

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

**LA COBERTURA FORESTAL Y EL
MODELO HIDROLÓGICO DE LA
CUENCA DEL RÍO COLORADO**

Reserva de Biosfera Sierra de las Minas

TESIS DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO POR
LUIS ANDRÉS ARÉVALO RODRÍGUEZ PARA
OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA FORESTAL

BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Guatemala

2004

**LA COBERTURA FORESTAL Y EL
MODELO HIDROLÓGICO DE LA
CUENCA DEL RÍO COLORADO**

Reserva de Biosfera Sierra de las Minas

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA**

Facultad de Ciencias y Humanidades

**LA COBERTURA FORESTAL Y EL
MODELO HIDROLÓGICO DE LA
CUENCA DEL RÍO COLORADO**

Reserva de Biosfera Sierra de las Minas

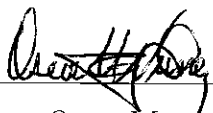
TESIS DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO POR
LUIS ANDRÉS ARÉVALO RODRÍGUEZ PARA
OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA FORESTAL

BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

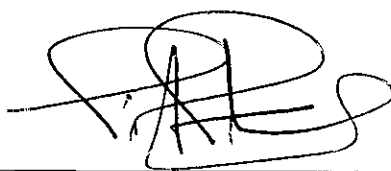
Guatemala

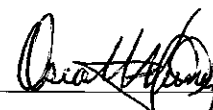
2004

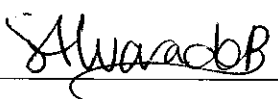
Vo. Bo.:

(f) 
Ingeniero Oscar Manuel Núñez

Tribunal:

(f) 
Ingeniero César Castañeda

(f) 
Ingeniero Oscar Manuel Núñez

(f) 
Ingeniera Susana Alvarado

Fecha de Aprobación: 04/ 11 / 04

AGRADECIMIENTOS

A Dios - por darme tantas oportunidades en la vida, y dejarme llegar cada vez más lejos

A la Virgencita - por ser mi luz y mi guía,

A mis padrespor - apoyarme, enseñarme y estar siempre conmigo,

A mis hermanos - por mostrarme el verdadero significado del amor,

A mi familia - por su cariño y apoyo,

A mis amigos - por acompañarme en este trayecto de mi vida,

Al Ing. Oscar Núñez - por haberme dado la oportunidad de realizar este estudio,

A Fundación Defensores de la Naturaleza, - por apoyarme en el desarrollo del estudio.

A todos - muchas gracias.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| LISTA DE CUADROS..... | VII |
| LISTA DE GRÁFICAS..... | VIII |
| LISTA DE FIGURAS..... | IX |
| LISTA DE MAPAS..... | IX |
| RESUMEN | X |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. JUSTIFICACIÓN..... | 2 |
| III. OBJETIVOS..... | 3 |
| A. GENERAL..... | 3 |
| B. ESPECÍFICO..... | 3 |
| IV. ANTECEDENTES | 4 |
| A. EL CICLO DEL AGUA | 4 |
| B. EL SUELO..... | 16 |
| C. SWAT (SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL) MODEL | 23 |
| D. CUENCA RÍO COLORADO..... | 24 |
| V. METODOLOGÍA..... | 26 |
| A. ANÁLISIS BIOFÍSICO..... | 26 |
| VI. RESULTADOS..... | 31 |
| A. ANÁLISIS BIOFÍSICO..... | 31 |
| B. MODELO HIDROLÓGICO | 36 |
| VII. DISCUSIÓN | 48 |
| VIII. CONCLUSIONES..... | 51 |
| IX. RECOMENDACIONES..... | 53 |
| X. LITERATURA CITADA | 54 |
| XI. ANEXOS | 55 |
| A. MAPA No. 8. ASOCIACIONES DE CLASES DE SUELO Y USO Y COBERTURA DE SUELO..... | 55 |
| B. MÉTODO DE BOUYOUCOS..... | 56 |
| C. MÉTODO DE LA PROBETA | 58 |
| D. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS..... | 60 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro No. 1. Porcentaje de agregación de partículas y porosidad en distintas situaciones de cobertura de suelo..... | 10 |
| Cuadro No. 2. Valores de escurrimiento para espesores de restos vegetales (rastros o cobertura muerta)..... | 10 |
| Cuadro No. 3. Porcentajes de escorrentía para diversas coberturas boscosas..... | 10 |
| Cuadro No. 4. Categoría de drenaje interno del suelo..... | 13 |
| Cuadro No. 5. Categoría de drenaje interno del suelo..... | 22 |
| Cuadro No. 6. Características físicas del suelo superficial. | 22 |
| Cuadro No. 7. Características físicas del subsuelo..... | 22 |
| Cuadro No. 8. Asociaciones suelo + cobertura | 31 |
| Cuadro No. 9. Densidad aparente y porosidad de las muestras | 31 |
| Cuadro No. 10. Textura y porcentajes de composición de las muestras de suelo..... | 32 |
| Cuadro No. 11. Coordenadas geográficas de las estaciones virtuales..... | 33 |
| Cuadro No. 12. Información climatológica Estación Virtual 1..... | 34 |
| Cuadro No. 13. Información climatológica Estación Virtual 2..... | 35 |
| Cuadro No. 14. Información climatológica Estación Virtual 3..... | 36 |
| Cuadro No. 15. Valores de escorrentía superficial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado. | 41 |
| Cuadro No. 16. Valores de evapotranspiración potencial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado. | 42 |
| Cuadro No. 17. Valores de evapotranspiración real modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado. | 43 |
| Cuadro No. 18. Valores de sedimentos transportados por escorrentía modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado. | 44 |
| Cuadro No. 19. Valores de volumen de agua retenida en raíces modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 45 |
| Cuadro No. 20. Valores de días de estrés térmico modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado. | 46 |

| | |
|--|----|
| Cuadro No. 21. Valores de caudal total modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 47 |
| Cuadro No. 22. Clase textural de muestras de suelo | 59 |
| Cuadro No. 23 Registros climáticos de la estación La Fragua..... | 60 |
| Cuadro No. 24. Registros climáticos de la estación Pasabien..... | 61 |
| Cuadro No. 25. Registros climáticos de la estación Morazán..... | 62 |
| Cuadro No. 26. Registros climáticos de la estación Ipala..... | 62 |
| Cuadro No. 27. Registros climáticos de la estación Esquipulas..... | 63 |
| Cuadro No. 28. Registros climáticos de la estación La Unión..... | 64 |
| Cuadro No. 29. Registros climáticos de la estación Albores..... | 64 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Gráfica No. 1. Porcentaje de uso de la tierra por categorías de microcuencas para el escenario real..... | 38 |
| Gráfica No. 2. Porcentaje de uso de la tierra por categorías de microcuencas para el escenario simulado..... | 38 |
| Gráfica No. 3. Porcentaje de parámetros recategorizados para el uso de la tierra por microcuencas para el escenario real..... | 39 |
| Gráfica No. 4. Porcentaje de parámetros recategorizados para el uso de la tierra por microcuencas para el escenario simulado..... | 39 |
| Gráfica No. 5. Porcentaje de clases de suelo por microcuenca..... | 40 |
| Gráfica No. 6. Porcentajes de clases de suelo reclasificadas por microcuenca..... | 40 |
| Gráfica No. 7. Valores de escorrentía superficial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 41 |
| Gráfica No. 8. Valores de evapotranspiración potencial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 42 |
| Gráfica No. 9. Valores de evapotranspiración real modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 43 |
| Gráfica No. 10. Valores de sedimentos transportados por escorrentía modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Gráfica No. 11. Valores de volumen de agua retenida en raíces modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 45 |
| Gráfica No. 12. Valores de días de estrés térmico modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 46 |
| Gráfica No. 13. Valores de caudal total modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado..... | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura No. 1. Triángulo de clases texturales del suelo..... | 58 |
|--|----|

LISTA DE MAPAS

| | |
|--|----|
| Mapa No. 1. Ubicación geográfica cuenca Río Colorado. | 25 |
| Mapa No. 2. Modelo de elevación digital de la cuenca del Río Colorado. | 27 |
| Mapa No. 3. Serie de suelos – Simmons 1959 de la cuenca del Río Colorado..... | 28 |
| Mapa No. 4. Uso de la tierra – 2001 de la cuenca del Río Colorado..... | 30 |
| Mapa No. 5. Uso de la tierra – simulado de la cuenca del Río Colorado..... | 30 |
| Mapa No. 6. Ubicación de estaciones climatológicas virtuales..... | 35 |
| Mapa No. 7. Límite de cuenca y subcuencas, y cauce de ríos de cuenca del Río Colorado. | 37 |
| Mapa No. 8. Asociaciones de clases de suelo y uso y cobertura de suelo..... | 55 |

RESUMEN

La cuenca del Río Colorado se enmarca dentro de las coordenadas 15°03' a 15°10' latitud Norte y 89°35' a 89°42' longitud Oeste. Política y administrativamente pertenece al municipio de Río Hondo, departamento de Zacapa.

Se localiza dentro de la reserva de la Biosfera de las Minas (RBSM), y tiene una extensión total de 5,771.89 ha.

En esta zona se encuentran las zonas de vida Bosque Muy Húmedo Subtropical frío y el Bosque Pluvial Montano bajo, los cuales forman parte importante en varios de los procesos de captación de agua, dentro del ciclo hidrológico. Tienen como característica especial, la capacidad de captar el agua a través de la precipitación horizontal (neblina), logrando aumentar el volumen de agua que entra al ciclo hidrológico.

Para este estudio se utilizó la aplicación *Soil and Water Assessment Tool*, SWAT por sus siglas en inglés, que es una herramienta desarrollada por la Universidad de Texas A & M, bajo la plataforma de Arc View, que se basa en la utilización de un modelo de elevación digital, información de la cobertura y las características del suelo. A partir de estas tres variables, se obtuvieron valores basados en parámetros predeterminados por SWAT y las interacciones de las variables ingresadas.

Las variables estudiadas fueron evapotranspiración, escorrentía superficial, agua retenida en raíces y caudal, con lo que se obtuvo información sobre la importancia del recurso forestal como regulador del ciclo hidrológico y de la erosión hídrica del suelo.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto “Fondo de Agua”, es una iniciativa de la organización Defensores de la Naturaleza, en la promoción, investigación y regulación del recurso agua en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. Éste está conformado por distintas áreas que permiten alcanzar los objetivos planteados. Dentro del área de investigación, se ha planteado la necesidad de conocer el papel del bosque como regulador del ciclo hidrológico, para poder empezar a generar la información que permita tomar medidas en la protección y regulación del recurso. Es por esto, que este estudio se presenta como proyecto de tesis para optar al título de Ingeniero Forestal, así como también como una evaluación piloto de la aplicabilidad de la plataforma SWAT para la generación de información, que permita tomar medidas de manejo adecuadas de los recursos forestales como entes reguladores del ciclo hidrológico.

SWAT, Soil and Water Assessment Tool, es un modelo de predicción del impacto del uso de la tierra, uso del agua, sedimentación, y uso de químicos en el campo, en una cuenca hidrográfica, la cual puede ser tan compleja que esté conformada por diferentes tipos de suelo, tener cobertura vegetal muy diversa, y distintas formas de manejo durante largos períodos de tiempo. El modelo está basado en características físicas, y es computacionalmente eficiente, usando información de entrada mínima, y facilitando realizar estudios en períodos largos, permitiendo pronosticar efectos e impactos.

La cuenca del río Colorado está conformada por tres tipos de suelos y siete categorías de manejo, que caracterizan a las nueve microcuencas que conforman el sistema. Para la modelación se compararon dos escenarios, uno real, que incluye las variables antes mencionadas, y uno simulado, en el que se modeló a partir de las tres categorías de suelo, pero únicamente cuatro categorías de uso de la tierra, eliminando aquellas que fueran cobertura boscosa. Para ambos escenarios se construyeron las unidades de respuesta hidrológica (HRU), que consisten en la(s) relación(es) suelo – cobertura más representativa(s) de cada microcuenca. A partir de las HRU se obtuvieron las variables de modelación escorrentía superficial, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, sedimentos transportados, agua retenida en raíces, días de estrés térmico y caudales, que permitieron comparar el papel que juega la cobertura forestal para cada una de ellas, comparando los valores entre el escenario real y el simulado.

II. JUSTIFICACIÓN

La Reserva Biosfera Sierra de las Minas, abarca las cuencas hidrográficas de 63 ríos permanentes, haciéndola el mayor productor de agua en Guatemala. En esta región, las relaciones socioeconómicas se ven influenciadas por el abastecimiento del agua, particularmente el valle semi-árido del Motagua. Esta región se caracteriza por ser un bosque seco y en menor proporción monte espinoso, por el efecto provocado de la sombra de lluvia de la Sierra.

Los bosques forman parte importante en varios de los procesos de captación de agua, dentro del ciclo hidrológico, así como también son parte importante en la protección de los suelos. El bosque nuboso tiene como característica especial, la capacidad de captar el agua a través de la precipitación horizontal (neblina), logrando aumentar el volumen de agua que entra al ciclo hidrológico.

Algunas investigaciones han observado un ascenso en el manto acuífero del suelo debido a una reducción en la evapotranspiración después de la eliminación del follaje. Esto debido principalmente a que los procesos de interceptación y evapotranspiración que los árboles llevan a cabo, se ven eliminados del área al mismo tiempo que se elimina la cobertura boscosa. Sin embargo, el aumento en el manto acuífero asociado a la destrucción o eliminación de una cubierta forestal contribuye al flujo torrencial disminuyendo el potencial de almacenamiento de agua en el suelo. La lluvia que cae sobre un suelo saturado corre libremente hacia los canales en el perfil del suelo. En los terrenos de ladera empinada la fuerza del agua da problemas de erosión, y contribuye al azolve de ríos y lagos, así como una posible eutroficación.

De la premisa, “los bosques como reguladores del agua” se partió en el estudio, y se generó información del comportamiento del agua dentro de la cuenca del Río Colorado.

