente y a lo largo de los encañonados de los ríos se conservan las especies arbustivas nativas ya que en estos lugares las actividades agrícolas y ganaderas difícilmente podrían desarrollarse.
- El mayor cambio producido en el uso del suelo de la Subcuenca del Río San Pedro es el excesivo aumento de bosque plantado. Las visitas al campo y la entrevista informal con los pobladores confirmaron que las dos principales razones del proceso expansivo de bosques de pino y eucalipto son por intereses económicos (venta de madera); y, el afán de contribuir con la conservación del medio ambiente desconociendo los efectos negativos de estas prácticas forestales. Comparando los mapas de uso de suelo, se puede observar que los bosques plantados han remplazado especialmente a zonas de páramo, en su mayoría en el sector del Volcán Rumiñahui.
- El uso más común de las tierras de la Subcuenca es para la agricultura y ganadería. Las actividades agrícolas se llevan a cabo en su mayoría en las áreas bajas de la Subcuenca alta, y en la Subcuenca media. Las zonas de pastos abarcan grandes extensiones de terreno y son usadas directamente para la producción pecuaria, la principal fuente de ingresos para la población.

Al comparar los dos mapas de uso de suelo, se puede determinar que en muchos casos los sectores destinados a la agricultura y ganadería se han mantenido a lo largo del tiempo, o también se pueden identificar zonas en donde una de ellas ha remplazado a la otra total o parcialmente, dejando unidades de pastos y cultivos cuya simbología en los mapas es P/C o C/P, dependiendo de la cobertura dominante.

- ✚ En las partes más altas de los volcanes Illinizas, Corazón, Rumiñahui y Pasochoa se pueden encontrar grandes extensiones de páramo, especialmente de pajonales, al igual que en la mayoría de provincias ecuatorianas en donde está presente este ecosistema. En la parte sur de la Subcuenca que corresponde a las estribaciones del Rumiñahui, también se pueden diferenciar pequeñas unidades de páramo arbustivo de características bastante propias, que pueden llevar a considerarlo como unidades de bosque primario en lugar de páramo.

En el año de 1956 los páramos representaban el 39% de la extensión de las partes alta y media de la Subcuenca, y en promedio se encontraban a partir de los 3400 msnm., llegando a ubicarse en algunos sectores desde los 3300 metros. En el año 2000 los páramos representan sólo el 21% y gran parte de ellos han sido remplazados por cultivos y pastizales, de tal manera que la frontera agrícola ha reducido el límite de los páramos a una altura de 3700 msnm en promedio.

- ✚ Como es normal, los centros urbanos también han extendido sus fronteras y han aparecido nuevas poblaciones, que aunque pequeñas, comienzan a ganar terreno y sobre todo importancia en la economía de la Subcuenca.

La ciudad principal es Machachi, cabecera cantonal de Mejía, que para el año de 1956 tenía una extensión aproximada de 106 has, para el 2000 la superficie aproximada es de 715 has. Esta población tiende a crecer principalmente hacia el noreste, aunque también se puede apreciar un alargamiento de la ciudad hacia el sur.

Aloasí, otro asentamiento humano cuyo crecimiento es notorio, está ubicado al occidente de Machachi y sus habitantes se dedican especialmente a actividades agrícolas.

Otros centros poblados que han crecido visiblemente son Alóag y El Chaupi, ubicados al norte y sur de Machachi, respectivamente.

✚ El cálculo del índice de protección del suelo por parte de la cobertura vegetal es importante porque ayuda a determinar el grado de resistencia a la erosión que ofrece la Subcuenca según sus diferentes formas de uso de suelo.

Comparando los índices de las dos épocas se puede concluir que entre 1956 y el 2000 la protección al suelo se redujo en un 13.84%. Es decir que los suelos de la Subcuenca son 13.84% más propensos a erosionarse. Estos valores serán corroborados más adelante con los resultados de la producción de sedimentos mediante el modelo hídrico Swat.

5.2. DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HÍDRICO SWAT

Una vez ingresada toda la información en el modelo, de acuerdo a la metodología explicada en el Capítulo 4, se procedió a realizar las diferentes corridas planteadas en los objetivos de la investigación. En todas las corridas se utilizó la misma información cartográfica base, de suelos y de clima. De esta manera la única variable que determina las diferencias en los resultados de los escenarios planteados es el Uso del Suelo y Cobertura Vegetal.

Es necesario aclarar que las primeras corridas se hicieron con el mapa de uso actual del suelo dado que la información de caudales reales disponible para la calibración del modelo corresponde a esta misma fecha. Las corridas para el año 1956 y para los 3 escenarios planteados se hicieron con el modelo ya calibrado.

5.2.1. Situación actual de la Subcuenca

Como se ha indicado, en esta corrida se ingresó el mapa de uso actual de suelo obtenido por fotointerpretación.

El modelo Swat genera una tabla de salida que contiene algunas variables, de las cuales se analizaron solamente Agua Producida y Producción de Sedimentos. Pero debido a que se trabajó con una serie de 11 años, y a que el reporte es diario, las tablas generadas son extensas. Por esta razón han sido adjuntadas en el CD de respaldo. En el cuadro 5.5 se pueden observar las primeras líneas del reporte de esta corrida. (Ver anexo 4: Significado de las Variables).

Cuadro 5.5: DATOS GENERADOS POR SWAT EN LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCOLATE (mm)	TILEQ (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)
1	19.10	0.25	0.11	0.00	1.09	0.00	57.56	2.39	3.61	0.35	0.11
2	14.80	2.04	0.17	0.00	1.93	0.00	65.44	2.38	3.12	2.21	0.34
3	5.20	0.35	0.17	0.00	0.82	0.00	66.92	2.38	3.14	0.52	0.01
4	9.90	1.06	0.20	0.00	1.43	0.00	71.35	2.60	3.25	1.25	0.06
5	3.80	0.12	0.18	0.00	0.53	0.00	71.69	2.71	3.49	0.30	0.01
6	11.30	1.09	0.21	0.00	1.51	0.00	77.32	2.64	3.20	1.30	0.09
7	0.30	0.01	0.18	0.00	0.23	0.00	75.59	1.79	2.99	0.19	0.00
8	0.00	0.00	0.15	0.00	0.06	0.00	73.02	2.52	5.59	0.15	0.00
9	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	71.39	1.63	4.59	0.13	0.00
10	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	69.49	1.89	5.82	0.11	0.00
11	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	67.90	1.59	5.37	0.10	0.00
12	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	66.16	1.74	6.36	0.08	0.00

Esta tabla fue editada en Excel y procesada en ArcView 3.2 con la herramienta Summarize para generar resúmenes mediante los promedios de los valores de Percolate (Agua infiltrada), SW (Humedad del Suelo), ET (Evapotranspiración), Water Yield (Agua Producida) y Sed Yield (Sedimentos Producidos). A excepción de los sedimentos producidos, todas estas variables se encuentran en mm. Por ello los datos de agua producida fueron transformados a caudales (m³/seg) para poder compararlos con los caudales reales y realizar la calibración. Para esto fue necesario el dato de la superficie del

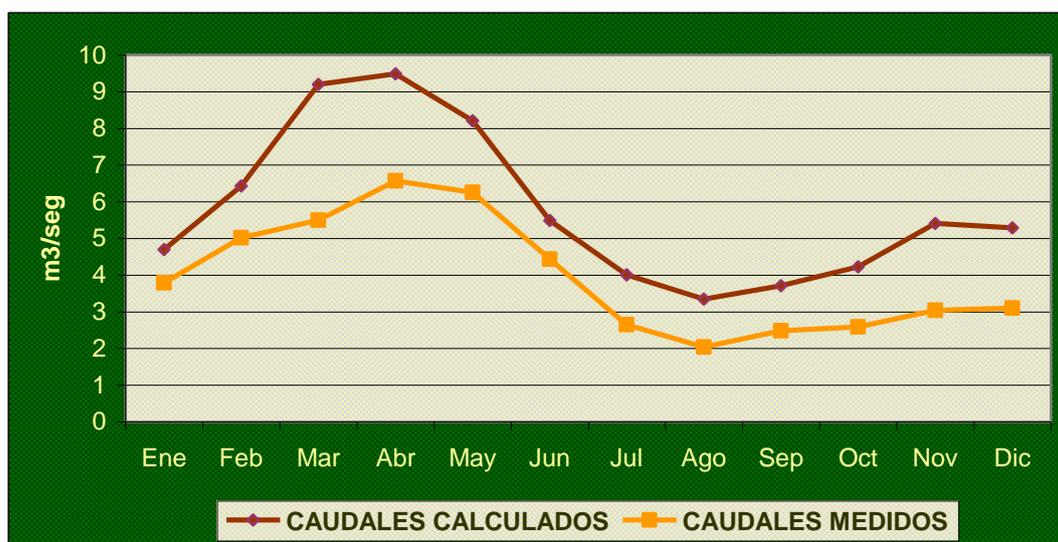
área de estudio que es igual a 490.56 km². En el cuadro 5.6 se muestran los valores de caudales calculados por Swat en mm y sus correspondientes en m³/seg.

Cuadro 5.6: DATOS DE CAUDALES POR MESES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

MES	CAUDALES CALCULADOS (mm)	CAUDALES CALCULADOS (m ³ /seg)
Enero	0.8289	4.693348844
Febrero	1.1346	6.42426541
Marzo	1.6251	9.20154567
Abril	1.6756	9.487483801
Mayo	1.4494	8.206707461
Junio	0.9694	5.488879683
Julio	0.7073	4.004832473
Agosto	0.5913	3.348024094
Septiembre	0.6558	3.713232201
Octubre	0.7461	4.224523552
Noviembre	0.9560	5.413006991
Diciembre	0.9332	5.283910171

Estos valores, junto con los valores de caudales reales fueron graficados en Excel para validar el modelo.

Gráfico 5.2: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS Y CAUDALES REALES POR MESES

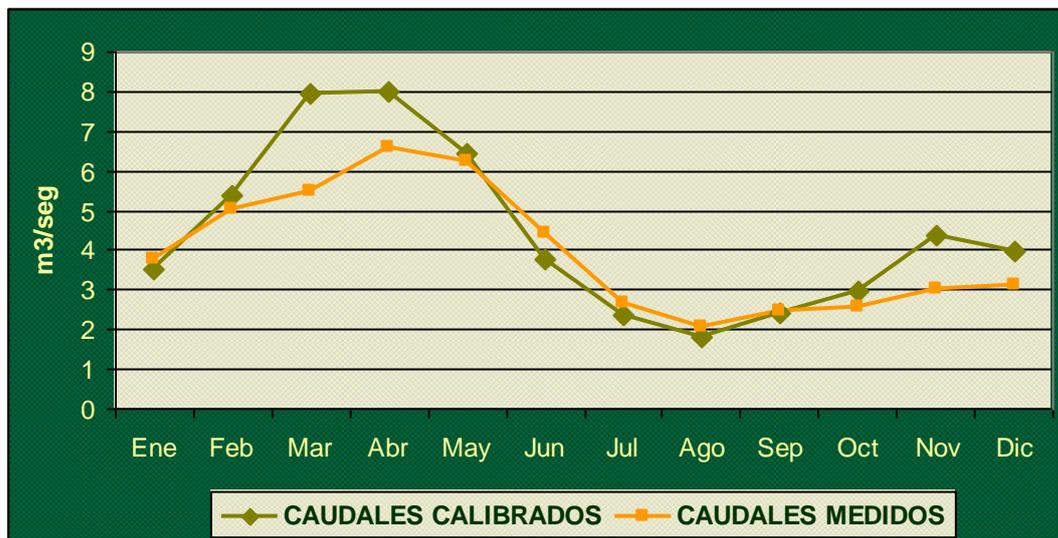


Como puede verse en el gráfico, las curvas guardan estrecha semejanza entre sí. Sin embargo es claro que los caudales generados por el modelo se encuentran sobrevalorados. Comparando mes a mes la diferencia existente entre los dos valores de las curvas y sacando

luego un promedio, se determinó que los datos simulados exceden en un 40% a los datos reales medidos en la estación hidrométrica. Por esto, el siguiente paso fue calibrar el modelo de tal manera que la curva de los caudales calculados se ajuste a la curva de los caudales reales. Como se indicó en el Capítulo 2, en las bases teóricas del modelo Swat, cuando las curvas tienen forma semejante pero caudales sobrevalorados, se ajusta la variable interna del modelo denominada GWDAY, que contiene el número de días que el agua que ingresa a la Subcuenca se demora en salir nuevamente a la superficie terrestre.

Los resultados de este proceso se muestran en el Gráfico 5.3.

Gráfico 5.3: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS CALIBRADOS Y CAUDALES REALES POR MESES



Es necesario aclarar que se hicieron varias pruebas de calibración, siendo ésta la que mejor ajusta los valores calculados con aquellos medidos en campo por la estación hidrométrica. Los valores calibrados se ajustan en un 90% a los valores reales, siendo éste el nivel de confiabilidad asignado en este estudio.

Analizando el gráfico 5.3 y comparándolo con el diagrama ombrotérmico explicado en el Capítulo 3, se puede determinar que el caudal de salida de la Subcuenca tiene relación con el agua que ingresa a través de las precipitaciones. De esta manera se puede decir que en la zona de estudio existe una época lluviosa entre los meses de febrero y mayo, y otra

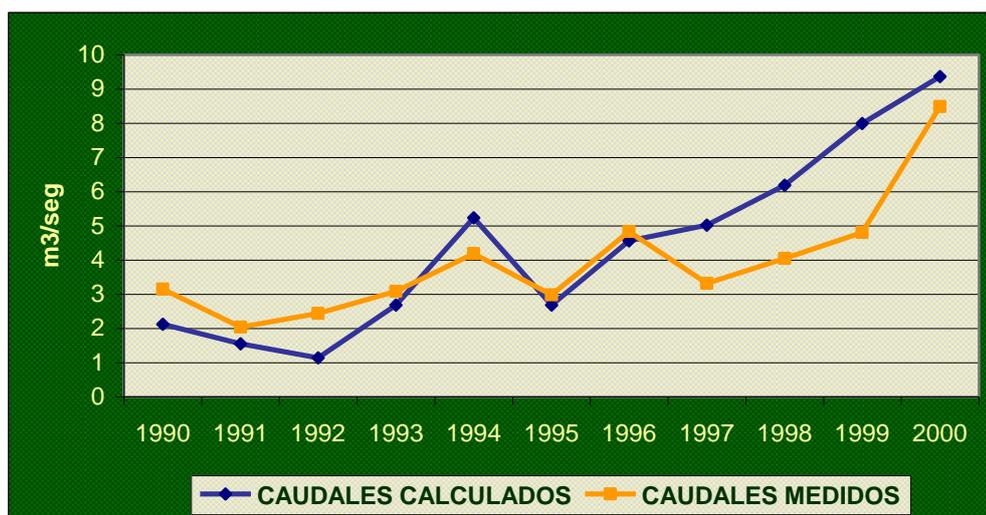
entre los meses de octubre y diciembre; mientras que la época seca está comprendida entre los meses de julio y septiembre.

De la misma manera se procedió a realizar un gráfico que resume el promedio multianual de los caudales diarios, con los datos simulados y reales; los resultados se muestran en el cuadro 5.7, y en el gráfico 5.4.

Cuadro 5.7: DATOS DE CAUDALES POR AÑOS PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

AÑO	CAUDALES CALCULADOS m ³ /seg	CAUDALES MEDIDOS m ³ /seg
1990	2.1244	3.1514
1991	1.5486	2.0401
1992	1.1415	2.4423
1993	2.6799	3.0795
1994	5.2290	4.1913
1995	2.6782	2.9778
1996	4.5614	4.8276
1997	5.0201	3.3181
1998	6.1910	4.0447
1999	7.9938	4.8074
2000	9.3657	8.4822

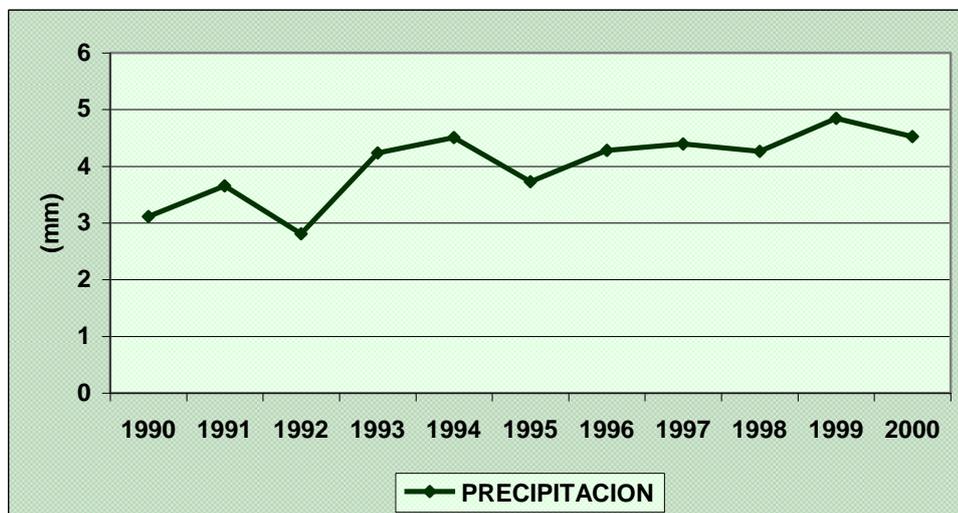
Gráfico 5.4: COMPARACIÓN DE CAUDALES CALCULADOS CALIBRADOS Y CAUDALES REALES POR AÑOS



Como se puede apreciar, en los años 1994 y 1996 hubo un considerable aumento de caudales. Para verificar la coherencia de las curvas obtenidas en el gráfico 5.3 se procedió a

realizar un gráfico del promedio diario multianual de las precipitaciones medidas en la estación Izobamba.

Gráfico 5.5: PROMEDIOS DIARIOS MULTIANUALES DE LAS PRECIPITACIONES MEDIDAS EN LA ESTACIÓN IZOBAMBA



Comparando el gráfico 5.4. de caudales y el gráfico 5.5 de precipitaciones, se puede ver que sus tendencias coinciden, especialmente en los primeros años. Por ejemplo en el año 1992 se registraron las menores precipitaciones dentro de la serie de datos. Haciendo una simulación de los caudales para ese mismo año, considerando que hubiera tenido el mismo uso de suelo del 2000, también registra el menor valor de la serie.

En 1994 se registran las mayores precipitaciones y los mayores caudales. Este pico en la gráfica puede ser explicado si se aclara que en este año se presentó el Fenómeno de El Niño, evento natural caracterizado por la presencia de lluvias torrenciales.

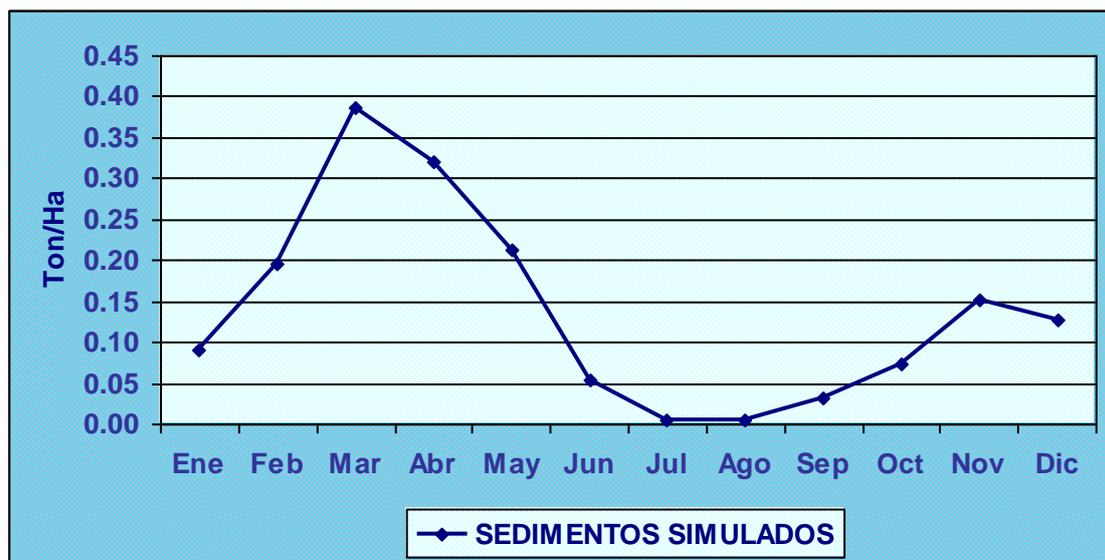
A continuación se procedió a realizar los promedios para los valores de sedimentos. Considerando que no se tienen valores reales de la producción de sedimentos en la Subcuenca, no fue posible calibrar el modelo para esta variable; sin embargo, es posible realizar comparaciones entre los sedimentos generados en cada escenario, tomando en cuenta que el margen de error que podría existir se mantendría para todos ellos.

En el cuadro 5.8 y en los gráficos 5.6, se muestran los valores de sedimentos para el análisis de la situación actual de la Subcuenca, en promedios mensuales.

Cuadro 5.8: SEDIMENTOS POR MESES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

MES	SEDIMENTOS Ton/Ha
Enero	0.0913
Febrero	0.1965
Marzo	0.3853
Abril	0.3203
Mayo	0.2136
Junio	0.0527
Julio	0.0047
Agosto	0.0037
Septiembre	0.0328
Octubre	0.0727
Noviembre	0.1508
Diciembre	0.1274

Gráfico 5.6: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS MENSUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA



En este gráfico se puede apreciar claramente que los meses Marzo, Abril y Mayo presentan una elevada producción de sedimentos, además de ser los meses con mayor cantidad de precipitación de acuerdo a los datos climáticos. Esto nos indica que en estos meses la cantidad de agua de lluvia que cae en la Subcuenca aumenta, pero esta agua no puede ser almacenada por la alteración de la vegetación, y se escurre totalmente,

arrastrando las partículas del suelo que se encuentra cada vez más desnudo. Es por esto que en este período se registran los mayores caudales y la mayor cantidad de sedimentos.

Para interpretar los resultados de la producción de sedimentos y determinar el estado de erosión de la Subcuenca ha sido necesario comparar los datos simulados por el modelo con el Aporte de Sedimentos y Erosión Actual establecido por el CIDIAT, el cual se muestra en el Cuadro 5.9.