III. OBJETIVOS

A. General

1. Determinar la importancia del bosque en el comportamiento del agua en la cuenca del Río Colorado.

B. Específico

1. Recolectar información biofísica para conocer la situación actual de la cuenca del río Colorado.

2. Verificar la clasificación de suelos, y determinar la situación actual de los mismos dentro del área de estudio.

3. Generar un modelo hidrológico que exprese el comportamiento del recurso hídrico dentro de la cuenca.

IV. ANTECEDENTES

El agua es tan esencial para la vida, y es casi imposible discutir acerca de la ecología de cualquier organismo sin tomar en cuenta su capacidad de adaptarse a las condiciones de humedad de su ambiente. Es una de las pocas sustancias inorgánicas que es el líquido en época de verano, y es un solvente líquido sin el cual los procesos químicos de la vida no podrían ocurrir (Kimmins 1997).

La abundancia de agua, en su forma líquida, en la superficie de la tierra y de vapor de agua en la atmósfera reduce enormemente las fluctuaciones de temperaturas. Un alto calor de vaporización inhibe la evaporación y actúa para mantener el agua en la forma líquida. De igual importancia ecológica es el relativamente alto calor de fusión que actúa resintiéndose a la congelación del agua y reduce las fluctuaciones bruscas en los ecosistemas acuáticos durante el invierno (Kimmins 1997).

Además de estos atributos con la temperatura, el agua es un excelente solvente de sustancias iónicas y tiene una alta densidad y viscosidad, por lo que provee de soporte a los organismos acuáticos (Kimmins 1997).

El agua es de mucha importancia para todas las plantas y animales, así como también para el ser humano. El agua es el medio en el cual se llevan a cabo todos los procesos de la vida. Permite la absorción de nutrientes del suelo, el movimiento de metabolitos, el suministro de oxígeno a los tejidos, la remoción de los desechos y la regulación de la temperatura de los organismos, así como también el soporte y la protección de los organismos acuáticos (Kimmins 1997).

A. El ciclo del agua

Al igual que el ciclo de los nutrientes, el ciclo del agua se lleva a cabo a través de entradas de energía solar. Enormes cantidades de energía son absorbidas en el proceso de evaporación de agua desde las grandes masas de agua oceánica. La energía es transferida a la atmósfera como vapor de agua la cual se condensa creando nuestro tiempo y clima. El aire húmedo caliente crea nubes que se elevan, y el viento formado por el resultado de los procesos de la atmósfera transportan a las nubes sobre la superficie terrestre, donde parte de esta humedad cae como precipitación. Parte de ésta es reevaporada directamente a la atmósfera y otra es subsecuentemente transpirada por las plantas. El resto pasa a formar

parte de los cauces naturales y regresa a los lagos y eventualmente a los océanos, desde los cuales una vez más será evaporada (Kimmins 1997).

1. *La precipitación y otras entradas de humedad en los ecosistemas.* La precipitación ocurre cuando el aire se encuentra saturado con vapor de agua y la condensación ocurre formando nubes. Bajo ciertas condiciones, las nubes se fusionan y crecen en tamaño hasta que son tan grandes como para poder mantenerse suspendidas en el aire, entonces éstas caen en forma de lluvia (Kimmins 1997).

Las lluvias abundantes y bien distribuidas, por lo general, dan por resultado una vegetación lujuriente, y el ejemplo más común de esto son los bosques tropicales lluviosos, pero en donde las sequías de verano son frecuentes y duras, los bosques suelen ser sustituidos por praderas y pastizales. Los semidesiertos y los desiertos se originan por disminuciones todavía mayores en la precipitación pluvial.

Existen algunos tipos de precipitación que son:

a. *Precipitación convencional:* Se presenta cuando el diferencial de energía solar de la superficie terrestre y el aire inferior resultan en masas de aire que se elevan por convección. La lluvia resultante es, usualmente, localmente distribuida y de corta duración, pero puede ser de alta intensidad. Este tipo de precipitación es muy común en el verano (Kimmins 1997).

b. *Precipitación orográfica:* Esta se presenta cuando el aire húmedo caliente es forzado a ascender sobre las montañas por los movimientos de las masas de aire. Algunas montañas son asociadas con el término nubosos (Kimmins 1997).

c. *Precipitación frontal:* Esta ocurre cuando el aire húmedo caliente es forzado a subir sobre las masas de aire frío. Esta generalmente produce lluvias prolongadas en grandes áreas, y es frecuentemente de una intensidad baja a moderada (Kimmins 1997).

La humedad puede ser transferida del aire a la superficie terrestre en diferentes maneras, la más común a través de la lluvia. El efecto ecológico de esto no está determinado sólo por la cantidad total por año sino también por la intensidad y la distribución estacional. La precipitación con un tamaño de gota menor de 0.5 mm y una intensidad de 0.25 mm hr^{-1} es llamada llovizna; la lluvia tiene gotas de 2.5 – 6.4 mm de diámetro, y con una intensidad de $15 - 100 \text{ mm hr}^{-1}$, y una velocidad de 20 mm seg^{-1} , casi el doble de la velocidad de la llovizna (Kimmins 1997).

La intensidad de la lluvia tiene importancia ecológica también. Fuertes lluvias pueden dañar el follaje de las plantas, quebrar la vegetación herbácea, alterar la estructura de la superficie del suelo y erosionar el suelo, y matar, desplazar o interferir en las actividades de los microorganismos. La llovizna crea mayores cantidades de agua disponibles para las plantas, y es distribuida a través de largos períodos. Es además más efectiva en la lixiviación de compuestos químicos, que se encuentran en el follaje de las plantas, que una lluvia intensa con igual cantidad de agua precipitada. Por otro lado, la lluvia intensa es más efectiva para la lixiviación de químicos del suelo, que la lluvia leve (Kimmins 1997).

El rocío es la condensación del vapor de agua en suelos fríos, o en superficies frías de las plantas, y este puede tener una importancia ecológica importante en la adición de agua en algunos ecosistemas. Por la formación de una capa de humedad en el follaje, la transpiración es reducida durante la noche, conservando la humedad del suelo que es utilizada en el siguiente día. Cuando existen altas tasas de rocío, el agua corre a través de las ramas y tallos y es depositada en el suelo, de donde es reutilizada. La máxima cantidad de rocío que puede ser depositada por noche es aproximadamente 1 mm, aunque regularmente es mucho menos que esto. Posiblemente el rocío no sea de mucha importancia en el ciclo del agua, pero sí en los procesos germinativos y en la sobrevivencia de plantas jóvenes en sitios secos (Kimmins 1997).

Las gotas de niebla son una entrada de agua que resulta de la niebla y las partículas de la niebla (0.01 – 0.1 mm de diámetro) que hacen contacto con la superficie de la vegetación. La niebla es particularmente importante en los bosques a altas elevaciones. La captación de niebla aumenta con el incremento de la densidad de la vegetación, a más vegetación más volumen de neblina que puede ser captada (Kimmins 1997).

2. *Intercepción de agua precipitada por la vegetación.* No toda la precipitación que cae sobre la superficie vegetal llega a la superficie del suelo. De igual manera, mucho del rocío y gotas de niebla acumuladas durante la noche son evaporadas en las primeras horas de la mañana y nunca llegan al suelo. La pérdida de agua que regresa a la atmósfera de la precipitación que ha sido interceptada por la vegetación es llamada *pérdida por intercepción* (Kimmins 1997).

La magnitud de la pérdida por intercepción depende de la capacidad de intercepción de la vegetación, en el total de energía capaz de evaporar el agua de la vegetación y del movimiento y de la humedad del aire.

La pérdida por la evaporación es mayor en verano debido a las altas tasas de déficit de presión de vapor en el aire y los largos tiempos transcurridos entre lluvias. En el invierno las bajas o nulas tasas de déficit de presión de vapor en el aire evitan las pérdidas por evaporación (Kimmins 1997).

La capacidad de intercepción de los árboles y de los arbustos puede variar entre 0.25 y 7.6 mm de lluvia. La pérdida por intercepción de lluvia por los árboles varía desde el 100% con lloviznas de verano en climas muy secos y 0% en fuertes lluvias o lluvias continuas en inviernos en climas húmedos.

La pérdida por intercepción es menor en bosques deciduos en la época en que se cae el follaje.

3. *Redistribución del agua a través de la vegetación.* El agua interceptada por los árboles es redistribuida en su mayoría en dos vías: 1) *throughfall*: la porción que gotea directamente desde el follaje al suelo, y 2) *stemflow*: la que fluye hacia abajo a través del tallo (Kimmins 1997).

La que fluye a través del tallo se ve afectada por la textura del tronco. Especies con una textura lisa tienen poca capacidad de retener agua, por lo que con un poco más de 1 mm de lluvia, ya corre el agua por sus tallos. Cuando las especies tiene una textura rugosa en su tallo pueden retener agua, y pueden llegar a necesitar hasta 2 cm de lluvia para que el agua empiece a fluir hacia abajo del tronco.

El agua que llega a la base de los troncos penetra rápidamente el suelo a través del sistema de raíces. Es por esto que los bosques con altas tasas de “*stemflow*” tienen un comportamiento hidrológico diferente a aquellos con bajas tasas de “*stemflow*”. La rápida entrada del agua y la penetración del “*stemflow*” al suelo reduce las pérdidas por evapotranspiración y además aumenta la cantidad de agua disponible para las plantas. Esto es muy importante para vegetaciones en climas secos, y muchas especies de estas regiones tienen una morfología que favorece el flujo de agua en sus tallos (Kimmins 1997).

4. *Infiltración en el suelo.* El agua que alcanza la tierra puede fluir lateralmente sobre la superficie o penetrar en el suelo en un proceso llamado **infiltración**. Ya dentro del suelo, el movimiento de agua es conocido como **percolación**.

El término infiltración se aplica, por lo general, al modo como penetra toda el agua en el suelo. La tasa de agua que penetra en el suelo se determina de manera más específica por el contenido inicial de agua, la permeabilidad de la superficie, las características internas del suelo (como son el espacio poroso, el grado de dilatación de los coloides del suelo, así como el contenido de materia orgánica), la intensidad y la duración de la precipitación pluvial, y la temperatura del suelo y del agua. Solamente cuando la intensidad de la precipitación pluvial excede a la capacidad de retención de un suelo, puede ocurrir el escurrimiento. En virtud de la acción esponjosa de la mayor parte de los suelos forestales y la elevada tasa de infiltración del suelo mineral que se halla debajo, existe una escasa oportunidad para la pérdida superficial del agua en los bosques maduros. Por lo general, el flujo sobre la tierra no es un problema serio en los bosques no alterados, ni siquiera en las regiones montañosas escarpadas (Kramer 1969).

Cuando la precipitación pluvial excede la capacidad de infiltración, el exceso de agua se acumula sobre la superficie y luego fluye sobre la tierra hacia los arroyos. Este flujo superficial al no encontrar los obstáculos se concentra en ciertos arroyos y produce flujos de máxima concentración en un tiempo más breve que el agua que se infiltra y pasa a través del suelo antes de reaparecer como flujo de corriente. El flujo de alta velocidad sobre la tierra puede producir daños de erosión (Kramer 1969).

La compactación del suelo por medio de la maquinaria agrícola, sobrepastoreo, las alteraciones que se producen por la preparación del suelo, así como las prácticas que reducen la capacidad de infiltración y hacen que el agua corra sobre la superficie del suelo, son de gran interés para cualquier manejo forestal.

El inicio del proceso está dado cuando comienza la lluvia. Si el suelo está descubierto la gota de lluvia impacta a una velocidad que puede alcanzar una velocidad de hasta 9,3 m/seg y el efecto del golpe provoca la saltación de las partículas que llegan hasta 1,5 m de distancia. Este golpe además rompe los agregados más superficiales, arrastra materiales finos (95 % es limo y arcilla), comienza a llenar los espacios porosos con ese material y en poco tiempo se sellan formándose una delgada costra impermeable denominada también

“planchado de suelos”. Este fenómeno que puede ocurrir en minutos, puede impedir que gran parte del agua caída no penetre en el suelo (Brady 1974).

Este efecto de compactación es mayor si el suelo está desnudo. Cuando existe algún tipo de cobertura, ya sea viva o muerta, que cubra el 50 % de la superficie del terreno, se logra neutralizar hasta el 90 % la salpicadura.

Los cultivos no suelen aportar grandes cantidades de restos vegetales (menos de 1 ton/ha), no así el pastizal y pajonal (más de 4 ton/ha) y el bosque con más de 15 ton /ha. De estos aportes el 30 % llega a incorporarse al suelo por actividad biológica.

El bosque produce, al interceptar la fuerza cinética de la lluvia, una disminución del efecto erosivo y de compactación y además, según la densidad de la cobertura y los estratos presentes, puede retener hasta 7,75 mm de lluvia (Brady 1974).

La declividad así como el largo de la pendiente condiciona la cantidad y la velocidad del agua que escurre. En el campo puede observarse esta influencia ya que el agua, cuando el desnivel es considerable, corre en forma acelerada tendiendo a formar pequeños encauzamientos, y en manto o laminar cuando la pendiente es muy baja o nula (Kramer 1969).

Los efectos erosivos pueden alcanzar valores muy altos (112 ton/ha) con 0% de cobertura y 10 ton/ha con superficie cubierta de 40 %, en el mismo sitio. Aún cuando la erosión no tiene la espectacularidad de lugares de alta inclinación, se remueven y transportan partículas orgánicas. Esto puede visualizarse en el campo cuando el agua escurre y forma “espuma blanca” (Kramer 1969).

La posibilidad que el agua penetre en el suelo está directamente relacionada con la velocidad del escurrimiento y la porosidad del suelo (macros y micros poros) que se localizan intra e inter agregados y que forman la arquitectura del suelo.

En el cuadro siguiente se diferencian la agregación de partículas y porosidad en distintas situaciones de cobertura de suelo.

Cuadro No. 1. Porcentaje de agregación de partículas y porosidad en distintas situaciones de cobertura de suelo.

| Cobertura | % de agregación | % de porosidad | % de macroporos |
|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Bajo bosque | 91 | 57 | 22 |
| Bajo pasto | 90 | 55 | |
| Cultivo | 58 | 49 | 7 |

Estos valores condicionan la infiltración del agua de lluvia en el suelo que varía enormemente de acuerdo al ambiente y el paisaje. Siendo así que en un bosque alto exista una infiltración de 60 mm/hora, mientras que en un campo cultivado únicamente 12 mm/hora (Brady 1974).

También es importante el tipo y la abundancia de la cobertura del suelo y su influencia directa sobre el escurrimiento del agua, según se observa en los cuadros siguientes:

Cuadro No. 2. Valores de escurrimiento para espesores de restos vegetales (rastros o cobertura muerta).

| Espesor de restos vegetales (cm) | Escorrentía (mm/min) |
|----------------------------------|----------------------|
| 1.2 | 0.005 |
| 0.7 | 0.080 |
| 0.2 | 0.180 |
| 0.1 | 0.300 |

Cuadro No. 3. Porcentajes de escorrentía para diversas coberturas boscosas.

| % de Cobertura boscosa | % Escorrentía superficial |
|------------------------|---------------------------|
| 0 | 65 – 75 |
| 10 | 25 – 45 |
| 20 | 18 – 25 |
| 30 | 14 – 18 |
| 50 | 10 – 14 |
| 60 | 8 |

La capacidad que el agua penetre en el suelo está condicionada por los agregados y la porosidad, que tienen su origen en la materia orgánica. Ésta puede representar hasta un 5 % del total del volumen de suelo, sobretodo superficialmente donde el desarrollo radicular (65 %) adquiere mayor presencia (Kramer 1969).

También son importantes los poros biológicos conformados por túneles y excavaciones de la fauna del suelo, encargada del proceso de transformación de esos materiales, y por los espacios que quedan cuando se mueren y descomponen las raíces de las plantas.

Merecen un cuidado especial los suelos de escasa profundidad y también aquellos que tienen tasas de infiltración baja, de manera inherente. Los suelos que son húmedos debido a los mantos acuíferos estacionarios o a causa de su posición a lo largo de las vías de drenaje, son extraordinariamente susceptibles a la reducción en cuanto a porosidad y permeabilidad por efecto de la compactación (Brady 1974).

Como consecuencia de una mejor estructura, de un mayor contenido de materia orgánica, y de la presencia de canales, las tasas de filtración en los suelos forestales son considerablemente mayores que en los suelos similares sujetos a cultivo continuo.

La presencia de piedras aumenta la tasa de infiltración de agua en los suelos a causa que las diferencias en expansión y contracción entre las piedras y el suelo dan por resultado la formación de canales y macroporos. Sin embargo, las piedras reducen la capacidad de almacenamiento y de retención de los suelos (Kramer 1969).

La infiltración debida a las lluvias intensas, por lo general disminuye a medida que aumenta el grado de pendiente, pero el microrelieve producido por el desgarramiento de los árboles en los campos antiguos, en los derrumbes de rocas, deslizamientos y otras causas, dan lugar a cuencas u hondonadas que favorecen la infiltración hasta en las laderas más empinadas (Kramer 1969).

5. *Agua en el suelo.* La función del agua del suelo en el manejo de los bosques es extraordinariamente importante porque un gran porcentaje de las tierras que son o muy húmedas o muy secas para el uso agrícola, están relegadas a la silvicultura. El aprovisionamiento de humedad en los suelos determina en gran medida el tipo de árbol que puede cultivarse y, de esta manera, influye en la distribución de los bosques en todo el mundo. Los suelos que están abundantemente dotados de minerales son del todo

improductivos si no tienen agua, pero incluso las arenas empobrecidas pueden sostener bosques razonablemente productivos si cuentan con la humedad adecuada (Kimmins 1997).

El agua tiende a moverse de una zona de alta energía libre a una de energía libre baja o sea, de un suelo húmedo a un suelo seco. Sin embargo, el grado de movimiento depende de las diferencias que existen en los estados energéticos (potenciales), entre dos zonas. Las fuerzas que afectan la energía libre del agua del suelo son: la atracción de los sólidos del suelo por el agua mediante la adsorción y la capilaridad, llamada fuerza mátrica, y la atracción de los iones y otros solutos por el agua, dando como resultado las fuerzas osmóticas, y ambas tienden a reducir la energía libre de la solución del suelo. La gravedad es la tercera fuerza que actúa sobre el agua del suelo, tendiendo a moverla desde una parte alta hacia otra más baja. El potencial total del agua del suelo, por tanto, es la suma de las fuerzas mátrica, osmótica y gravitacional (Pritchett 1986).

6. *Pérdida de agua por evaporación y transpiración.* El agua del suelo se puede perder principalmente por tres grandes razones: gravedad (drenaje a aguas subterráneas y escorrentía superficial), evaporación y transpiración.

Las pérdidas por gravedad pueden estar muy reducidas en las regiones de escasa precipitación pluvial o en los climas cálidos en donde las tasas de evapotranspiración son altas. A medida que se añade humedad a la superficie de un suelo uniformemente seco, el contenido de humedad de la capa afectada se eleva a su capacidad capilar y debajo de esta capa se nota escasamente el efecto. Con otras adiciones de agua, la frontera interior de la zona húmeda avanza hacia abajo hasta que el exceso de agua pasa al manto acuífero subterráneo. El agua gravitacional avanza más rápido en los suelos arenosos que en los de textura fina a causa del alto porcentaje de poros no capilares (Pritchett 1986).

La evaporación del agua en los suelos de escasa profundidad aumenta a medida que hay un mayor porcentaje de materiales en el suelo. Las pérdidas por evaporación también están influenciadas por la velocidad del viento y la humedad relativa de la atmósfera. El movimiento del viento aumenta la evaporación acelerando el ritmo con el que el aire húmedo de una superficie de evaporación se sustituye por aire más seco. Un follaje forestal sin capa de "litter" puede reducir la evaporación hasta en un 50% de la que se produce en un suelo no forestal, a causa de la sombra y la reducción en el movimiento del viento. La presencia de una capa de "litter" reduce la evaporación todavía más (Pritchett 1986).

La capacidad de almacenamiento, retención y detención de un suelo también influyen en la pérdida del agua infiltrada en él. Un suelo de textura fina tiene una capacidad de retención mayor que las arenas y puede almacenar mayores cantidades de agua después de las tormentas. Sin embargo, la profundidad efectiva del suelo (profundidad de arraigamiento) y el contenido de humedad inicial son factores que también influyen en la cantidad de agua de lluvia que los suelos pueden retener para que las plantas lo usen posteriormente (Kramer 1969).

Valores en la infiltración de dm/hora corresponden a suelos muy permeables, cm/hora dan suelos permeables y mm/hora para suelos poco permeables.

La velocidad de infiltración no es siempre la misma para un mismo suelo, pues depende de las condiciones de humedad que presente. Cuando el suelo se encuentra seco la infiltración tiene sus máximos valores y luego conforme cada vez esta más húmedo su capacidad de admitir más agua es cada vez menor hasta que en condiciones de saturación total alcanza un valor constante (Pritchett 1986).

Según USDA, Handbook N°18, las categorías de drenaje están clasificadas dependiendo la velocidad de infiltración (cm/hr) como sigue en el cuadro 4.

Cuadro No. 4. Categoría de drenaje interno del suelo.

| Categoría de drenaje | Velocidad de infiltración (cm/hr) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Muy lento, imperfecto | < 0.13 |
| Lento | 0.13 – 0.51 |
| Moderadamente lento | 0.51 – 2.00 |
| Moderado | 2.00 – 6.30 |
| Moderadamente rápido | 6.30 – 12.70 |
| Rápido | 12.70 – 25.40 |
| Muy rápido / Excesivo | > 25.40 |

La transpiración es la pérdida de agua de las células de los tejidos de la plantas a la atmósfera por vaporización. El agua es absorbida por las raíces del suelo y es transportada hacia las hojas, por medio del xilema ubicado en las raíces y tallos. Este proceso de absorción y traslocación es llevado a cabo por la energía solar que cae sobre las hojas y tallos, la cual promueve la evaporación de agua de las células mesofílicas ubicadas en las

superficies de las hojas. Esta evaporación causa un déficit de agua en las células del follaje el cual es transmitido a través de la columna de agua por los tallos y raíces, en donde se toma el agua del suelo. Esto causa una disminución de agua en la rizósfera, lo cual a su vez promueve el movimiento del agua cercana hacia las raíces (Kramer 1969).

La cantidad de agua transpirada por el bosque varía dependiendo la especie, la cantidad de follaje, la capacidad de agua en el suelo, y la capacidad de la energía solar de evaporar el agua de las hojas. La variación entre especies es resultado de las diferencias en la resistencia de las estomas, la resistencia interna al movimiento del agua, y la capacidad de absorción de agua de las raíces.

El agua del suelo que no se pierde por evaporación y/o transpiración se mueve hacia los mantos freáticos (aguas subterráneas) o se desplaza hacia los ríos. La velocidad con la cual el agua se mueve de la tierra a los ríos depende si se infiltra en el suelo o corre como escorrentía sobre la superficie (Pritchett 1986).

Una vez en el suelo, la velocidad de movimiento a los ríos depende de la textura y estructura del suelo, que ayudan a determinar la capacidad hidráulica del suelo. La velocidad también depende de la abundancia de raíces viejas en el suelo, las cuales van formando canales cuando mueren y se descomponen. Estos son importantes en la mayoría de cabeceras de cuenca, ya que pueden contribuir a una respuesta rápida de flujo de corriente a acontecimientos de precipitación aún cuando no exista escorrentía superficial.

7. *Mantos acuíferos o aguas subterráneas.* El nivel superior de la zona de saturación en un suelo se llama manto acuífero subterráneo o “manto freático”. Extendiéndose hacia arriba a partir del manto acuífero existe un cinturón de suelo húmedo conocido como margen capilar. En los suelos de textura fina esta zona de humedad puede aproximarse a una altura de un metro o más, pero en los suelos arenosos raramente supera los 25 ó 30 cm. En algunos suelos la altura del manto freático fluctúa considerablemente entre los períodos húmedos y secos. Estas variaciones se deben a las variaciones de precipitación, transpiración, evaporación y temperatura.

También se han notado cambios diurnos en los niveles del manto freático, debido a las diferencias en las tasas de transpiración entre el día y la noche (Lyford 1964).

Algunos investigadores han observado un ascenso en el manto acuífero del suelo debido a una reducción en la evapotranspiración después de la eliminación del follaje en

áreas húmedas (Trousdel y Hoover 1955; Wilde 1958). Esto debido principalmente a que los procesos de intercepción y evapotranspiración que los árboles llevan a cabo, se ven eliminados del área al mismo tiempo que se elimina la cobertura boscosa.

Sin embargo, el aumento en el manto acuífero asociado a la destrucción o eliminación de una cubierta forestal contribuye al flujo torrencial disminuyendo el potencial de almacenamiento de agua en el suelo. La lluvia que cae sobre un suelo saturado corre sin atenuación directamente hacia los canales en el perfil del suelo. En los terrenos de ladera empinada, la mayor fuerza del agua plantea problemas de erosión, y contribuye al azolve de los lagos, así como una posible eutroficación.

Es importante notar que cada vez es más evidente que la calidad de agua es de una importancia mayor que la cantidad de agua. Los suelos forestales y las capas de "litter" asociadas constituyen filtros excelentes, y actúan como esponjas, y el agua pasa a través de este sistema es relativamente pura. Sin embargo, las alteraciones forestales de distintos tipos pueden acelerar el movimiento del agua dentro del sistema y, en realidad, producir una especie de corto circuito en la acción del filtramiento.

Se pueden distinguir principalmente tres tipos de agua subterránea:

- Aguas meteóricas / aguas del intercambio: Son aguas que siempre o periódicamente participan en el ciclo hidrológico y que circulan más superficial en niveles altos del subterráneo.
- Aguas de reserva: Son aguas que circulan en niveles bajos y que no pertenecen al ciclo periódico. Muchas veces este tipo de agua no participa en el ciclo hidrológico, y no se alimenta tampoco por precipitaciones o por otros procesos. Una vez explotado este agua, el agua de reserva desaparece sin ser renovado.
- Aguas profundas / aguas de formación: Este agua tampoco pertenece participa en el ciclo hidrológico (o sea, solamente durante tiempos geológicos). El agua de formación representa agua atrapada durante los procesos de sedimentación. Muchas veces estas aguas son saladas.

Una diferenciación muy exacta entre estos tipos recientemente mencionados no siempre es posible; tampoco se puede decir en forma general a que profundidad se encuentran los límites de los diferentes tipos.

B. El suelo

La estructura del suelo está dada por la ordenación de las partículas primarias (arena, limo y arcilla) en la forma de agregados en ciertos modelos estructurales, que incluyen necesariamente el espacio poroso. Aunque no sea considerado un factor de crecimiento para las plantas, la estructura del suelo ejerce influencia en el aporte de agua y de aire a las raíces, en la disponibilidad de nutrimentos, en la penetración y desarrollo de las raíces y en el desarrollo de la macrofauna del suelo.

Desde el punto de vista del manejo del suelo, una buena calidad de la estructura significa una buena calidad del espacio poroso, o sea, buena porosidad y buena distribución del tamaño de poros. Así, la infiltración del agua, juntamente con la distribución de raíces en el perfil son los mejores indicadores de la calidad estructural de un suelo (Cabeda 1984). Características tales como la circulación del agua, la aireación, la densidad aparente y la porosidad están influenciadas de manera considerable por la disposición o agregación general de las fracciones iniciales del suelo (De las Salas 1987).

La densidad aparente (dap), se refiere a la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que ocupó dicha muestra en el campo, con su ordenamiento natural. Por lo tanto la dap variará en función de la textura, del estado de agregación, del contenido de materia orgánica, del manejo que recibió el suelo, del contenido de humedad (sobre todo en suelos con materiales expandibles).

Los suelos poseen naturalmente diferentes densidades debido a variaciones de la textura, de la porosidad y del contenido de materia orgánica. Brady (1974) cita que suelos arenosos poseen una densidad del suelo de 1,20 a 1,80 g/cm³ y una porosidad de 35 a 50%, mientras que suelos arcillosos poseen una densidad de 1,00 a 1,60 g/cm³ y una porosidad de 40 a 60%.