Cuadro 5.9: CUADRO DE APORTE DE SEDIMENTOS Y EROSIÓN ACTUAL (CIDIAT)

APORTE DE SEDIMENTOS m ³ /km ² /año	EROSION ACTUAL
0 – 100	Insignificante
100 – 200	Muy Baja
200 – 500	Baja
500 – 1000	Mediana
1000 – 2000	Alta
> 2000	Muy Alta

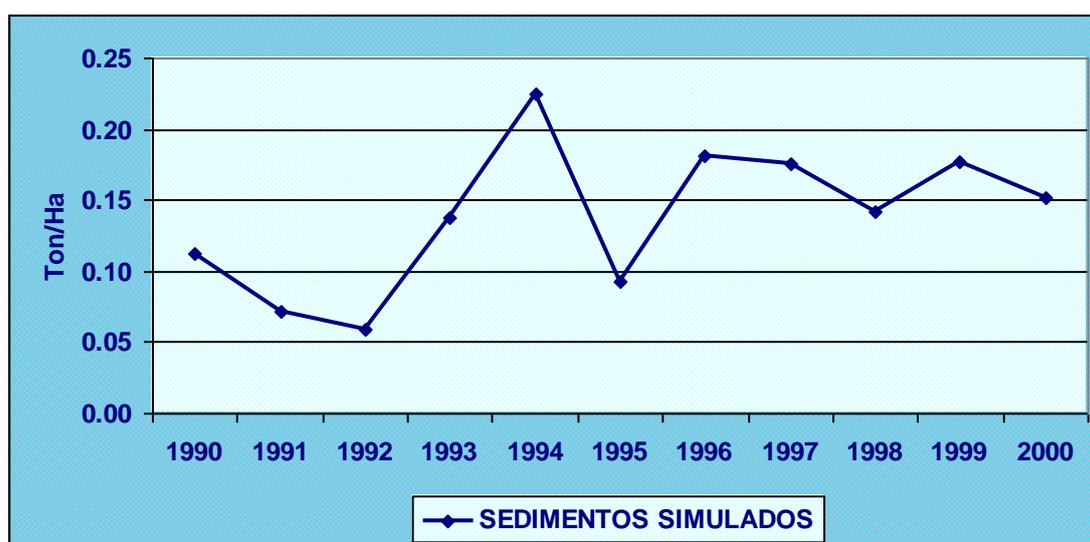
Sacando un promedio de los valores mostrados en el Cuadro 5.8, se puede decir que la Subcuenca tiene una producción de sedimentos igual a 0.1377 Ton/Ha/día. Transformando este valor a m³/km²/año, utilizando el valor de 1.3 gr/cm³ como la densidad aparente promedio de los suelos volcánicos, se obtiene que el aporte de sedimentos de la Subcuenca del Río San Pedro es de 3864.788 m³/km²/año. Como se puede ver, este dato está muy por encima de la última categoría de erosión actual, lo que resulta una situación muy preocupante que requiere medidas urgentes de remediación.

A continuación, se procesaron los datos de sedimentos con la finalidad de obtener los promedios de la producción de sedimentos por años. Estos resultados son mostrados en el Cuadro 5.10 y en el Gráfico 5.7.

Cuadro 5.10: DATOS DE SEDIMENTOS DIARIOS MULTIANUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

AÑO	SEDIMENTOS Ton/Ha
1990	0.1126
1991	0.0723
1992	0.0591
1993	0.1373
1994	0.2242
1995	0.0923
1996	0.1810
1997	0.1758
1998	0.1416
1999	0.1769
2000	0.1519

Gráfico 5.7: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS DIARIOS MULTIANUALES PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA



Uno de los aspectos planteados en esta investigación fue analizar el balance hídrico que el modelo realiza respecto a la entrada, salida y almacenamiento de agua en la Subcuenca. Para esto se seleccionaron 7 de las 11 variables calculadas por Swat, cuyos valores son mostrados en el Cuadro 5.11.

**Cuadro 5.11: DATOS DE LAS VARIABLES UTILIZADAS POR SWAT
PARA REALIZAR EL BALANCE HÍDRICO**

MES	PRECI	SURQ	LATQ	GWQ	PERCOLATE	ET	WATER YIELD
	Precipitación	Escorrentía	Flujo Lateral	Flujo retorno	Percolación	Evapotransp.	Caudal
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
Enero	3.801	0.219	0.155	0.251	0.792	2.384	0.625
Febrero	5.495	0.485	0.229	0.239	1.691	2.851	0.953
Marzo	6.499	0.854	0.269	0.283	2.121	2.971	1.407
Abril	6.737	0.736	0.303	0.371	2.431	2.896	1.410
Mayo	4.894	0.457	0.231	0.448	1.462	2.295	1.136
Junio	2.377	0.102	0.105	0.456	0.351	1.361	0.664
Julio	1.004	0.005	0.041	0.371	0.024	0.563	0.417
Agosto	1.145	0.004	0.038	0.276	0.031	0.796	0.318
Septiembre	3.074	0.083	0.088	0.257	0.242	2.405	0.427
Octubre	4.363	0.175	0.132	0.216	0.448	3.392	0.523
Noviembre	4.735	0.342	0.187	0.239	1.213	2.754	0.768
Diciembre	3.961	0.271	0.157	0.271	0.872	2.390	0.698

En un balance hídrico tenemos que:

$$\text{Agua de Salida} = \text{Agua de Entrada} - \text{Agua Almacenada}$$

De las variables mostradas en el Cuadro 5.11, tenemos que el agua de entrada está representada por la precipitación en milímetros que ingresa en la Subcuenca, estos datos son los promedios de los valores ingresados de la estación meteorológica Izobamba. El agua almacenada está representada por la Percolación (mm.), es decir el agua que llega a los acuíferos profundos y que no alimenta el escurrimiento. El agua de salida está representada por la suma del agua producida o caudal en milímetros (igual a la sumatoria de la escorrentía, flujo lateral y flujo de retorno) más la evapotranspiración, es decir el agua que se pierde porque es enviada hacia la atmósfera a través de la transpiración de las plantas y por el agua del suelo que se ha evaporado.

Entonces un resumen del balance hídrico de la Subcuenca del Río San Pedro es mostrado en el cuadro 5.12.

Cuadro 5.12: BALANCE HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO

MES	AGUA DE ENTRADA	AGUA ALMACENADA		AGUA DE SALIDA			
	Precipitación	Percolación	%	Evapotransp.	%	Caudal	%
	mm.	mm.		mm.		mm.	
Enero	3.801	0.792	20.83	2.384	62.74	0.625	16.43
Febrero	5.495	1.691	30.77	2.851	51.89	0.953	17.34
Marzo	6.499	2.121	32.64	2.971	45.71	1.407	21.65
Abril	6.737	2.431	36.09	2.896	42.98	1.410	20.93
Mayo	4.894	1.462	29.87	2.295	46.90	1.136	23.22
Junio	2.377	0.351	14.77	1.361	57.28	0.664	27.96
Julio	1.004	0.024	2.41	0.563	56.02	0.417	41.57
Agosto	1.145	0.031	2.70	0.796	69.51	0.318	27.79
Septiembre	3.074	0.242	7.87	2.405	78.25	0.427	13.89
Octubre	4.363	0.448	10.28	3.392	77.73	0.523	11.99
Noviembre	4.735	1.213	25.62	2.754	58.16	0.768	16.22
Diciembre	3.961	0.872	22.02	2.390	60.35	0.698	17.63

Como puede apreciarse en este cuadro, la mayor parte del agua que ingresa en la Subcuenca regresa a la atmósfera por la evapotranspiración. Si hacemos un promedio del porcentaje de los caudales mensuales y del agua almacenada, tenemos que alrededor del 21.38% del agua que entra en la Subcuenca, corre por los cauces de los ríos y está disponible para los habitantes; mientras que un 19.66% es almacenada para las épocas secas.

5.2.2. Situación de la Subcuenca en 1956

Como se pudo observar en los resultados del análisis multitemporal las principales características del uso del suelo para el año de 1956 fueron la mayor presencia de páramo herbáceo, mayor cantidad de bosque natural, menor extensión de bosque plantado de pino, menor superficie de los centros urbanos, y predominio de los terrenos para agricultura (cultivos) sobre los terrenos para ganadería (pastizales).

Bajo estas condiciones se realizó la corrida en el modelo Swat, y los resultados se presentan a continuación en el cuadro 5.13.

Cuadro 5.13: DATOS GENERADOS POR SWAT PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956

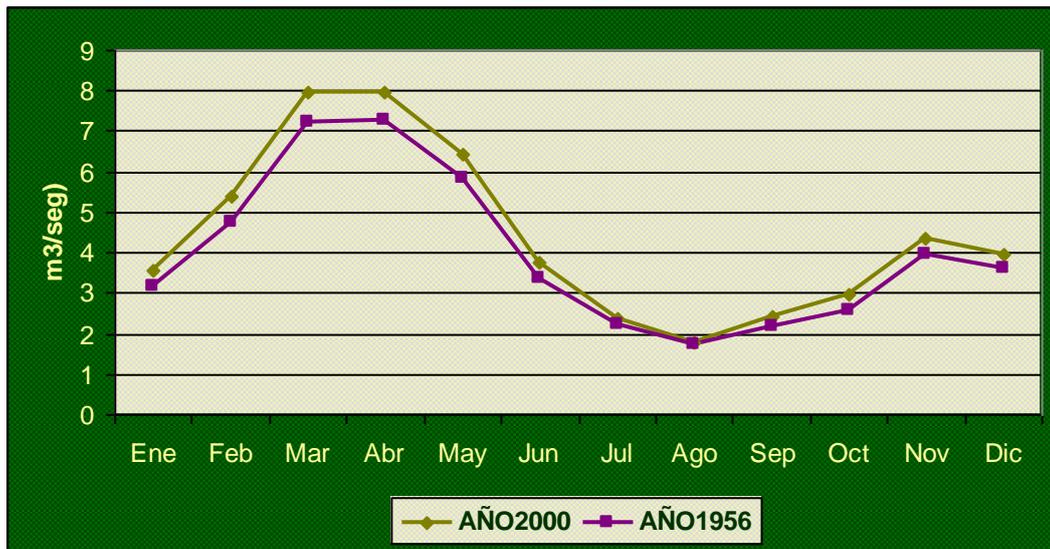
UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCOLATE (mm)	TILEQ (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)
1	5.10	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	42.87	1.41	3.20	0.02	0.00
2	19.10	0.12	0.11	0.00	1.23	0.00	57.54	2.39	3.61	0.23	0.02
3	14.80	1.86	0.18	0.00	2.12	0.00	65.39	2.38	3.12	2.03	0.12
4	5.20	0.35	0.17	0.00	0.82	0.00	66.87	2.38	3.14	0.52	0.01
5	9.90	1.01	0.20	0.00	1.48	0.00	71.30	2.60	3.25	1.21	0.04
6	3.80	0.12	0.19	0.00	0.53	0.00	71.64	2.71	3.49	0.30	0.00
7	11.30	1.04	0.22	0.00	1.59	0.00	77.23	2.64	3.20	1.26	0.06
8	0.30	0.01	0.19	0.00	0.23	0.00	75.50	1.78	2.99	0.20	0.00
9	0.00	0.00	0.16	0.00	0.06	0.00	72.93	2.51	5.59	0.16	0.00
10	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	71.30	1.63	4.59	0.13	0.00
11	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	69.41	1.89	5.82	0.11	0.00
12	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	67.83	1.59	5.37	0.10	0.00

Del procesamiento de esta tabla se obtuvo el promedio diario por meses de las variables de agua producida (mm) y sedimentos producidos (ton/ha). Los resultados son mostrados en los siguientes cuadros y gráficos, mediante una comparación con los obtenidos en la corrida para la situación actual de la Subcuenca.

Cuadro 5.14: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000

MES	AÑO1956 (m³/seg)	AÑO2000 (m³/seg)
Enero	3.16060722	3.536573396
Febrero	4.726189263	5.393755711
Marzo	7.243577242	7.964934031
Abril	7.252070454	7.982486669
Mayo	5.821813586	6.434457264
Junio	3.355384877	3.761926616
Julio	2.220125566	2.363377738
Agosto	1.707135573	1.801127117
Septiembre	2.198043215	2.416601866
Octubre	2.588164744	2.962432278
Noviembre	3.979352838	4.349656873
Diciembre	3.588665095	3.953306988

Gráfico 5.8: COMPARACIÓN DE CAUDALES MENSUALES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000



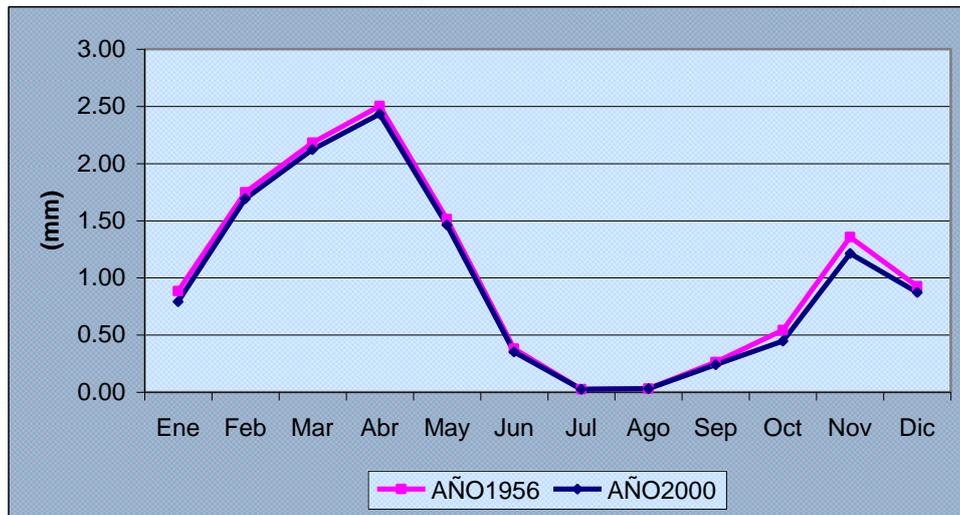
Si se observa el gráfico, a primera vista resultará un poco difícil entender por qué la curva para los caudales del año 1956 tienen valores inferiores a la curva del año 2000, considerando que para la primera fecha hay una mayor extensión de cobertura vegetal.

La explicación para ello es que la función de los páramos es almacenar el agua, brindar protección al suelo y alimentar las fuentes subterráneas. Para confirmar este concepto es necesario analizar las curvas de infiltración de agua y producción de sedimentos, presentados en el Cuadro 5.15 y en el Gráfico 5.9.

Cuadro 5.15: DATOS DE AGUA INFILTRADA PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000

MES	AÑO1956 (mm)	AÑO2000 (mm)
Enero	0.8842	0.7915
Febrero	1.7481	1.6908
Marzo	2.1818	2.1214
Abril	2.5013	2.4313
Mayo	1.5124	1.4620
Junio	0.3799	0.3510
Julio	0.0242	0.0242
Agosto	0.0309	0.0309
Septiembre	0.2631	0.2418
Octubre	0.5436	0.4484
Noviembre	1.3558	1.2130
Diciembre	0.9266	0.8723

Gráfico 5.9: COMPARACIÓN DE INFILTRACIÓN POR MESES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000



Como se puede ver en los gráficos, comparando los resultados de 1956 y 2000 se puede concluir que en 1956, cuando existía mayor cobertura vegetal, existen menores caudales que en el 2000. Pero de acuerdo a los datos generados por el modelo, en 1956 la infiltración de agua es mayor que en el 2000, es decir existía mayor capacidad de almacenamiento de agua.

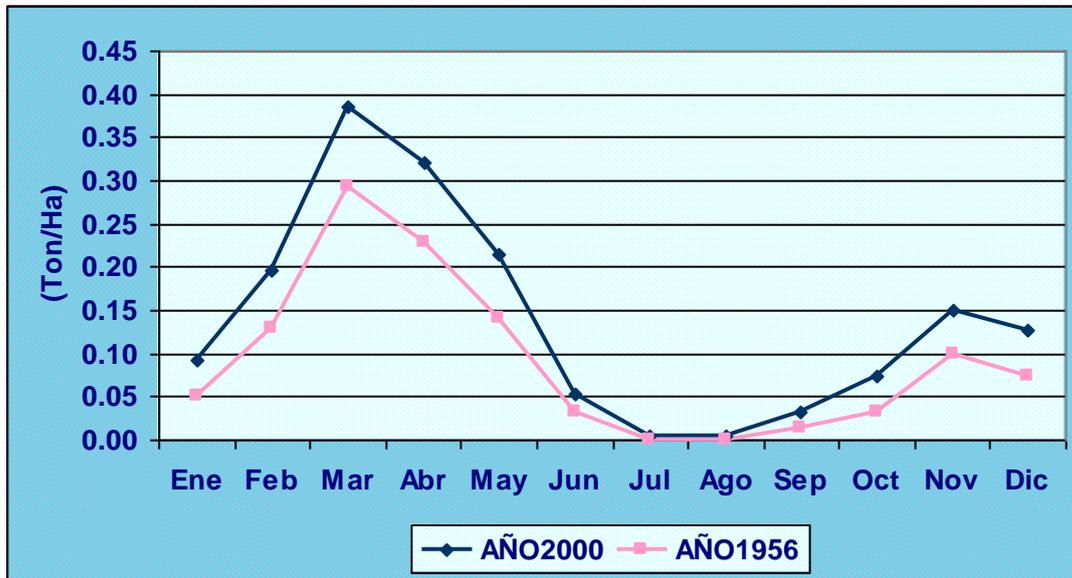
El siguiente paso fue calcular los promedios mensuales de los datos de sedimentos para 1956 y seguir el mismo procedimiento utilizado en la corrida para la situación actual de la Subcuenca. Los resultados son mostrados en el Cuadro 5.16 y en el Gráfico 5.10, comparándolos con los resultados del 2000.

Cuadro 5.16: DATOS DE SEDIMENTOS PARA LA SITUACIÓN DE LA SUBCUENCA EN EL AÑO 1956 Y 2000

MES	AÑO1956 (Ton/Ha)	AÑO2000 (Ton/Ha)
Enero	0.0519	0.0913
Febrero	0.1303	0.1965
Marzo	0.2934	0.3853
Abril	0.2292	0.3203
Mayo	0.1402	0.2136
Junio	0.0318	0.0527
Julio	0.0006	0.0047
Agosto	0.0003	0.0037
Septiembre	0.0127	0.0328

Octubre	0.0317	0.0727
Noviembre	0.0996	0.1508
Diciembre	0.0747	0.1274

Gráfico 5.10: COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS POR MESES DE LOS AÑOS 1956 Y 2000



Para la corrida de 1956 y para las corridas de los escenarios mostrados a continuación no se realizaron los análisis de sedimentos- erosión ni de balance hídrico, debido a que la información climática pertenece a otras fechas, y en estas condiciones los resultados de las diferentes variables generadas por Swat sólo son referenciales y permiten realizar comparaciones, pero no reflejan la realidad de dichos escenarios.

Luego de comparar los resultados obtenidos en las corridas con el Mapa de Uso Actual del Suelo y con el Mapa de Uso de Suelo de 1956, se pudieron obtener las primeras conclusiones que son resumidas en el Cuadro 5.17.

Cuadro 5.17: CUADRO GENERAL COMPARATIVO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS POR SWAT EN LOS AÑOS 1956 Y 2000

AÑOS	Cantidad de Cobertura Vegetal	Protección que brinda al suelo	Agua Infiltrada	Caudal	Producción de Sedimentos
1956	>	>	>	<	<
2000	<	<	<	>	>

5.2.3. Primer Escenario: Simulación de la Subcuenca para un uso de suelo sin cobertura vegetal.

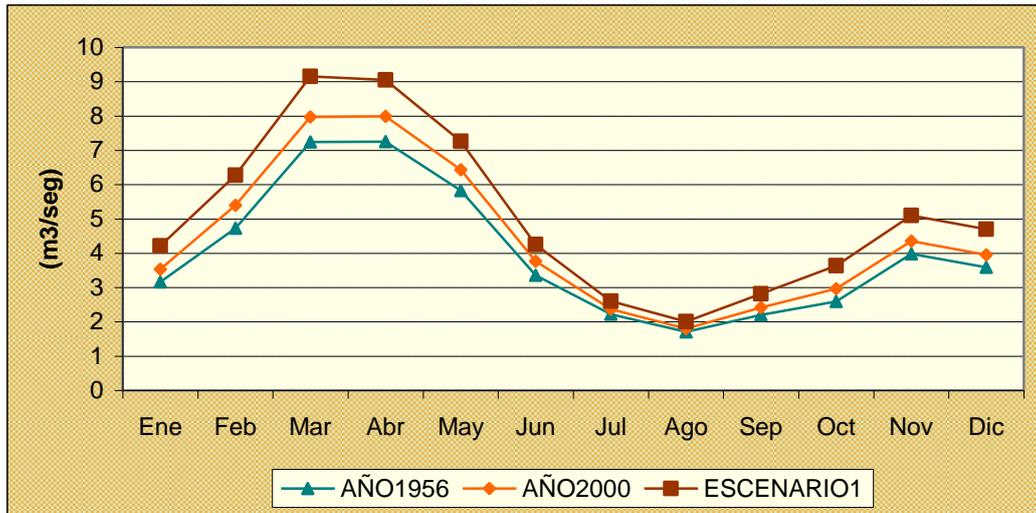
Una de las ventajas que ofrece el modelo hídrico Swat es la posibilidad de crear escenarios modificando las variables de ingreso. Antes de crear un posible escenario futuro de uso del suelo como resultado del estudio multitemporal, fue importante establecer los límites máximos y mínimos de caudales, infiltración y producción de sedimentos que se podrían obtener bajo las condiciones de la Subcuenca. El primer límite equivale a la corrida para 1956, debido a que es cuando más cantidad de páramo se puede tener, ya que es un tipo de vegetación irrecuperable.

El segundo límite corresponde a un escenario en el que se considere perdida toda la cobertura vegetal, es decir páramos y bosques naturales. (Ver Mapa 13: Mapa de Uso de Suelo – Escenario 1). Los resultados de este escenario se presentan a continuación, junto con los de 1956 y con los de la situación actual de la Subcuenca.

Cuadro 5.18: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 1, Y LOS AÑOS 1956 Y 2000.