Los valores adecuados de la densidad del suelo fueron definidos por Archer y Smith (1972), como aquellos que proporcionan la máxima disponibilidad de agua y por lo menos 10% de espacio de aire en un suelo sometido a una succión de 50 mb. Según esos autores, las densidades del suelo oscilan alrededor de 1,75 g/cm³ para suelos de textura arena franca, 1,50 g/cm³ para suelos franco arenosos, 1,40 g/cm³ para suelos franco limosos y 1,20 g/cm³ para franco arcillosos.

La humedad edáfica, es una forma de indicar la cantidad de agua presente en el perfil del suelo, a una dada profundidad, estrato u horizonte del suelo, en un momento determinado. Puede ser expresada de tres maneras:

- como Humedad Gravimétrica (en relación a la masa) (g/g), es la relación entre la masa de la fracción líquida y la masa de la fracción sólida,
- como Humedad Volumétrica (en relación al volumen) (cc/cc), es la relación entre el volumen de la fracción líquida y el volumen de la muestra seca, o
- como Lámina (mm)

La humedad del suelo en términos volumétrico es más conveniente para el diagnóstico, por cuanto expresa más claramente el volumen de suelo que está ocupado por agua. En otras palabras, dos suelos pueden tener la misma humedad gravimétrica, pero distinto volumen de agua si las densidades son diferentes.

La lámina (L) es una forma de expresión de mucha utilidad porque no depende del área. Para calcularla basta multiplicar la HV por la profundidad considerada.

1. *Clasificación de suelos.* La cuenca del río Colorado está conformada por tres clases de suelos: Chol, Tamahú y Marajuma, según la Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la República de Guatemala (Simmons 1959). La descripción se presenta a continuación:

a. Chol (Chg). Los suelos Chol son poco profundos, excesivamente drenados, desarrollados sobre esquisto en un clima seco a húmedo-seco. Ocupan relieves inclinados a elevaciones medianas en la parte central de Guatemala. Están asociados con los suelos Marajuma, Civija y Acasaguastlán, pero son mucho menos profundos, son más secos que los primeros dos y se desarrollan sobre esquisto, mientras que los Acasaguastlán están desarrollados sobre roca serpentina. Se asemejan a los suelos Sacapulas, pero éstos están desarrollados sobre granito y gneis y en la mayoría de los lugares tienen más encino en la vegetación. La cubierta vegetal más común es pino en bosques abiertos con grama delgada.

1) Perfil del suelo. *Chol franco arenoso fino gravoso.* El suelo superficial, a una profundidad alrededor de 2 centímetros, es franco arenoso fino gravoso, suelto, de color café a café amarillento, que tiene una cantidad moderada de materia orgánica. La grava consiste de fragmentos de esquisto y cuarzo. En casi todos los lugares carece de

estructura, pero en otros se ha desarrollado una granular. La reacción es muy fuertemente ácida, pH de 4.5 a 5.0.

El suelo superficial, a una profundidad alrededor de 10 centímetros, es de franco arenoso gravoso a franco arcilloso-arenoso, friable, de color café grisáceo o café rojizo. Se ha observado una estructura cúbica poco desarrollada en la mayoría de los lugares. La reacción es muy fuertemente ácida, pH de 4.5 a 5.0.

El subsuelo, a una profundidad de 30 ó 40 centímetros, es franco arcilloso gravoso de color café a café rojizo. En algunos lugares se ha desarrollado una estructura cúbica. La reacción es muy fuertemente ácida, pH de 4.5 a 5.0.

El substrato es esquisto suave que varía en el grado de intemperización y en el contenido de mica.

2) Variaciones. Gran parte del área — en algunos lugares el 50 % — consiste en roca desnuda, el suelo tiene más del 50 por ciento de fragmentos de esquisto y cuarzo. En casi todos los lugares, como cerca de Granados en Baja Verapaz, la roca madre tiene un contenido alto de mica, pero en otros, como al este de Chiquimula, es bajo. En ciertos lugares, tales como en la vecindad de Salamá, el suelo es gris; en general, sin embargo, el suelo es de color café rojizo. En las áreas protegidas, o cañadas, la vegetación es densa e incluye liquidámbar, pero estos son lugares donde el suelo es más profundo y más parecido a los suelos Marajuma.

3) Uso y recomendaciones. Prácticamente toda el área del suelo Chol está en potreros con bosques y poco o nada está cultivado. En algunos lugares quizás se podría aumentar la capacidad de pastoreo. La vegetación forestal indudablemente puede mejorarse. Gran parte del área debería ser plantada o protegida contra el fuego y del pastoreo excesivo, para que haya una regeneración natural de la vegetación. El pino crece muy despacio en este suelo y sería conveniente buscar una especie de eucalipto y plantarla donde haya escasez de madera. Este suelo parece ser conveniente para el pastoreo en gran escala, pero se deben hacer estudios para determinar la capacidad de pastoreo antes de iniciar tal industria.

4) Topografía y geología. Ocupan pendientes muy inclinadas, muchas con más del 50 %, sobre formaciones antiguas del esquisto. Se encuentran a elevaciones entre 900 y 1,800 metros sobre el nivel del mar.

5) Localización y extensión. Se encuentran en los departamentos de Zacapa, El Progreso, Baja Verapaz y El Quiché. Comprenden 185,777 hectáreas, o sea el 1.706 % del área de la República, en la Clasificación de Reconocimientos de Suelos.

b. Marajuma (Mj). Los suelos Marajuma son profundos, bien drenados, desarrollados sobre esquistos, en un clima húmedo-seco. Ocupan relieves inclinados a altitudes medianas, en la parte central de Guatemala están muy asociados con los suelos Chol, pero son más profundos, de forestación más densa y se han desarrollado en situaciones más húmedas que éstos. Se asemejan y forman una clase de cadena con los Civija, Telemán, Tahuainí, Gacho y Chol. Las diferencias resultan de las variaciones en cantidad de precipitación de lluvia, en la elevación y en la roca madre. En lo que respecta a altitud, se encuentran entre los suelos Civija y Telemán y parecen haberse desarrollado en situaciones más secas que éstos. El material madre tiene más esquistoso y menos esquistoso arcilloso que los Gacho y Tahuainí. En la Clasificación de Reconocimiento de Suelo, un área del departamento de San Marcos está incluida con los suelos Marajuma. Esta área está asociada con los suelos Sinaché y Patzité y ha sido influenciada por ceniza volcánica. La vegetación nativa consiste de bosques deciduos mezclados con pino e incluyen liquidámbar y encino.

1) Perfil del suelo. *Marajuma franco limoso*. En las áreas vírgenes existe en la superficie una capa de materia orgánica que consiste de ramita y hojas recién caídas, que están descompuestas o parcialmente descompuestas. En algunos lugares esta capa alcanza un espesor de 10 centímetros, siendo el promedio de 5 centímetros.

El suelo superficial, a una profundidad alrededor de 5 centímetros, es franco limoso, micáceo y friable, de color café oscuro. La estructura es granular fina. La reacción es mediana a ligeramente ácida, pH alrededor de 6.0.

El subsuelo, a una profundidad de unos 50 centímetros, es franco limoso micáceo y friable, de color café rojizo a amarillo rojizo. La estructura es cúbica, poco desarrollada, teniendo los agregados alrededor de 2 mm de arista. La reacción es medianamente ácida, pH 5.5 a 6.0.

El subsuelo más profundo, a una profundidad alrededor de un metro, es arcilla micácea friable, de color café rojizo claro o amarillo rojizo. La estructura es cúbica fina, teniendo

los agregados de 2 a 3 mm de arista. La reacción es de fuerte a medianamente ácida, pH alrededor de 5.5.

El substrato es esquisto micáceo descompuesto y suave.

2) Variaciones. El contenido de mica varía localmente y de área en área, de poca cantidad a cantidades suficientes como para producir una sensación untuosa al tacto. La profundidad del suelo varía de 50 centímetros a más de un metro. En muchos lugares parece haber habido un complemento de caliza en la roca madre. Se encuentran algunos afloramientos de caliza.

3) Uso y recomendaciones. Casi toda el área está forestada, pero una parte está en pastos y ocasionalmente se encuentra maíz. No es conveniente para la labranza por ocupar pendientes muy escarpadas. Unas partes pueden usarse para pastos, sin embargo casi toda el área debería dejarse forestada. La producción forestal puede aumentarse quitando las plantas indeseables y protegiendo contra el fuego. El café particularmente al sol, se cultivaría con éxito a elevaciones menores de 1,500 metros sobre el nivel del mar.

4) Topografía y geología. Ocupan relieves escarpados, siendo la inclinación mayor de 60 % en muchas partes. Están desarrollados sobre esquisto que tiene un contenido variable de mica.

5) Localización y extensión. Se encuentran en la parte central de Guatemala, principalmente en la Sierra de las Minas. Son extensos en Baja Verapaz, El Progreso, Izabal y también se encuentran en San Marcos. Comprenden 114,554 hectáreas, o sea el 1.052 % del área de la República en la Clasificación de Reconocimiento de Suelos.

c. Tamahú (Tm). Los suelos Tamahú son poco profundos, de bien a excesivamente drenados, desarrollados sobre caliza en un clima húmedo a húmedo-seco. Ocupan relieves inclinados a altitudes medianas en la parte central de Guatemala. Están asociados con los suelos profundos Cobán y se asemejan a los Chacalté, los cuales se encuentran a altitudes más bajas. La vegetación nativa consiste principalmente de un bosque decíduo, pero hay algo de pino en casi todas las áreas.

1) Perfil del suelo. *Tamahú franco*. El suelo superficial, a una profundidad de 2 a 5 centímetros, es franco o franco arcilloso, friable, de color café muy oscuro, que tiene un contenido alto de materia orgánica (25 %). La estructura es granular. El suelo es calcáreo.

A una profundidad cerca de 50 centímetros, el suelo es franco calcáreo a franco arcilloso, friable, de color café oscuro, que tiene un contenido de materia orgánica de alrededor del 9 por ciento. La estructura es de granular a cúbica y en algunos lugares, el suelo es masivo.

El substrato es caliza o mármol.

2) Variaciones. La profundidad del suelo varía de unos pocos centímetros a casi un metro y los afloramientos de roca son numerosos. En algunos lugares la superficie del área es de 50 % de roca. La textura de la superficie y del subsuelo, es arcilla en algunos lugares. Incluidas con las áreas de suelos Tamahú, en la Clasificación de Reconocimiento de Suelos, están unas de suelos Calanté, Cobán, Carchá y de suelos desarrollados sobre esquistos arcillosos que están estratificados en la caliza. Esta asociación de los suelos Tamahú, Calanté, Cobán y Carchá está mapificada como suelos Calanté, un poco más al oeste donde la proporción de los suelos Calanté es mayor.

3) Uso y recomendaciones. Gran parte se usa para la producción de maíz en un sistema de agricultura móvil y un área considerable está plantada con café. La producción de maíz debería ser eliminada por ser antieconómico el uso de esta tierra y el trabajo que representa tal cultivo. En muchos lugares ha ocurrido una erosión seria y en otros, la cubierta de bosque no se ha regenerado sino que en su lugar ha crecido maleza, helechos y pastos. Parece ser adecuado para la producción de café y puede expandirse su cultivo. Las plantaciones al sol deberían ser provechosas, pero deben construirse terrazas en curvas a nivel, y los espacios entre cada terraza deben estar bien cubiertos para evitar la erosión. Gran parte de estos suelos, particularmente las pendientes muy inclinadas, deberían dejarse forestadas.

4) Topografía y geología. Ocupan pendientes muy inclinadas, con relieves “karst” sobre gran parte del área. Las pendientes mayores del 100 % son comunes. La roca madre es caliza o mármol y en la mayoría de los lugares éste es carbonato de calcio relativamente puro, pero en otros hay una cantidad grande de arena y limo de grano fino.

5) Localización y extensión. Se encuentran en la parte central de Guatemala en los departamentos de Alta Verapaz, Baja Verapaz e Izabal. Comprenden 278,539 hectáreas, o sea el 2.558 % del área de la República en la Clasificación de Reconocimiento de Suelos.

2. Resumen suelos.

Cuadro No. 5. Categoría de drenaje interno del suelo.

| Serie | Símbolo | Material madre | Relieve | Drenaje interno |
|----------|---------|------------------|-----------|-----------------|
| Chol | Chg | Esquisto micáceo | Escarpado | Rápido |
| Marajuma | Mj | Esquisto | Escarpado | Bueno |
| Tamahú | Tm | Caliza o mármol | Escarpado | Rápido |

Cuadro No. 6. Características físicas del suelo superficial.

| Serie | Símbolo | Suelo superficial | | | |
|----------|---------|-------------------|---------------------|--------------|--------------------|
| | | Color | Textura | Consistencia | Espesor aproximado |
| Chol | Chg | Café grisáceo | Franco arenoso fina | Suelta | 10 |
| Marajuma | Mj | Café oscuro | Franco limosa | Friable | 5 |
| Tamahú | Tm | Café muy oscuro | Franca | Friable | 5 |

Cuadro No. 7. Características físicas del subsuelo.

| Serie | Símbolo | Subsuelo | | | |
|----------|---------|--------------------|---|--------------|--------------------|
| | | Color | Textura | Consistencia | Espesor aproximado |
| Chol | Chg | Café o café rojizo | Franco arcillosa o Franco areno gravosa | Suelta | 20 – 30 |
| Marajuma | Mj | Café oscuro | Arcilla o Franco arcillo limosa | Friable | 75 – 100 |
| Tamahú | Tm | Café oscuro | Arcilla o franco arcillosa | Friable | 30 – 40 |

C. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model

SWAT es la abreviatura, por su siglas en inglés de Soil and Water Assessment Tool, que es un modelo a escala de la vertiente de un río o una cuenca, desarrollado por el Doctor Jeff Arnold de la USDA. SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra en el agua, la sedimentación y los químicos aplicados en campo dentro de la complejidad de las cuencas con variaciones de suelos, usos de la tierra y diferentes condiciones de manejo a lo largo del tiempo. Para satisfacer este objetivo, el modelo se basa en variables físicas. Más que la utilización de ecuaciones de regresión para describir las relaciones entre las variables de entrada y las variables de salida, SWAT requiere información básica sobre el clima, las propiedades de los suelos, topografía, vegetación, y las practicas de manejo de los suelos dentro de la cuenca. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimentos, crecimiento de los cultivos, ciclo de los nutrientes, etc., son directamente modelados por SWAT utilizando la información ingresada.

Las ventajas de este proceso son:

- Las cuencas que no cuentan con monitoreo (ej. Caudales) pueden ser modelados
- El relativo impacto de los datos alternativos (ej. Cambio en las prácticas de manejo, clima, vegetación, etc.) en la calidad de agua u otras variables de interés pueden ser cuantificadas.
- Utiliza información básica disponible. Mientras SWAT puede ser utilizado para estudios de procesos especializados como el transporte de bacterias, el mínimo de información requerida para modelar es comúnmente disponible en las instituciones gubernamentales.
- Permite la realización de estudios a largo plazo. Mucho de los problemas encontrados en diferentes estudios ha sido la acumulación gradual de contaminantes y el impacto de los cuerpos de agua río abajo. Para el estudio de este tipo de problemas, los resultados son necesarios para la modelación a lo largo del tiempo.

SWAT es modelo en tiempo continuo (p.e. un modelo de producción a largo plazo). El modelo no es utilizado para simulaciones detalladas, sino más bien para obtener una clara idea de lo que puede suceder

D. Cuenca Río Colorado

La cuenca del Río Colorado se enmarca dentro de las coordenadas 15°03' a 15°10' latitud Norte y 89°35' a 89°42' longitud Oeste. Política y administrativamente pertenece al municipio de Río Hondo, departamento de Zacapa. Se localiza dentro de la Reserva de la Biosfera de las Minas (RBSM), y tiene una extensión total de 5771.89 ha y el 68.60 % de su distribución territorial está dentro de la Zona Núcleo, el 14.43 % en la Zona de Usos Múltiples y el restante 16.97 % dentro de la Zona de Amortiguamiento (FDN 2004) (Mapa No. 1).

Basados en el mapa de reconocimiento de las zonas de vida de Holdridge, en la cuenca se encuentran las zonas de vida Bosque Muy Húmedo Subtropical frío (bmh-S(f)) cuyas especies indicadoras son *Liquidambar styraciflua*, *Pinus pseudostrobus*, *Persea donell smithii*, *Eurya seemanii*, *Persea schiediana*, *Clethra* spp., arrayán, cera vegetal y Croton draco, y Bosque Pluvial Montano Bajo (bp-MB), en el que las especies indicadoras son *Podocarpus oleifolius*, *Alfaroa costaricensis*, majagua, *Engelhardtia* spp., *Billia hippocastanum*, *Magnolia guatemalensis*, *Brunellia* spp., *Oreopanax xalapense*, *Hedyosmun mexicanum* y *Gunnera* spp.

La cuenca presenta fuertes pendientes que conforman una topografía irregular con afloramientos rocosos. Presenta una elevación entre los 1,300 a 2,610 msnm. De acuerdo a su capacidad de uso el 100% de la cuenca presenta suelos aptos para bosques protectores. Es decir, que en la cuenca los suelos aptos para el desarrollo sostenible de sistemas agropecuarios, se localiza únicamente en las vegas de los ríos y otras pequeñas zonas, que por su extensión no abarcan ni el 1% del área total.

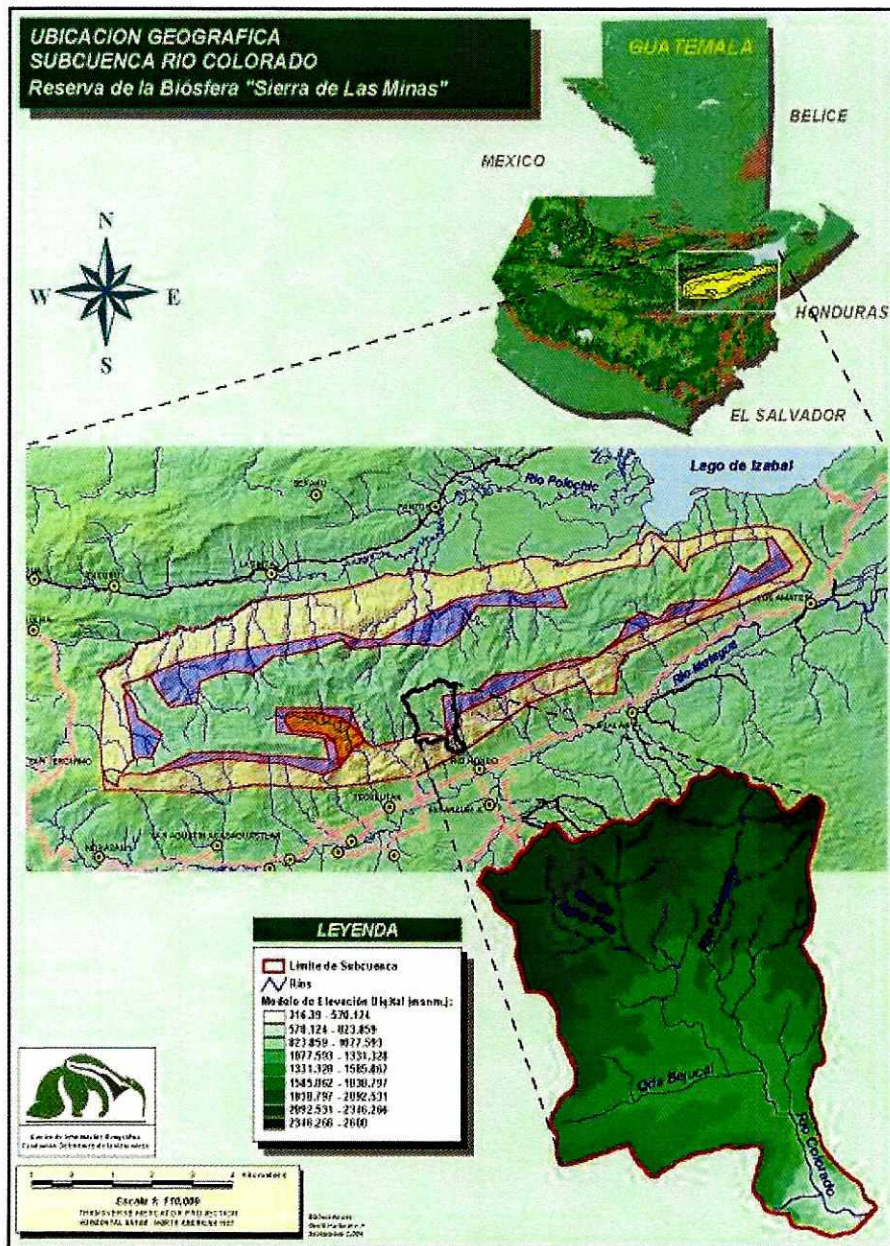
La cuenca forma parte de la Vertiente del Atlántico y de la cuenca del río Motagua; internamente está formada por sistema de drenaje del río Colorado, el cual es el principal tributario, y Agua Fría. Existen algunas quebradas tributarias entre las que están El Mono, Bejucal, La Virgen, Marmolera, entre otras. Aguas abajo existen alrededor de 15 tomas para riego, y una toma donde se capta el agua para 6 comunidades de las parte bajas.

La población de la región se clasifica como de baja densidad. Para el municipio de Río Hondo, la población estimada para el año 2002 es de 12,356 habitantes, donde el 68% reside en Río Hondo y el 32% restante en áreas rurales.

Dentro de las poblaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca se tienen las aldeas Jones, La Espinilla, Panaluya y Chancha, y los caseríos San Lorenzo y El Chorro.

Dentro de la cuenca, la población permanente es la del caserío San Lorenzo, la mayoría de sus habitantes son trabajadores de la marmolera.

Mapa No. 1. Ubicación Geográfica Cuenca Río Colorado



(Fundación Defensores de la Naturaleza 2004)

V. METODOLOGÍA

A. Análisis biofísico

El análisis biofísico de la cuenca incluyó una verificación del mapa de suelos, determinación de la cobertura vegetal y recopilación de la información climatológica de la región.

1. *Verificación de suelos.* La verificación de suelos se llevó a cabo debido a que la única clasificación que existe en Guatemala fue realizada por Simmons en 1959. Para esto se llevaron a cabo muestreos en 14 puntos diferentes de la cuenca, los cuales fueron seleccionados en un mapa de asociación de Suelos y Cobertura (Anexo A), a partir de las diferentes asociaciones formadas, en donde se hicieron calicatas y se extrajeron muestras de suelo.

Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad del Valle de Guatemala, en donde fueron analizadas y determinada la textura, densidad aparente y porosidad de cada muestra.

Para la determinación de la textura se utilizó el método del hidrómetro de Bouyoucos (Anexo B), el cual se basa en los principios de dispersión y de sedimentación de las partículas del suelo; para la determinación de la densidad aparente y la porosidad se utilizó el método de la probeta (Anexo C).

2. *Determinación de cobertura.* La cobertura vegetal fue determinada y analizada a partir de una imagen de satélite LANDSAT 2001 de 30 x 30 píxeles en el Centro de Información Geográfica del la Fundación Defensores de la Naturaleza (CIGDEF).

A partir de esta información, se generó un mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra de la cuenca.

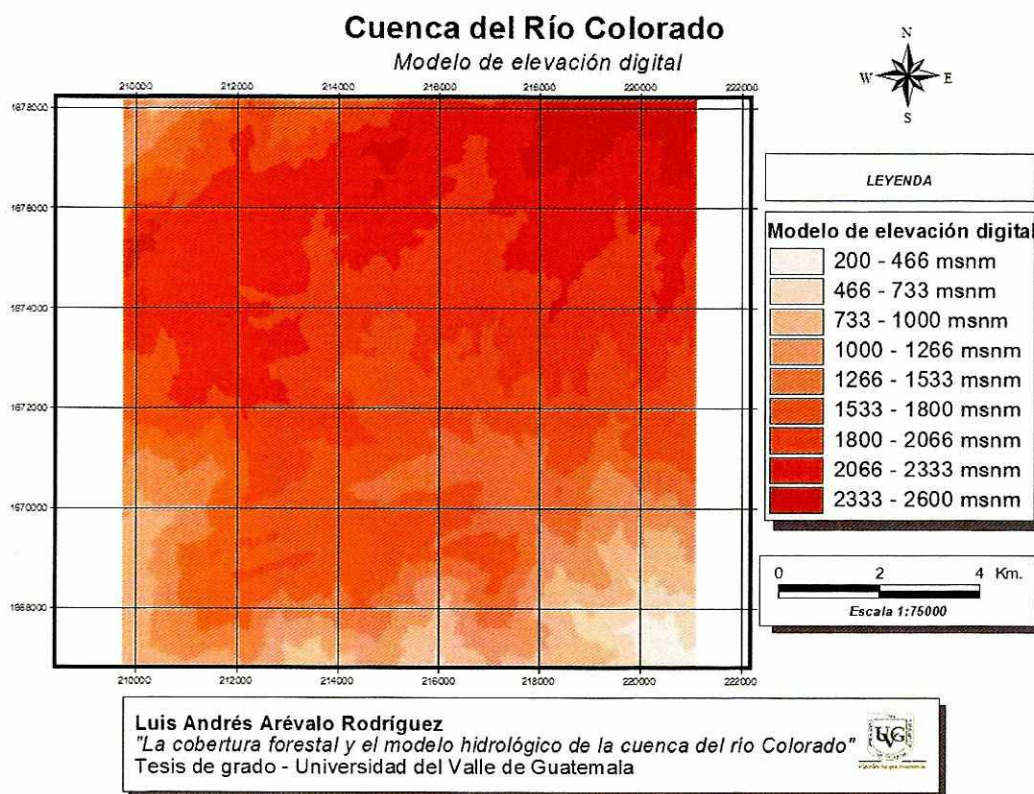
3. *Información climatológica.* La información climatológica recabada se obtuvo en el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Las variables tomadas en cuenta fueron: 1) precipitación mensual en (a) milímetros y (b) días, 2) temperatura (a) máxima y (b) mínima, y (3) humedad relativa.

Se recabó la información de 7 estaciones (Anexo C) ubicadas en la región oriental el país, siendo éstas La Fragua, Pasabién, Morazán, Ipala, Esquipulas, La Unión y Albores. A partir de la información recabada se hizo una regresión lineal entre cada variable y la altura.

Con esta información se crearon tres estaciones virtuales ubicadas dentro de la cuenca a alturas de 1690, 1860 y 2160 msnm. B. Modelo hidrológico

La modelación hidrológica se realizó a partir de imágenes electrónicas (GRID) de tres parámetros básicos: a) modelo de elevación digital (DEM) (Mapa No. 2), b) serie de suelos (Mapa No. 3), y c) el escenario de uso de la tierra.