MES	AÑO1956	AÑO2000	ESCENARIO1
	(m3/seg)	(m3/seg)	(m3/seg)
Enero	3.16060722	3.536573396	4.212633056
Febrero	4.726189263	5.393755711	6.274784882
Marzo	7.243577242	7.964934031	9.148887757
Abril	7.252070454	7.982486669	9.053197571
Mayo	5.821813586	6.434457264	7.257166381
Junio	3.355384877	3.761926616	4.253400472
Julio	2.220125566	2.363377738	2.602320097
Agosto	1.707135573	1.801127117	1.999302059
Septiembre	2.198043215	2.416601866	2.811819322
Octubre	2.588164744	2.962432278	3.63056494
Noviembre	3.979352838	4.349656873	5.097059512
Diciembre	3.588665095	3.953306988	4.6956137

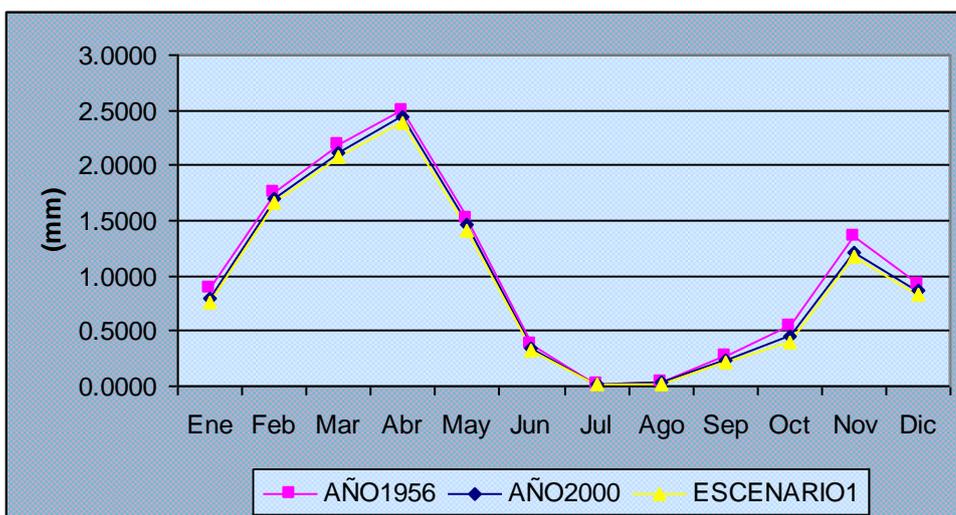
Gráfico 5.11: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.



Cuadro 5.19: DATOS DE AGUA INFILTRADA PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.

MES	AÑO1956 (mm)	AÑO2000 (mm)	ESCENARIO1 (mm)
Enero	0.8842	0.7915	0.7570
Febrero	1.7481	1.6908	1.6576
Marzo	2.1818	2.1214	2.0871
Abril	2.5013	2.4313	2.3881
Mayo	1.5124	1.4620	1.4145
Junio	0.3799	0.3510	0.3207
Julio	0.0242	0.0242	0.0194
Agosto	0.0309	0.0309	0.0244
Septiembre	0.2631	0.2418	0.2123
Octubre	0.5436	0.4484	0.3949
Noviembre	1.3558	1.2130	1.1672
Diciembre	0.9266	0.8723	0.8288

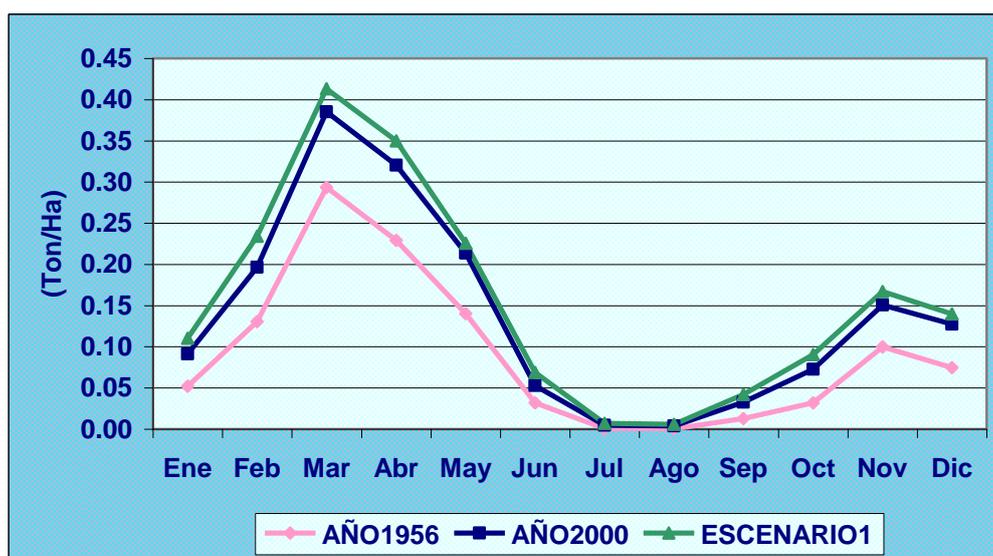
Gráfico 5.12: AGUA INFILTRADA PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.



Cuadro 5.20: DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.

MES	AÑO1956 (Ton/Ha)	AÑO2000 (Ton/Ha)	ESCENARIO1 (Ton/Ha)
Enero	0.0519	0.0913	0.1102
Febrero	0.1303	0.1965	0.2343
Marzo	0.2934	0.3853	0.4130
Abril	0.2292	0.3203	0.3497
Mayo	0.1402	0.2136	0.2257
Junio	0.0318	0.0527	0.0686
Julio	0.0006	0.0047	0.0068
Agosto	0.0003	0.0037	0.0058
Septiembre	0.0127	0.0328	0.0420
Octubre	0.0317	0.0727	0.0906
Noviembre	0.0996	0.1508	0.1670
Diciembre	0.0747	0.1274	0.1396

Gráfico 5.13: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL ESCENARIO 1, PARA 1956 Y PARA EL 2000.



Como se dijo anteriormente, cuando la cobertura vegetal disminuye aparentemente los caudales aumentan, esto se debe a que el agua que ingresa a la Subcuenca como precipitación se infiltra en menores cantidades y por lo tanto no existe almacenamiento; en su lugar el agua fluye arrastrando mayores cantidades de sedimentos que aceleran los procesos erosivos del suelo. La gráfica de sedimentos muestra que la curva para la situación actual está muy cerca de la curva para el escenario con la situación más crítica posible. Este

es un resultado negativo porque significa que los suelos de la Subcuenca se encuentran en un acelerado proceso de degradación producto del impacto de las malas prácticas agrícolas y ganaderas.

Para generalizar las conclusiones de la aplicación del modelo Swat en los diferentes escenarios, puede decirse que para una Subcuenca:

Cuadro 5.21: CUADRO COMPARATIVO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS POR SWAT EN DIFERENTES CONDICIONES DE USO DE SUELO

	Protección que brinda al suelo	Agua Infiltrada	Caudal	Producción de Sedimentos
Con cobertura vegetal	>	>	<	<
Sin cobertura vegetal	<	<	>	>

5.2.4. Segundo Escenario: Simulación de la Subcuenca para una proyección aproximada de 45 años

Tomando en cuenta que el período de tiempo comprendido entre las dos fechas comparadas en el estudio multitemporal fue de 44 años, el segundo escenario podría considerarse una proyección para un tiempo similar, ya que se procuraron mantener las mismas tasas de decrecimiento de los páramos y de los bosques naturales y por ende el crecimiento de las zonas de cultivos y pastos, así como también los lugares hacia donde los sectores urbanos tienden a expandirse. Para visualizar el mapa de uso de suelo de este escenario, Ver Mapa 14: Uso del Suelo – Escenario 2.

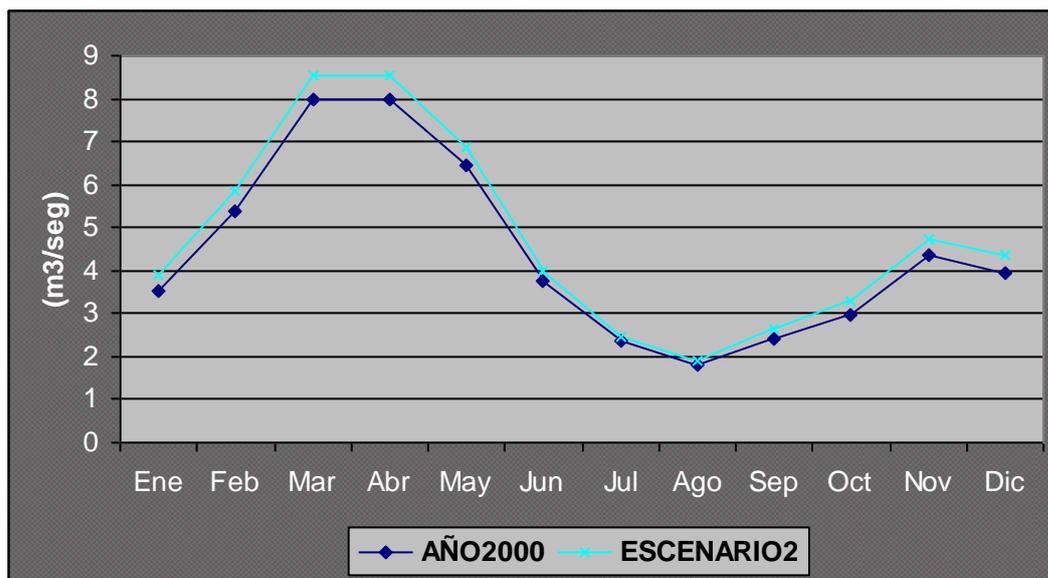
Los resultados del segundo escenario son:

Cuadro 5.22: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000.

MES	AÑO1956 (m3/seg)	AÑO2000 (m3/seg)	ESCENARIO1 (m3/seg)	ESCENARIO2 (m3/seg)
Enero	3.16060722	3.536573396	4.212633056	3.882530223
Febrero	4.726189263	5.393755711	6.274784882	5.850124292
Marzo	7.243577242	7.964934031	9.148887757	8.536244079
Abril	7.252070454	7.982486669	9.053197571	8.552664288
Mayo	5.821813586	6.434457264	7.257166381	6.875538064

Junio	3.355384877	3.761926616	4.253400472	4.012759471
Julio	2.220125566	2.363377738	2.602320097	2.472657064
Agosto	1.707135573	1.801127117	1.999302059	1.903045659
Septiembre	2.198043215	2.416601866	2.811819322	2.622137591
Octubre	2.588164744	2.962432278	3.63056494	3.304991821
Noviembre	3.979352838	4.349656873	5.097059512	4.717129837
Diciembre	3.588665095	3.953306988	4.6956137	4.340031233

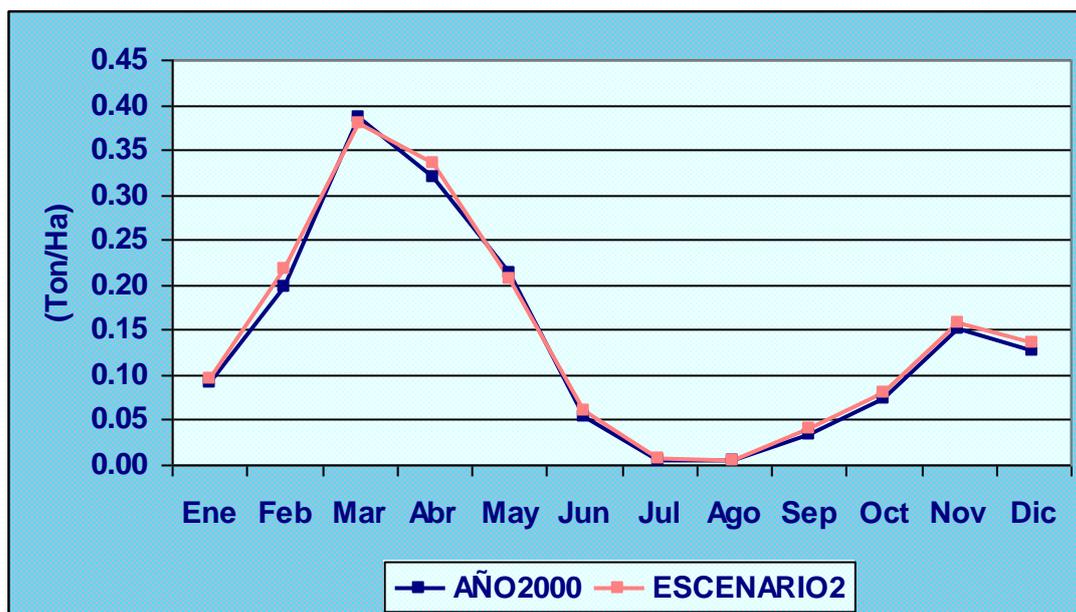
Gráfico 5.14: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 2 Y PARA EL 2000.



Cuadro 5.23 DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000.

MES	AÑO1956 (Ton/Ha)	AÑO2000 (Ton/Ha)	ESCENARIO1 (Ton/Ha)	ESCENARIO2 (Ton/Ha)
Enero	0.0519	0.0913	0.1102	0.0956
Febrero	0.1303	0.1965	0.2343	0.2180
Marzo	0.2934	0.3853	0.4130	0.3784
Abril	0.2292	0.3203	0.3497	0.3339
Mayo	0.1402	0.2136	0.2257	0.2066
Junio	0.0318	0.0527	0.0686	0.0595
Julio	0.0006	0.0047	0.0068	0.0058
Agosto	0.0003	0.0037	0.0058	0.0046
Septiembre	0.0127	0.0328	0.0420	0.0389
Octubre	0.0317	0.0727	0.0906	0.0802
Noviembre	0.0996	0.1508	0.1670	0.1583
Diciembre	0.0747	0.1274	0.1396	0.1354

Gráfico 5.15: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL ESCENARIO 2 Y PARA EL 2000.



Los resultados obtenidos en estos gráficos indican que, a pesar de que no se trata de una situación tan crítica como la planteada en el escenario 1, el avance de la frontera agrícola representa una amenaza dentro del proceso erosivo que sufren los suelos de la Subcuenca, además se debe considerar que la situación planteada en el escenario 2, es un futuro con muchas probabilidades de ocurrencia si no se toman medidas para respetar la protección de la cobertura vegetal existente, en especial las zonas de páramo.

5.2.5. Tercer Escenario: Simulación de la Subcuenca con medidas de protección del páramo y reforestación en zonas erosionadas y en laderas de quebradas

Durante las salidas de campo, al conversar con las personas que habitan en las zonas más altas de la Subcuenca, se pudo analizar que la idea de mantener toda la extensión de páramos que existe en la actualidad es una tarea nada fácil de conseguir, tomando en cuenta que para ellos las labores agrícolas y ganaderas representan las principales actividades para generar ingresos a las familias. Sin embargo hay que considerar que la mayor parte de los páramos de la Subcuenca están dentro de algunas categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, y que por lo tanto los habitantes no pueden alterar estos ecosistemas.

Tomando en cuenta estas circunstancias se planteó el escenario 3 considerando un avance inevitable pero leve de la frontera agrícola. Además se realizó esta simulación modificando en el mapa de uso de suelo las áreas que actualmente se encuentran como suelo desnudo, ubicadas en las estribaciones de los volcanes Illinizas y Rumiñahui, y en las laderas de fuertes pendientes de las quebradas, cambiándolas por bosques de especies nativas suponiendo que se hubieran llevado a cabo proyectos de reforestación.

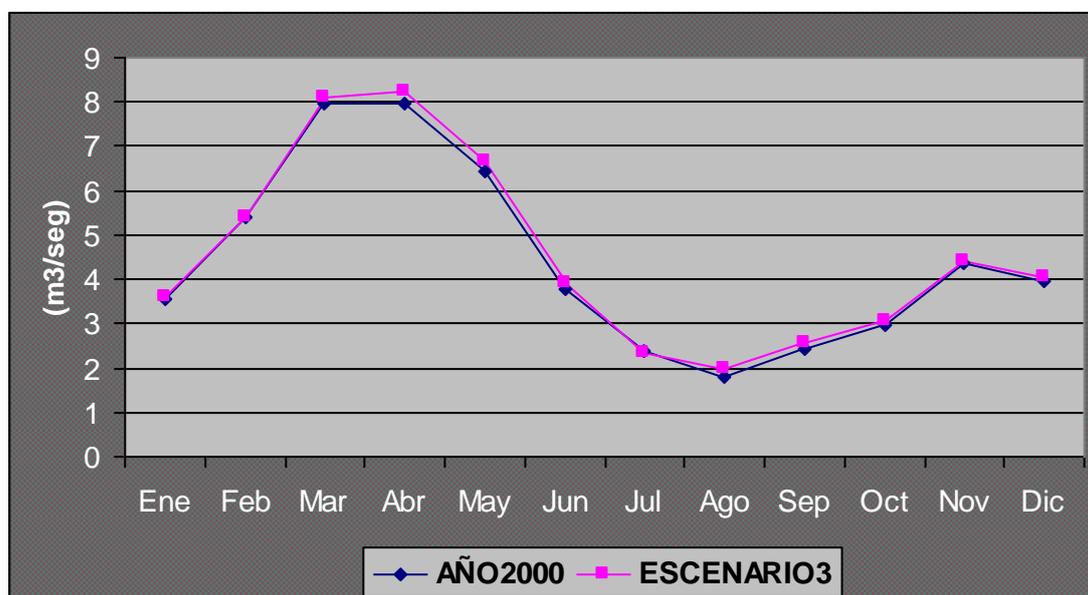
(Ver Mapa 15: Uso del Suelo – Escenario 3).

Los resultados de la corrida para este escenario son mostrados en los siguientes cuadros y gráficos.

Cuadro 5.24: DATOS DE CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3, ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000

MES	AÑO1956 (m3/seg)	AÑO2000 (m3/seg)	ESCENARIO1 (m3/seg)	ESCENARIO2 (m3/seg)	ESCENARIO3 (m3/seg)
Enero	3.16060722	3.536573396	4.212633056	3.882530223	3.586966453
Febrero	4.726189263	5.393755711	6.274784882	5.850124292	5.380166572
Marzo	7.243577242	7.964934031	9.148887757	8.536244079	8.101391634
Abril	7.252070454	7.982486669	9.053197571	8.552664288	8.237849237
Mayo	5.821813586	6.434457264	7.257166381	6.875538064	6.651883486
Junio	3.355384877	3.761926616	4.253400472	4.012759471	3.911973358
Julio	2.220125566	2.363377738	2.602320097	2.472657064	2.331669748
Agosto	1.707135573	1.801127117	1.999302059	1.903045659	1.965895426
Septiembre	2.198043215	2.416601866	2.811819322	2.622137591	2.544566257
Octubre	2.588164744	2.962432278	3.63056494	3.304991821	3.058122464
Noviembre	3.979352838	4.349656873	5.097059512	4.717129837	4.392122932
Diciembre	3.588665095	3.953306988	4.6956137	4.340031233	4.048430961

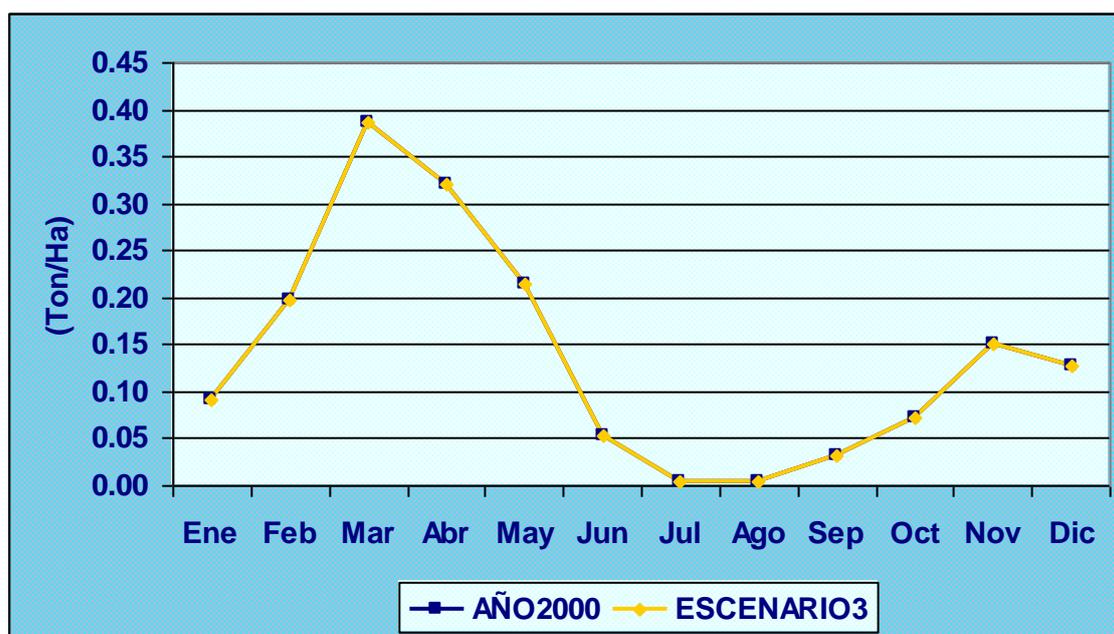
Gráfico 5.16: CAUDALES MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3 Y PARA 2000



Cuadro 5.25: DATOS DE SEDIMENTOS PARA EL ESCENARIO 3, ESCENARIO 2, ESCENARIO 1, 1956 Y 2000

MES	AÑO1956 (Ton/Ha)	AÑO2000 (Ton/Ha)	ESCENARIO1 (Ton/Ha)	ESCENARIO2 (Ton/Ha)	ESCENARIO3 (Ton/Ha)
Enero	0.0519	0.0913	0.1102	0.0956	0.0915
Febrero	0.1303	0.1965	0.2343	0.2180	0.1968
Marzo	0.2934	0.3853	0.4130	0.3784	0.3862
Abril	0.2292	0.3203	0.3497	0.3339	0.3208
Mayo	0.1402	0.2136	0.2257	0.2066	0.2140
Junio	0.0318	0.0527	0.0686	0.0595	0.0527
Julio	0.0006	0.0047	0.0068	0.0058	0.0047
Agosto	0.0003	0.0037	0.0058	0.0046	0.0037
Septiembre	0.0127	0.0328	0.0420	0.0389	0.0328
Octubre	0.0317	0.0727	0.0906	0.0802	0.0728
Noviembre	0.0996	0.1508	0.1670	0.1583	0.1510
Diciembre	0.0747	0.1274	0.1396	0.1354	0.1275

Gráfico 5.17: SEDIMENTOS MENSUALES PARA EL ESCENARIO 3 Y PARA EL 2000



Como indican los gráficos, la respuesta de este escenario es muy aceptable ya que si bien es cierto los caudales han aumentado por falta de retención de agua, el incremento es muy leve; pero sobre todo, el aspecto más relevante para esta corrida es que el incremento de los sedimentos es imperceptible, por lo que podría considerarse nulo con respecto a los sedimentos generados en la situación actual.