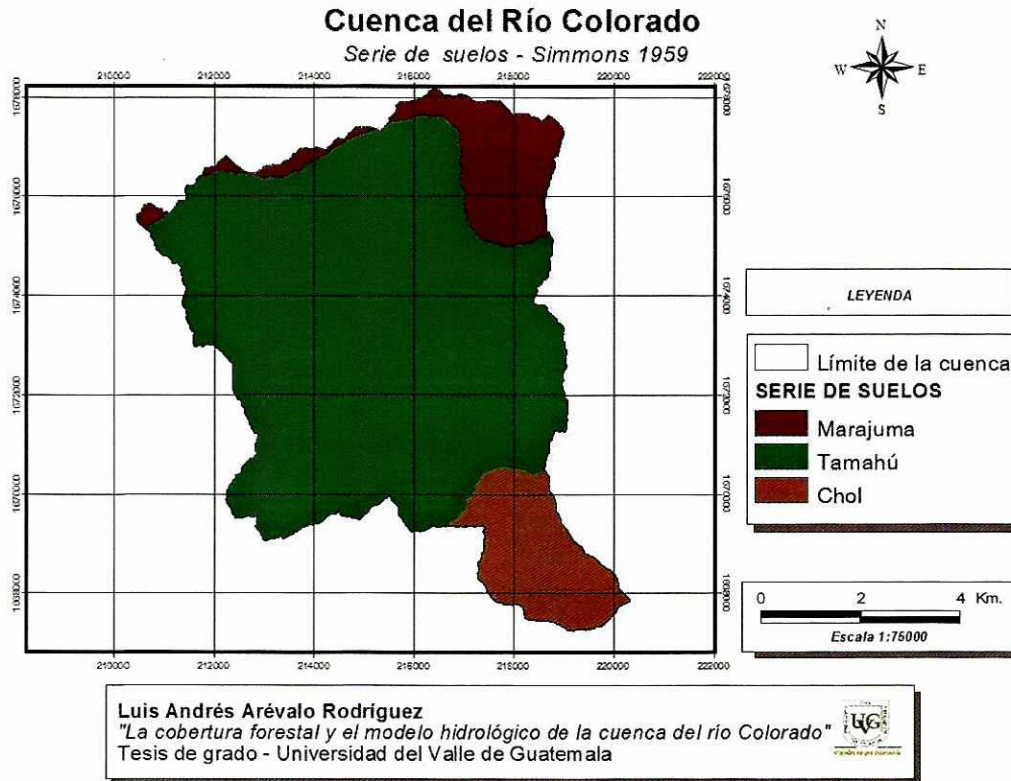
Mapa No. 2. Modelo de elevación digital de la cuenca del Río Colorado



1. *Procesamiento de Información.* Se cargó el DEM a la interfase SWAT, y ésta a partir de un análisis topográfico generó la red de ríos y delimitó las microcuencas de la cuenca. Este análisis topográfico se realizó a partir del DEM en formato grid con una retícula de 5 x 5 píxeles. Cada píxel tiene un valor de altura propio, el cual va comparando la interfase con los que tiene alrededor, para ir determinando el comportamiento del agua dentro de la cuenca.

Luego se ingresaron el mapa de suelos y de cobertura, los cuales fueron reclasificados a partir de la información de las bases de datos creadas para cada uno de los mapas, y se hizo una intersección de ellos, de la cual se generaron asociaciones de suelo y cobertura.

Mapa No. 3. Serie de suelos – Simmons 1959 de la cuenca del Río Colorado



A partir de estas asociaciones se crearon unidades de respuesta hidrológica (HRU por sus siglas en inglés), las cuales son porciones de tierra con características de uso de la tierra y de suelo específicas, y hacen que dichas porciones tengan propiedades hidrológicas propias. Para esto se establecieron como parámetros mínimos 20% de cobertura y 10 % de clase de suelo, es decir, si en una microcuenca contaba con 51% de Pino, 37% de Bosque Latifoliado y 12 % de Agricultura Anual, la Agricultura Anual fue eliminada del análisis y distribuido el 12% entre Pino y Bosque Latifoliado.

| | |
|----------------------|------|
| Pino = | 51 % |
| Bosque Latifoliado = | 37 % |
| Agricultura Anual = | 12% |
| TOTAL | 100% |

Los valores utilizados fueron,

$$\text{Pino} = (51 / 88) \times 100 = 57.95\%$$

$$\text{Bosque Latifoliado} = (37 / 88) \times 100 = 42.05\%$$

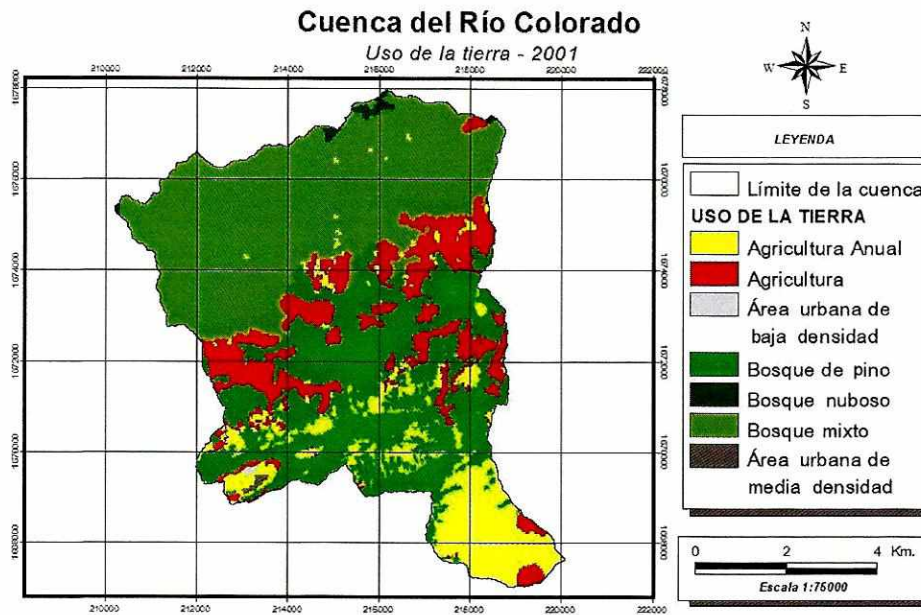
De igual manera se procedió con los suelos.

Luego se ingresó la base de datos de climatología generada a partir de la información recabada en el INSIVUMEH.

Ya con toda la información cargada se procedió a modelar en un período de 10 años, 1 de enero del 2001 al 31 de diciembre del 2010, debido a que en este período es a partir del cual se pueden empezar a notar las variaciones del comportamiento hídrico en una cuenca. Menos tiempo de modelación no da parámetros de comparación.

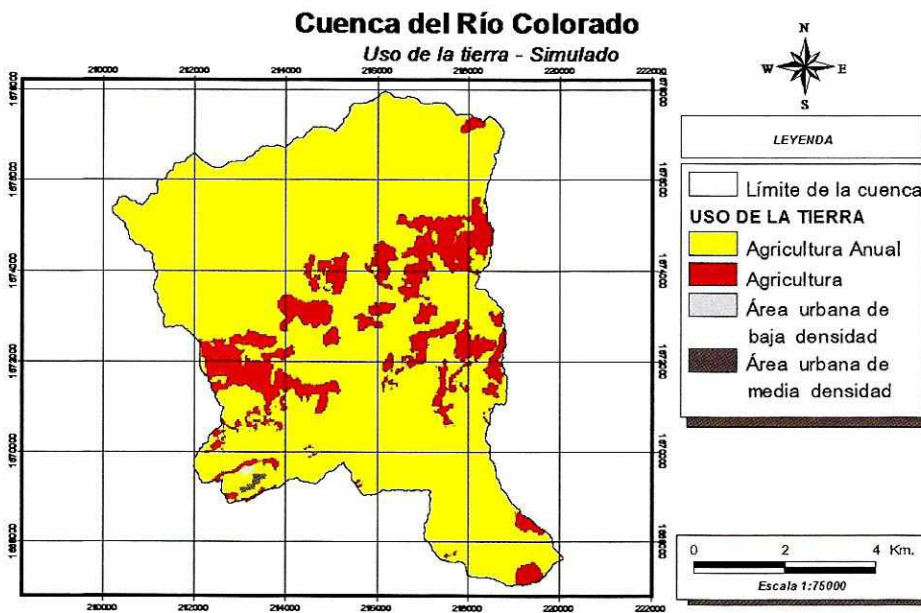
2. *Escenarios.* Se construyeron dos escenarios a partir de la información de cobertura y uso del suelo. El primer escenario consistió en tomar la información de la situación de la cuenca en el año 2001 (Mapa No. 4), y el segundo escenario (simulado) se construyó transformando las áreas de cobertura boscosa a agricultura (Mapa No. 5), esto con el fin de comparar el comportamiento de los distintos parámetros con y sin cobertura boscosa.

Mapa No. 4. Uso de la tierra – 2001 de la cuenca del Río Colorado.



Luis Andrés Arévalo Rodríguez
"La cobertura forestal y el modelo hidrológico de la cuenca del río Colorado"
Tesis de grado - Universidad del Valle de Guatemala

Mapa No. 5. Uso de la tierra – Simulado de la cuenca del Río Colorado.



Luis Andrés Arévalo Rodríguez
"La cobertura forestal y el modelo hidrológico de la cuenca del río Colorado"
Tesis de grado - Universidad del Valle de Guatemala

VI. RESULTADOS

A. Análisis biofísico

1. *Verificación de suelos.* A partir del mapa de asociaciones de uso del suelo y serie de suelo (Anexo A) se seleccionaron aquellas asociaciones más representativas de la cuenca (Cuadro No. 8) para llevar a cabo el muestreo y verificación de la clasificación de suelos, siendo éstas las asociaciones **MBL, TBL, TBM, TBC, CBL, CBM, CBC** y **CAA**.

Cuadro No. 8. Asociaciones suelo + cobertura.

| Suelo | Cobertura | Clave |
|----------|---------------------|-------|
| Marajuma | Bosque Latifoliado | MBL |
| Marajuma | Bosque Enano | MBE |
| Tamahú | Bosque Latifoliado | TBL |
| Tamahú | Bosque Mixto | TBM |
| Tamahú | Bosque de Coníferas | TBC |
| Tamahú | Arbustos | TAR |
| Tamahú | Agricultura Anual | TAA |
| Chol | Bosque Latifoliado | CBL |
| Chol | Bosque Mixto | CBM |
| Chol | Bosque de Coníferas | CBC |
| Chol | Arbustos | CAR |
| Chol | Agricultura Anual | CAA |

En el Cuadro No.9, se puede observar que los valores de densidad aparente varían de 0.5263 a 1.1111, los cuales se encuentran en los valores de suelos con buen contenido de materia orgánica. En este rango de valores existe buena capacidad de los suelos de absorber agua, así como también los árboles tienen facilidad de penetrar sus raíces, estando en relación directa con el porcentaje de porosidad.

Cuadro No. 9. Densidad aparente y porosidad de las muestras.

| Muestra | Peso | Volumen | Densidad aparente | Porosidad |
|---------|-------|---------|-------------------|-----------|
| 1B | 50.00 | 75.00 | 0.6667 | 74.84% |
| 1A | 50.00 | 73.00 | 0.6849 | 74.15% |
| 2B | 50.00 | 70.00 | 0.7143 | 73.05% |
| 2A | 50.00 | 62.00 | 0.8065 | 69.57% |
| 3B | 50.00 | 95.00 | 0.5263 | 80.14% |
| 3A | 50.00 | 50.00 | 1.0000 | 62.26% |

Continuación Cuadro No. 9. Densidad aparente y porosidad de las muestras.

| Muestra | Peso | Volumen | Densidad aparente | Porosidad |
|---------|-------|---------|-------------------|-----------|
| 4B | 50.00 | 80.00 | 0.6250 | 76.42% |
| 4A | 50.00 | 60.00 | 0.8333 | 68.55% |
| 5B | 50.00 | 53.00 | 0.9434 | 64.40% |
| 5A | 50.00 | 45.00 | 1.1111 | 58.07% |
| 6B | 50.00 | 65.00 | 0.7692 | 70.97% |
| 6A | 50.00 | 51.00 | 0.9804 | 63.00% |
| 7B | 50.00 | 95.00 | 0.5263 | 80.14% |
| 7A | 50.00 | 55.00 | 0.9091 | 65.69% |
| 8B | 50.00 | 78.00 | 0.6410 | 75.81% |
| 8A | 50.00 | 47.00 | 1.0638 | 59.86% |
| 9A | 50.00 | 46.00 | 1.0870 | 58.98% |
| 9B | 50.00 | 63.00 | 0.7937 | 70.05% |
| 9C | 50.00 | 70.00 | 0.7143 | 73.05% |
| 10B | 50.00 | 65.00 | 0.7692 | 70.97% |
| 10A | 50.00 | 50.00 | 1.0000 | 62.26% |
| 11B | 50.00 | 60.00 | 0.8333 | 68.55% |
| 11A | 50.00 | 51.00 | 0.9804 | 63.00% |
| 12B | 50.00 | 46.00 | 1.0870 | 58.98% |
| 12A | 50.00 | 43.00 | 1.1628 | 56.12% |
| 13B | 50.00 | 65.00 | 0.7692 | 70.97% |
| 13A | 50.00 | 45.00 | 1.1111 | 58.07% |
| 14 | 50.00 | 53.00 | 0.9434 | 64.40% |

En cuanto a la textura de los suelos, puede observarse en el Cuadro No. 10 que predominan los suelos con una textura Franca, seguidos por suelos Franco Arenosos, y Franco Arcillosos Arenosos y Franco Limosos.

Cuadro No. 10. Textura y porcentajes de composición de las muestras de suelo.

| Muestra | ARCILLA (%) | LIMO (%) | ARENA (%) | CLASE TEXTURAL |
|---------|-------------|----------|-----------|------------------|
| 1B | 17.41% | 23.71% | 58.88% | FRANCO ARENOSO |
| 1A | 8.72% | 24.89% | 66.39% | FRANCO ARENOSO |
| 2B | 35.51% | 33.26% | 31.23% | FRANCO ARCILLOSO |
| 2A | 11.77% | 23.50% | 64.73% | FRANCO ARENOSO |
| 3B | 30.55% | 44.05% | 25.40% | FRANCO ARCILLOSO |

Continuación Cuadro No. 10. Textura y porcentaje de composición de las muestras de suelo.

| <i>Muestra</i> | <i>ARCILLA (%)</i> | <i>LIMO (%)</i> | <i>ARENA (%)</i> | <i>CLASE TEXTURAL</i> |
|----------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| 3A | 25.05% | 30.35% | 44.60% | FRANCO |
| 4B | 18.98% | 35.53% | 45.50% | FRANCO |
| 4A | 18.71% | 24.73% | 56.56% | FRANCO ARENOSO |
| 5B | 38.72% | 58.48% | 2.79% | FRANCO ARCILLOSO LIMOSO |
| 5A | 12.36% | 25.12% | 62.53% | FRANCO ARENOSO |
| 6B | 27.33% | 71.04% | 1.63% | FRANCO LIMOSO |
| 6A | 27.59% | 43.54% | 28.88% | FRANCO |
| 7B | 23.30% | 60.09% | 16.61% | FRANCO LIMOSO |
| 7A | 34.00% | 12.48% | 53.52% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 8B | 15.24% | 59.18% | 25.58% | FRANCO LIMOSO |
| 8A | 20.64% | 21.01% | 58.35% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 9A | 22.39% | 32.57% | 45.04% | FRANCO |
| 9B | 19.62% | 36.88% | 43.51% | FRANCO |
| 9C | 16.67% | 14.58% | 68.75% | FRANCO ARENOSO |
| 10B | 29.26% | 57.18% | 13.56% | FRANCO LIMOSO |
| 10A | 26.86% | 21.40% | 51.74% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 11B | 16.97% | 42.44% | 40.59% | FRANCO |
| 11A | 25.33% | 36.15% | 38.51% | FRANCO |
| 12B | 24.92% | 36.46% | 38.63% | FRANCO |
| 12A | 21.03% | 11.45% | 67.52% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 13B | 20.62% | 48.16% | 31.22% | FRANCO |
| 13A | 16.34% | 38.24% | 45.42% | FRANCO |
| 14 | 18.51% | 34.97% | 46.52% | FRANCO |

2. *Información climatológica.* Se recabó información de siete estaciones climatológica del INSIVUMEN, siendo éstas La Fragua, Pasabién, Morazán, Ipala, Esquipulas, La Unión y Albores (Apéndice C). Debido a que ninguna de éstas se encuentra dentro de la cuenca (Apéndice C), se construyeron tres estaciones virtuales (Cuadro No. 11), de manera que éstas quedarán ubicadas y distribuidas dentro de la cuenca (Mapa No. 6).

Cuadro No. 11. Coordenadas geográficas de las estaciones virtuales

| <i>Estación</i> | <i>Altura</i> | <i>Latitud</i> | <i>Longitud</i> |
|-----------------|---------------|----------------|-----------------|
| Estación 1 | 1860 msnm | 212640 | 1673290 |
| Estación 2 | 1860 msnm | 217610 | 1674590 |
| Estación 3 | 2160 msnm | 217220 | 1669330 |

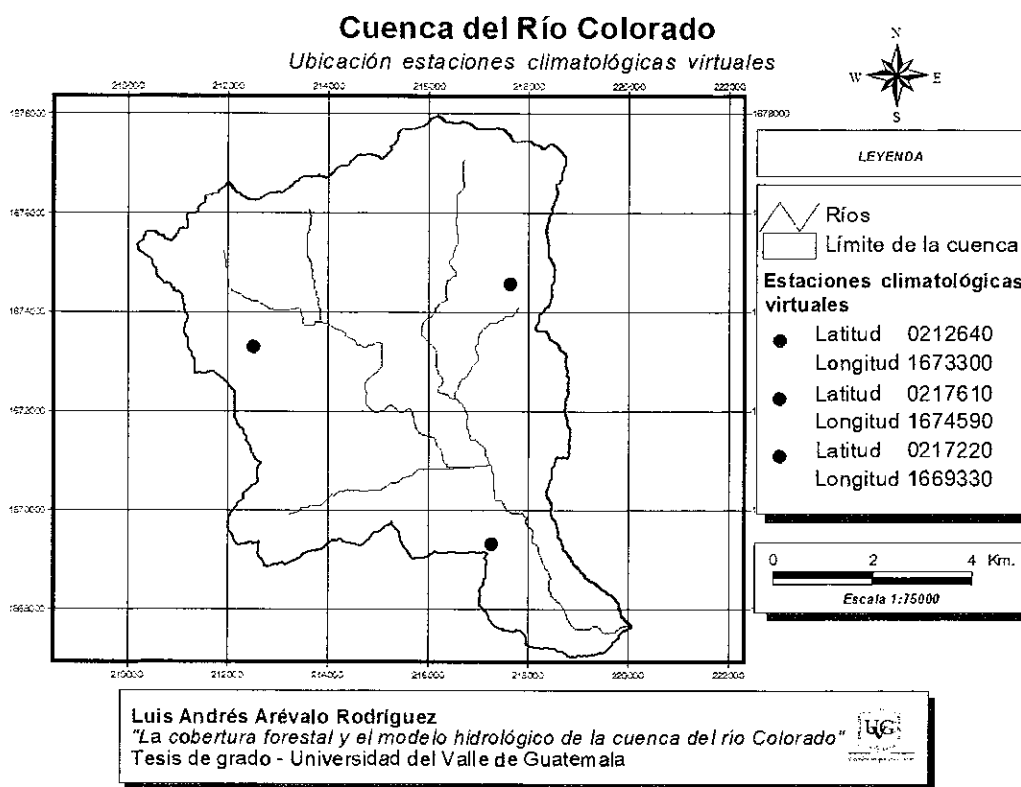
Con la información recabada, se generaron tablas de información climatológica, a partir de regresiones lineales para la Estación Virtual 1 (Cuadro No. 12), Estación Virtual 2 (Cuadro No. 13) y Estación Virtual 3 (Cuadro No. 14), que incluyen: a) precipitación mensual en milímetros, b) precipitación mensual en días, c) temperatura mínima y d) temperatura máxima.

Cuadro No. 12. Información climatológica Estación Virtual 1.

| | <i>LLUVIA</i> <i>(mm)</i> | <i>LLUVIA</i> <i>(dias)</i> | <i>TEMP</i> <i>MAX °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> | <i>TEMP</i> <i>MIN °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Ene | 21.42 | 7 | 22.22 | 1.62 | 8.94 | 3.36 |
| Feb | 25.22 | 6 | 23.32 | 1.70 | 9.58 | 3.75 |
| Mar | 16.90 | 5 | 26.00 | 1.45 | 12.39 | 3.69 |
| Abr | 65.66 | 6 | 26.75 | 1.68 | 14.02 | 3.18 |
| May | 183.94 | 12 | 26.02 | 1.61 | 15.21 | 2.70 |
| Jun | 346.71 | 18 | 25.03 | 1.41 | 15.34 | 2.95 |
| Jul | 284.89 | 18 | 23.75 | 1.37 | 15.01 | 2.40 |
| Ago | 340.69 | 19 | 24.33 | 1.35 | 15.03 | 2.01 |
| Sep | 457.47 | 21 | 24.09 | 1.37 | 15.74 | 3.06 |
| Oct | 271.05 | 19 | 22.39 | 2.60 | 14.73 | 3.13 |
| Nov | 126.62 | 16 | 21.66 | 1.89 | 12.11 | 3.45 |
| Dic | 50.97 | 12 | 20.84 | 1.66 | 9.08 | 3.30 |

Cuadro No. 13. Información climatológica Estación Virtual 2.

| | <i>LLUVIA</i> <i>(mm)</i> | <i>LLUVIA</i> <i>(días)</i> | <i>TEMP</i> <i>MAX °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> | <i>TEMP</i> <i>MIN °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Ene | 23.46 | 7.89 | 21.11 | 1.67 | 7.70 | 3.70 |
| Feb | 27.94 | 6.22 | 22.16 | 1.77 | 8.43 | 4.16 |
| Mar | 18.26 | 4.94 | 24.93 | 1.45 | 11.45 | 4.06 |
| Abr | 69.40 | 6.32 | 25.61 | 1.77 | 13.04 | 3.47 |
| May | 195.67 | 12.31 | 24.85 | 1.66 | 14.33 | 2.99 |
| Jun | 368.30 | 18.68 | 23.92 | 1.47 | 14.47 | 3.26 |
| Jul | 307.16 | 19.07 | 22.60 | 1.44 | 14.17 | 2.64 |
| Ago | 366.53 | 19.24 | 23.20 | 1.40 | 14.20 | 2.18 |
| Sep | 495.04 | 21.82 | 22.97 | 1.42 | 15.01 | 3.40 |
| Oct | 295.53 | 20.48 | 21.16 | 2.85 | 13.93 | 3.47 |
| Nov | 140.39 | 17.58 | 20.48 | 2.01 | 11.14 | 3.81 |
| Dic | 55.73 | 13.34 | 19.63 | 1.76 | 7.76 | 3.63 |

Mapa No. 6. Ubicación de estaciones climatológicas virtuales

Cuadro No. 14. Información climatológica Estación Virtual 3.

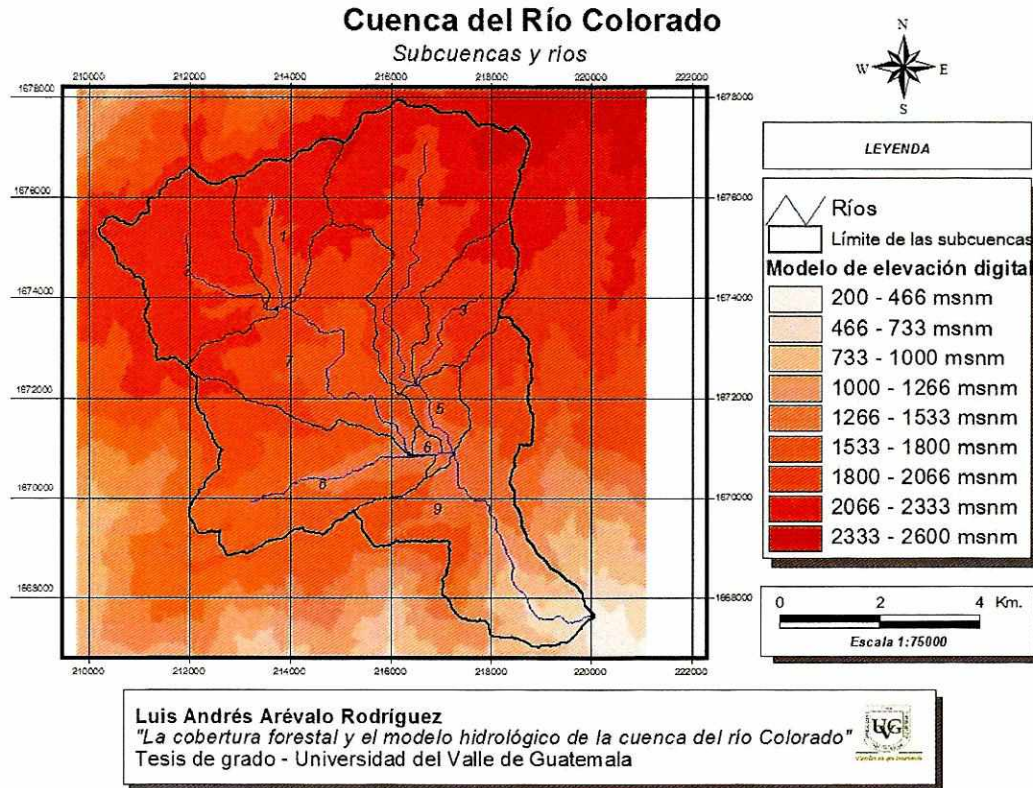
| | <i>LLUVIA</i> <i>(mm)</i> | <i>LLUVIA</i> <i>(dias)</i> | <i>TEMP</i> <i>MAX °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> | <i>TEMP</i> <i>MIN °C</i> | <i>DESV</i> <i>EST</i> |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Ene | 27.06 | 8.97 | 19.16 | 1.76 | 5.51 | 4.30 |
| Feb | 32.74 | 7.00 | 20.12 | 1.89 | 6.39 | 4.88 |
| Mar | 20.66 | 5.54 | 23.04 | 1.45 | 9.80 | 4.72 |
| Abr | 76.00 | 6.80 | 23.60 | 1.92 | 11.30 | 3.98 |
| May | 216.37 | 13.09 | 22.78 | 1.75 | 12.77 | 3.50 |
| Jun | 406.40 | 19.13 | 21.97 | 1.59 | 12.94 | 3.80 |
| Jul | 346.46 | 20.24 | 20.56 | 1.56 | 12.70 | 3.06 |
| Ago | 412.13 | 20.23 | 21.22 | 1.49 | 12.73 | 2.48 |
| Sep | 561.34 | 22.84 | 20.99 | 1.51 | 13.72 | 4.00 |
| Oct | 338.73 | 22.34 | 19.00 | 3.30 | 12.52 | 4.07 |
| Nov | 164.69 | 19.86 | 18.41 | 2.22 | 9.43 | 4.44 |
| Dic | 64.13 | 15.11 | 17.50 | 1.94 | 5.42 | 4.20 |

B. Modelo hidrológico

1. *Información biofísica básica.* Con la información recabada durante el análisis de suelos, y las tablas de información climatológica generadas de las estaciones virtuales, se construyeron las bases de datos necesarias para la modelación. Éstas fueron desarrolladas dentro de la interfase SWAT.

2. *Procesamiento de información.* Para la modelación en la interface SWAT, se ingresó el modelo de elevación digital (Mapa No. 2) a partir del cual se hizo un análisis topográfico, el cual permitió obtener la delimitación de la cuenca y la generación de los afluentes del río. Posteriormente se seleccionaron los puntos donde confluyen dos o más vertientes, y a partir de estos puntos se generaron las subcuencas. (Mapa No. 7).