De esta manera podría decirse que si el páramo se reduce en muy pequeñas cantidades, y si esta pérdida se contrarresta con reforestación de zonas erosionadas, puede mantenerse un equilibrio en la situación del agua de la Subcuenca, y evitar el avance del grado de erosión de los suelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES REFERENTES A LAS METODOLOGÍAS

- ☞ Los modelos hídricos han sido desarrollados a partir de 1966 aproximadamente, con el objetivo de representar numéricamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en una cuenca hidrográfica. Para ello requieren de una vasta información para modelar las características físicas e hidrológicas de una cuenca, como su topografía, geología, tipo y uso del suelo, climatología, etc.
- ☞ Si el modelo debe satisfacer un objetivo bien definido, como por ejemplo en este estudio el de conocer la respuesta hidrológica de una Subcuenca ante diferentes escenarios de cambio en el uso del suelo, la cantidad de información que habrá de manipularse se incrementará de acuerdo a las necesidades planteadas por el usuario.
- ☞ La mayor parte de modelos hidrológicos se han acoplado a los Sistemas de Información Geográficos con el fin de aprovechar su enorme funcionalidad y potencialidad en beneficio de una simulación más apegada a las características físicas de la cuenca. De la misma manera, el modelo Swat trabaja como una extensión de ArcView 3.2 y su propósito es facilitar el ingreso de datos espaciales, integrar la información en formatos vector y raster, y posteriormente presentar y desplegar los resultados en una manera amigable para el usuario.
- ☞ El modelo Swat es un modelo matemático que se aplica a nivel de cuencas hidrográficas para analizar el sistema hídrico que ellas integran. Fue diseñado para

evaluar el impacto que tienen las diferentes prácticas de manejo de suelos sobre la producción de agua y sedimentos, en grandes y complejas cuencas hidrológicas, con diferentes usos y tipos de suelos, así como sus diversos manejos durante largos períodos de tiempo.

- ☞ Una de las principales bondades del modelo Swat es que permite ser calibrado con datos reales medidos en campo, para lo cual primero se realiza una comparación entre las curvas de valores simulados y valores reales medidos en campo; luego se procede a calibrar las variables internas del modelo hasta cuando las curvas se encuentren más semejantes entre sí.
- ☞ La utilización de los modelos hídricos puede ser limitada por la escasez de fuentes de información. El Swat es un modelo que exige una información muy detallada y en muchos casos especializada para obtener resultados más exactos. Lamentablemente en el país mucha de la información requerida por el Swat pertenece a instituciones que se niegan a compartirla y esto, además de retrasar el cronograma definido en los proyectos, obliga a duplicar esfuerzos, tiempo y dinero, que en muchos casos para los estudiantes representa un costo muy elevado.
- ☞ Una de las variables de mayor peso que analiza el Swat es la precipitación. Por esta razón es apropiado antes de correr el modelo confirmar la existencia de información climática diaria confiable, de un período de tiempo por lo menos de 10 años y que proceda de varias estaciones dentro de la Subcuenca o muy cercanas a ella. Para este estudio sólo se contó con datos de una estación fuera del área de estudio, ya que las estaciones meteorológicas del INAMHI que se ubican dentro de la Subcuenca del Río San Pedro han dejado de funcionar.
- ☞ Al trabajar con modelos hidrológicos se debe tener la seguridad de contar con información de calidad, siempre teniendo en cuenta que en un SIG no podrán obtenerse resultados con una resolución de salida mejor que la de entrada. Los

mayores errores se originan en la generación de información cartográfica, en la rasterización de datos, en cambios de escala, etc. Por esta razón durante este estudio se procuró generar la mayor cantidad de información posible, y toda a la misma escala de trabajo; en cuanto a la información entregada por instituciones, se procedió a realizar una minuciosa validación antes de ingresarla al modelo. Por ejemplo, el mapa de suelos entregado por SIG-AGRO, fue validado con salidas al campo para tomar muestras y realizar análisis, y comprobar los resultados con la Leyenda de Suelos del Ecuador para confirmar su correcta categorización.

- ☞ Los estudios multitemporales son metodologías bastante útiles dentro de investigaciones o proyectos que buscan determinar cambios de una o varias variables físicas dentro de un período de tiempo definido. Uno de los objetivos planteados en este estudio fue el de realizar un análisis multitemporal para establecer las tendencias del cambio de uso del suelo que tiene la Subcuenca. De esta metodología se obtuvieron resultados importantes para determinar el impacto de la deforestación en la producción de agua y sedimentos.

6.2. CONCLUSIONES REFERENTES A LOS RESULTADOS

- ☞ Los resultados generados por el modelo Swat en un principio fueron precisos pero no exactos. El modelo sobreestimó los caudales en un 40% del valor real de los mismos. El problema de la exactitud se produjo por errores en la información, principalmente por la falta de información climática de estaciones dentro de la Subcuenca, y en menor proporción por la diferencia de escalas en los mapas de Uso de Suelo y Tipos de Suelos. Sin embargo, es una gran ventaja contar con datos de caudales reales de la red de drenaje, ya que esto permitió calibrar el modelo y mejorar su exactitud. Los valores calibrados se ajustan en un 90% al valor de los caudales medidos por la estación hidrométrica San Pedro en Machachi del INAMHI.

- ☞ Las corridas del modelo se realizaron en varias condiciones de uso de suelo: en la primera se ingresó el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de 1956; en la segunda corrida se ingresó el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal del 2000; luego se diseñaron 3 escenarios: en el primero se eliminó toda la cobertura vegetal existente en el mapa actual y se reemplazó por cultivos de papa o por pastos, de acuerdo a las tendencias de uso de las zonas aledañas; el segundo escenario es una proyección de cómo podría estar el uso de suelo y la cobertura vegetal en 40 años adelante, considerando las mismas tendencias obtenidas en el estudio multitemporal; el último escenario es un escenario futuro en el que el páramo ha decrecido levemente y se han reforestado las zonas erosionadas con especies arbóreas nativas.
- ☞ La información climática existente comprende una serie de datos desde 1990 hasta el 2000. Por esta razón los resultados más exactos generados por el modelo son para el uso de suelo y cobertura vegetal actual de la Subcuenca.
- ☞ Para la corrida del escenario del uso de suelo de 1956 hubiera sido favorable contar con información de clima de aquella época, sin embargo no fue posible obtener registros climáticos anteriores a la década de 1980. Por ello los resultados obtenidos en este escenario se pueden interpretar como la cantidad de agua y de sedimentos que existen para una cobertura vegetal como la del año 1956 y con condiciones climáticas como las de la década de los 90.
- ☞ Para escenarios futuros, una de las desventajas del modelo Swat es que no permite proyectar la información, de tal manera que para todos los escenarios se utilizó datos climáticos del período 1990-2000.
- ☞ Del estudio realizado se puede concluir que las actividades antrópicas son el principal factor de degradación del páramo. Esta degradación genera cambios profundos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, acelerando su proceso erosivo, y alterando los procesos que ocurren dentro del ciclo hidrológico.

- ☞ En las zonas más bajas del área de estudio no hay mucho espacio disponible para ampliar las áreas cultivadas. El páramo entonces se constituye en un área amplia y libre donde algunas personas intentan hacer cultivos sin considerar que el arado, la fertilización, el riego y los cultivos rotatorios modifican la estructura del suelo aumentando la erosión por escorrentía superficial.
- ☞ Los pastos representan el 30% del área total de la zona de estudio. El pastoreo de ganado afecta las características hidrológicas de los suelos, tanto por la remoción de la cobertura vegetal como por la compactación que se produce debido a las pisadas de los animales. Esta compactación evita que el agua de lluvia ingrese al suelo, produciéndose así escorrentía superficial.
- ☞ De acuerdo a los resultados de este estudio, cuando se reduce la cobertura vegetal, y se la reemplaza por cultivos, pastos, por vías o por bosques de especies introducidas, se incrementa la producción de sedimentos porque el suelo pierde su capacidad de almacenar agua, de tal manera que el agua que ingresa a la subcuenca por medio de la precipitación se escurre por la superficie arrastrando las partículas del suelo, dejándolo desnudo y erosionado. Es por esto que los valores de caudales también aumentan cuando disminuye la vegetación, por la misma razón que las lluvias no son almacenadas y fluyen directamente destruyendo el suelo.
- ☞ La relación directa que existe entre los caudales y sedimentos, y la relación indirecta que existe entre los caudales y la infiltración, demuestra una vez más que los páramos tienen como función servir de reguladores de los flujos de agua, y cuando son reemplazados por cultivos o pastizales pierden su capacidad de retener el agua en periodos húmedos y restituirla en periodos secos.
- ☞ La principal consecuencia de que el suelo pierda su capacidad de almacenamiento, es que los acuíferos y las fuentes de agua dejan de ser alimentadas y por ende disminuyen

los flujos de aguas subterráneas. En épocas en donde no hayan lluvias, la población sufrirá problemas de escasez de agua tanto para riego como para consumo humano.

6.3. RECOMENDACIONES REFERENTES A LAS METODOLOGÍAS

- ☞ Verificar la disponibilidad que se tiene sobre la información que requiere el modelo, y si se cuenta con suficiente tiempo y recursos económicos para adquirir o generar los datos faltantes.
- ☞ Generar toda la información que sea posible; en caso de contar con información que ha sido concedida por otras personas o instituciones, validar los datos para asegurarse que éstos sean de buena calidad y evitar errores en los resultados obtenidos de las corridas.
- ☞ Verificar la existencia de información meteorológica de varias estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio y otras que se encuentren aledañas, con el fin de que los promedios de los valores calculados por el modelo sean más representativos y se acerquen más a la realidad climática de la cuenca hidrográfica. Además los datos deben ser de una serie de por lo menos diez años; mientras más extenso sea el período serán más exactos los resultados.
- ☞ Comprobar la existencia de datos diarios de caudales para poder realizar calibraciones al modelo.
- ☞ Procurar generar toda la información a una misma escala, y en caso de que esto no sea posible, tomar en cuenta la influencia que tiene combinar varias escalas en los resultados finales del trabajo.
- ☞ Generar la cobertura que contiene la red hídrica asegurándose que el sentido de los vectores que representan a los ríos y quebradas coincidan exactamente con el sentido en que los flujos de agua discurren por la superficie terrestre. Este error puede influenciar en los resultados de las corridas.

- ☞ Considerar como unidad espacial para un estudio hidrológico a una cuenca hidrográfica debido a que constituye una unidad geográfica completa en donde las precipitaciones representan la entrada de agua, la infiltración determina el agua almacenada, y las salidas se cuantifican mediante el escurrimiento y la sedimentación; en este ciclo interviene directamente la influencia de la vegetación, el tipo de suelo y la topografía de la zona. Todos estos factores son analizados por el modelo Swat para establecer el balance hídrico de la cuenca.
- ☞ Realizar corridas en diferentes escenarios de uso de suelo para determinar la importancia o el impacto que tienen las distintas coberturas en la conservación del agua y en la producción de sedimentos.
- ☞ Formar un banco de datos a nivel nacional en donde se integre toda la información de datos locales debidamente validada y que se busquen los mecanismos adecuados para compartirla, de tal manera que estudios tan importantes para el desarrollo de un determinado lugar no se vean limitados, afectados o suspendidos por falta de fuentes de información.
- ☞ Difundir las bondades que tienen los modelos hidrológicos a personas interesadas en la investigación de las amenazas que sufren los páramos del Ecuador y su influencia sobre la producción de caudales y sedimentos.

6.4. RECOMENDACIONES REFERENTES A LOS RESULTADOS

- ☞ El Municipio del Cantón Mejía, entidad bajo cuya jurisdicción se encuentran los páramos de este estudio, debe considerar la existencia de las Declaratorias de Áreas Protegidas, y hacer cumplir sus estatutos para la protección de este importante ecosistema, evitando que la frontera agrícola siga avanzando hacia las zonas más altas.
- ☞ Evitar la expansión de especies introducidas. Se deberían planificar programas de difusión de las ventajas que tiene la cobertura vegetal nativa sobre las especies exóticas, ya que las plantaciones de pino y eucalipto aumentan a un ritmo considerable, ya sea

por intereses económicos o por desconocimiento del impacto negativo que tienen sobre el suelo.

- ☞ Enlazar toda la información cartográfica, temática y ambiental que exista en la Subcuenca del Río San Pedro para tratar de generar la información faltante y plantear luego un manejo integral de la Subcuenca, considerando como recursos naturales fundamentales el agua, el suelo y la cobertura vegetal, para lograr una producción óptima y sostenida de estos recursos, en beneficio de los pobladores de la subcuenca y de las poblaciones vinculadas a ella. Por lo tanto las autoridades y todos los actores involucrados deben tomar decisiones desde el punto de vista técnico, económico, social, cultural y ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

Artieda, A.G., Paredes, F.M. Vallejo, L.M.(1986).Memoria explicativa del mapa general de suelos del Ecuador (1986). Sociedad Ecuatoriana de la ciencia del suelo. Proyecto Ecopar. Quito.

Cedig (Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas). 1983. El manejo del espacio en el Ecuador. Etapas claves. Geografía básica del Ecuador. Tomo I Geografía Histórica. CEDIG. Quito.

Cedig (Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas). 1997. Los paisajes agrarios del Ecuador. Geografía básica del Ecuador. Tomo V Geografía Agraria. Volumen 2. Quito.

Cedig (Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas). 1997. Los paisajes naturales del Ecuador. Geografía básica del Ecuador. Tomo IV. Volumen 1. CEDIG. Quito.

Cepeige (Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas), Asociación de Municipalidades Ecuatorianas. Atlas del Cantón Mejía. Provincia de Pichincha. Julio de 1996.

FAO. Informe de Avance sobre el Programa 21 para la Sesión Especial de la Asamblea General de la ONU. Capítulo 11: Lucha contra la Deforestación. 1997.

Gavilanes Carla. Tesis: Construcción de escenarios para una propuesta de Redelimitación de la Reserva Ecológica El Ángel usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica. Escuela Politécnica del Ejército. 2004.

González Augusto, Maldonado Fausto, Mejía Luis; Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Memoria Explicativa del Mapa General de Suelos del Ecuador. 1986. Quito-Ecuador.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Informe para el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 22 de enero de 2001

Grupo Páramo. Órgano de difusión del Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador. Volumen 3: El Páramo como fuente de recursos hídricos. Diciembre de 1999.

Grupo Páramo. Órgano de difusión del Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador. Volumen 6: La Forestación de los Páramos. Diciembre de 1999.

Hofstede Robert, Segarra Pool, Mena Patricio. Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. 2003

Ilustre Municipalidad de Mejía. Plan de Desarrollo Estratégico Mejía 2010.

Mapas morfo-pedológicos (1982-1984). PRONAREG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ecuador) and ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer, France).

Medina Galo, Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador. El Páramo como Fuente de Recursos Hídricos. Volumen 3. Diciembre de 1999. Página 3.

Mena, P y Hofstede, R. 2000. La diversidad entre el bosque y la nieve. Ecuador tierra incógnita. Páramos, riqueza y vida. Volumen 3. Número 9. Quito.

Mena, Patricio; Medina, Galo; Hofstede, Robert. Los Páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas. Proyecto Páramo. 2001.

Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales. (1999). Plantaciones forestales: impactos y luchas. Uruguay.

Ospina Pablo. Sociedad y medio ambiente en el Ecuador. Indicadores para la evaluación de la sustentabilidad ambiental. FUNDACION NATURA. Quito: SIISE, 1998.

Pizarro Fernando. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editorial Agrícola Española. Madrid 1978.

Richters, E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central. Hacia el aprovechamiento sostenible del recurso Tierra. IICA. San José de Costa Rica.

Tutorial del Software Swat 99.2 Bases Teóricas.

Tutorial del Software Swat 99.2 Guía del Usuario.

1.6.1.1.1. FUENTES DE CONSULTA

<http://www.soils.wisc.edu/courses/SS325/tablecont.htm>

<http://www.wrm.org.uy>

<http://www.fao.org/docrep/W2962S/w2962s00.htm#Contents>

<http://www.siise.gov.ec/fichas/medi8kz8.htm>

MAPAS

Mapa 1: Mapa Base

Mapa 2: Mapa de Microcuencas

Mapa 3: Mapa de Suelos

Mapa 4: Mapa de Relieves

Mapa 5: Ubicación de Estaciones Climáticas

Mapa 6: Mapa de Áreas Protegidas

Mapa 7: Mapa de Pendientes

Mapa 8: Ubicación de Puntos de Muestreo

Mapa 9: Modelo Digital de Elevaciones

Mapa 10: Mapa de Uso del Suelo 1956

Mapa 11: Mapa de Uso Actual del Suelo

Mapa 12: Comparación de Páramos entre los años 1956 y 2000

Mapa 13: Mapa de Uso del Suelo Escenario 1

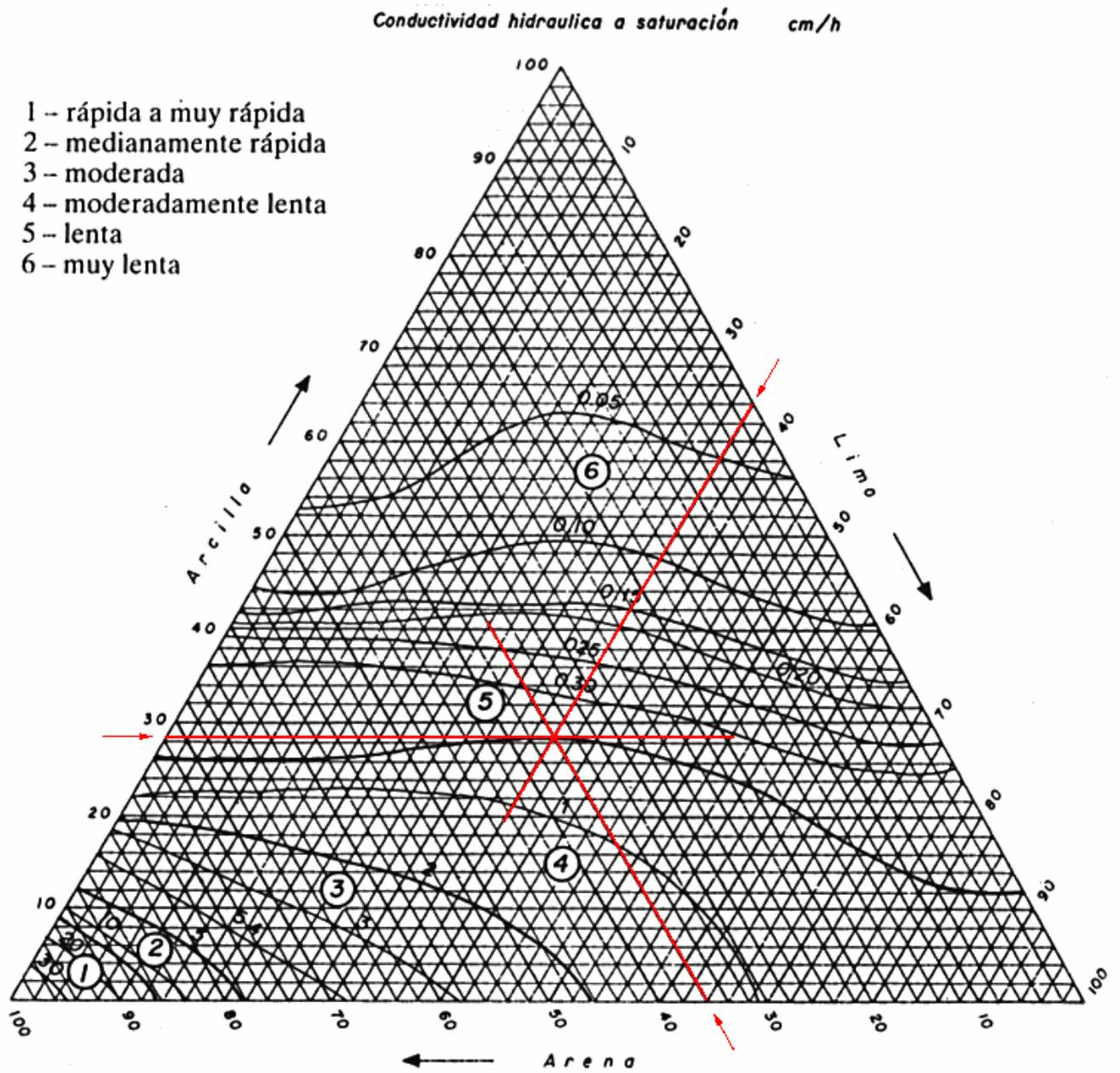
Mapa 14: Mapa de Uso del Suelo Escenario 2

Mapa 15: Mapa de Uso del Suelo Escenario 3

ANEXOS

Anexo 1: Resultados de los Análisis de Suelos

Anexo 2: Triángulo Textural para Conductividad Hidráulica



**Anexo 3: Índices de Protección que caracterizan a las diferentes coberturas
vegetales - CIDIAT -**

SÍMBOLO	TIPO DE COBERTURA VEGETAL	ÍNDICE DE PROTECCIÓN
Vegetación Leñosa		
1a	- Bosques densos (sin erosión del suelo)	1.0
1b	- Bosques claros (densidad 0.3 – 0.7) con sustrato herbáceo denso	0.8 – 0.9
1c	- Bosques claros con sustrato herbáceo degradado y erosión importante	0.4 – 0.5
2 ^a	- Matorral (monte bajo) sin erosión del suelo	0.8 – 0.9
2b	- Matorral degradado, con erosión aparente del suelo	0.4 – 0.5
Vegetación Herbácea		
3a	- Pastizales completos de plantas viváceas sin erosión aparente	0.8 – 0.9
3b	- Pastizales degradados de plantas viváceas, con erosión aparente	0.4 – 0.5
3c	- Pastizales anuales completos con indicios de erosión	0.6 – 0.7
3d	- Pastizales anuales degradados, con erosión potente	0.3 – 0.4
4	- Terrenos totalmente erosionados y desnudos	0.0
Tierras Cultivadas		
5a	- Cultivos anuales sobre terrazas	0.7 – 0.8
5b	- Cultivos anuales sin terrazas	0.2 – 0.4
6	- Cultivos de plantas leguminosas forrajeras	0.6 – 0.8
7 ^a	- Huerto sobre terrazas	0.8 – 0.9
7b	- Huerto sin terrazas	0.5 – 0.6
8	- Terrenos llanos o casi llanos	1.0

Anexo 4: Siglas correspondientes a las corridas del modelo SWAT

UNIT TIME Unidad de tiempo para la cual se presentan los datos.
· PREC : precipitación (mm)
· SURQ : Agua de escorrentía (mm).
· LATQ : flujo lateral (mm)
· GWQ : flujo aportado por las agua subterráneas (mm)
· PERCOLATE : agua de percolación (mm)
· SW : humedad del suelo (mm)
· ET : evapotranspiración (mm).
· PET : evapotranspiración potencial (mm).
· WATER YIELD : producción de agua (mm)
· SED YIELD : producción de sedimentos (ton /ha)