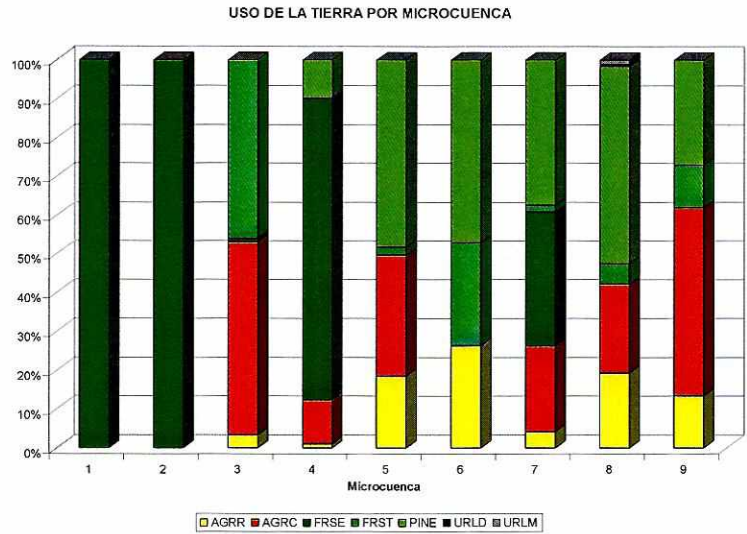
Mapa No. 7. Límite de cuenca y subcuencas, y cauce de ríos de cuenca del Río Colorado



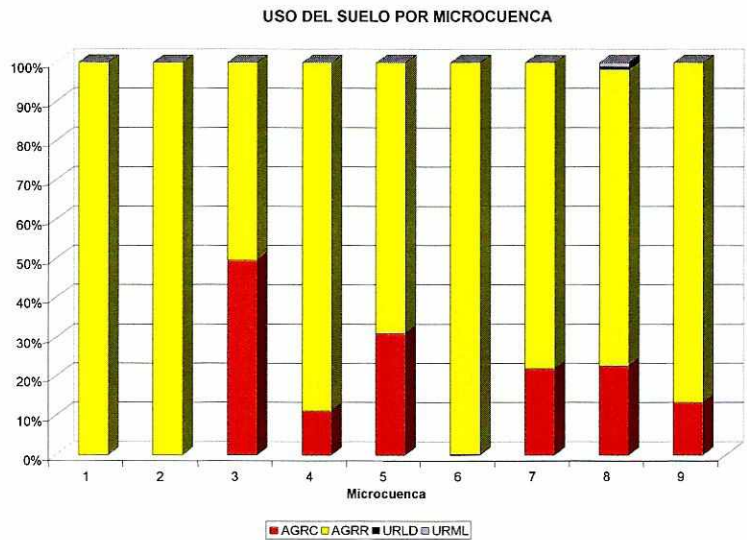
3. *Escenarios.* Para la modelación de cada uno de los escenarios se asociaron las características de suelo y cobertura, para a creación de unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), las cuales son porciones de tierra con características de cobertura específicas. Debido a los parámetros mínimos establecidos, 20% de cobertura y 10% de clase de suelo, se tuvo que reclasificar las áreas de algunas subcuencas, por poseer algunas características menores a esos parámetros.

En la gráfica No. 1 y 2 puede observarse los porcentajes de las categorías de uso de la tierra para cada una de las subcuencas, tanto en el caso del escenario real y el simulado respectivamente.

Gráfica No. 1. Porcentaje de uso de la tierra por categorías de microcuencas para el escenario real.

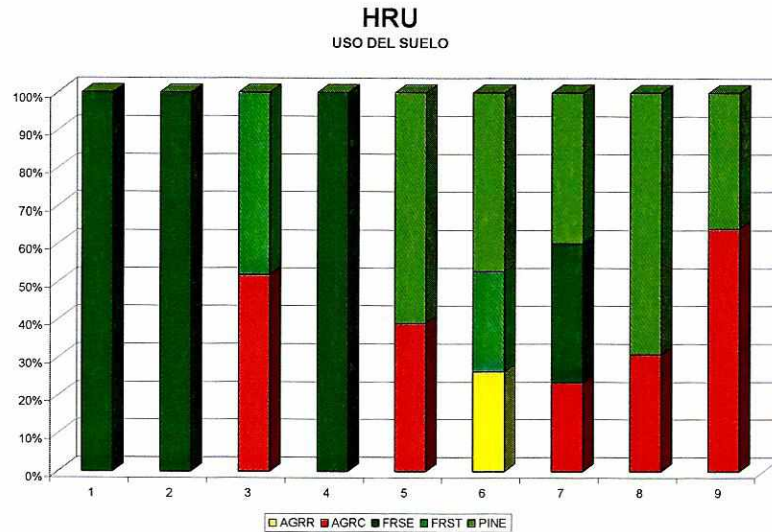


Gráfica No. 2. Porcentaje de uso de la tierra por categorías de microcuencas para el escenario simulado.

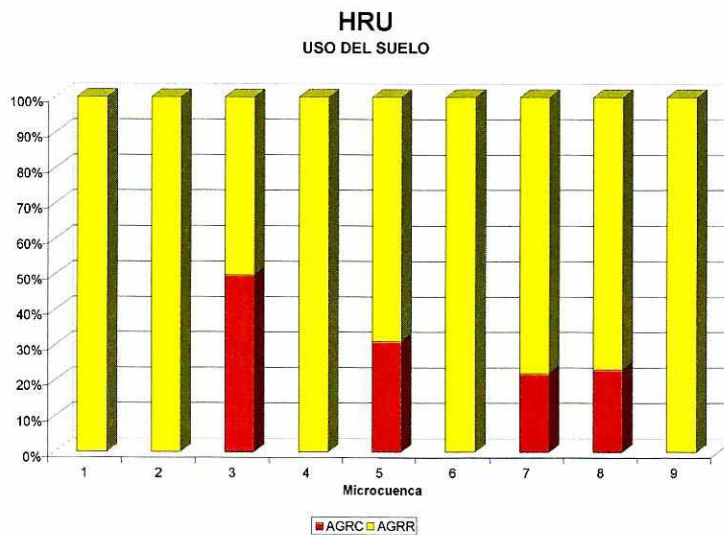


En la gráfica No. 3 y 4, se observan los porcentajes de la recategorización de parámetros para el escenario real y el simulado.

Gráfica No. 3. Porcentaje de parámetros recategorizados para el uso de la tierra por microcuencas para el escenario real.

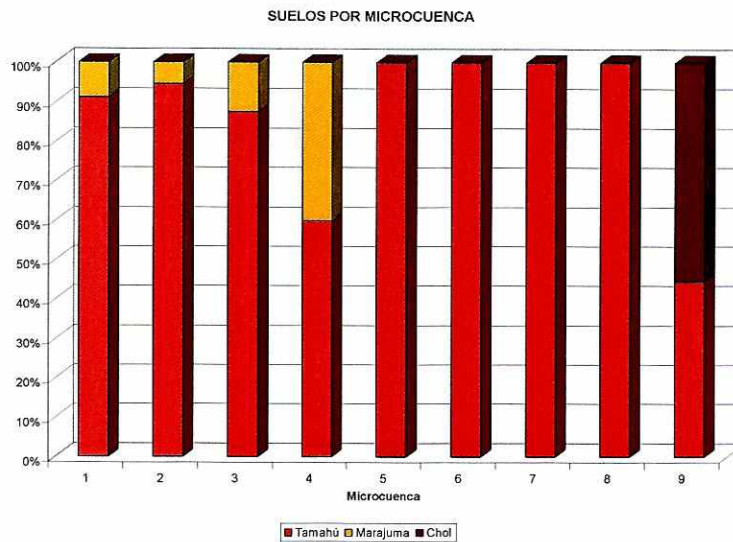


Gráfica No. 4. Porcentaje de parámetros recategorizados para el uso de la tierra por microcuencas para el escenario simulado.

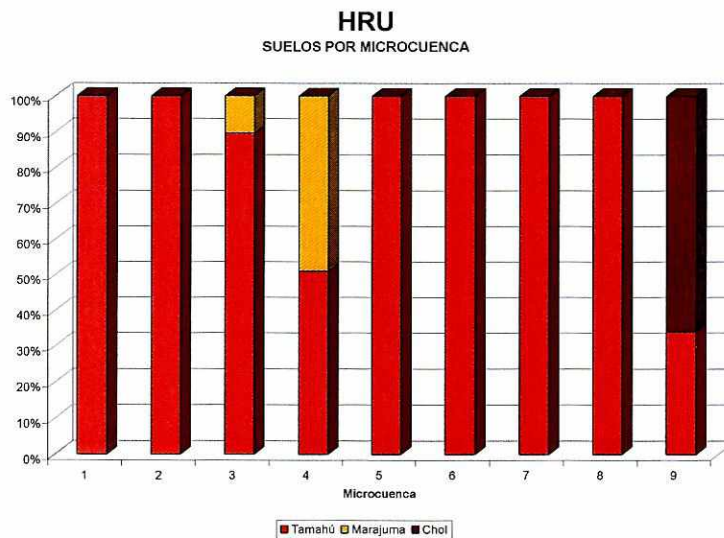


En la gráfica No. 5 se observa los porcentajes de clases de suelo por microcuenca, y en la gráfica No. 6 los porcentajes de la reclasificación según los parámetros mínimos establecidos.

Gráfica No. 5. Porcentaje de clases de suelo por microcuencia.



Gráfica No. 6. Porcentajes de clases de suelo reclasificadas por microcuencia.



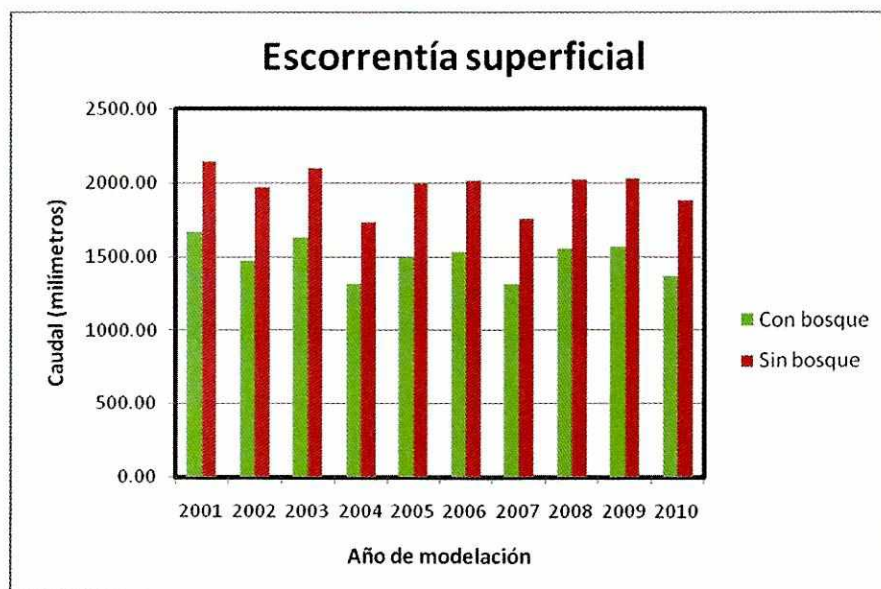
Por último se corrió el modelo con los parámetros recategorizados para cada microcuencia, y se obtuvieron valores para las variables a) escorrentía superficial (Cuadro No. 15 y Gráfica No. 7), b) evapotranspiración potencial (Cuadro No. 16 y Gráfica No. 8), c) evapotranspiración real (Cuadro No. 17 y Gráfica No. 9), d) sedimentos transportados por escorrentía (Cuadro No. 18 y Gráfica No. 10), e) agua retenida en raíces (Cuadro No.

19 y Gráfica No. 11), f) días de estrés térmico (Cuadro No. 20 y Gráfica No. 12) y g) caudal (Cuadro No. 21 y Gráfica No. 13).

Cuadro No. 15. Valores de escorrentía superficial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Escorrentía superficial (mm) | |
|------|------------------------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 1666.67 | 2141.67 |
| 2002 | 1466.67 | 1966.67 |
| 2003 | 1625.00 | 2100.00 |
| 2004 | 1316.67 | 1733.33 |
| 2005 | 1491.67 | 1991.67 |
| 2006 | 1533.33 | 2016.67 |
| 2007 | 1316.67 | 1750.00 |
| 2008 | 1550.00 | 2025.00 |
| 2009 | 1566.67 | 2033.33 |
| 2010 | 1366.67 | 1883.33 |

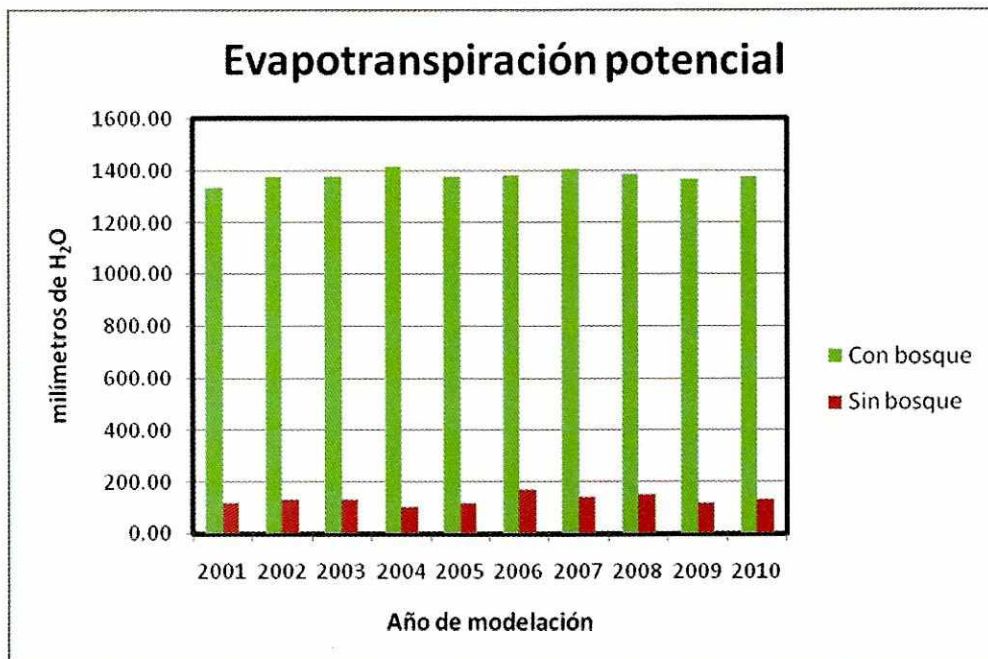
Gráfica No. 7. Valores de escorrentía superficial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 16. Valores de evapotranspiración potencial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Evapotranspiración potencial (mm) | |
|------|-----------------------------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 1333.33 | 120.00 |
| 2002 | 1373.33 | 133.33 |
| 2003 | 1376.00 | 133.33 |
| 2004 | 1413.33 | 106.67 |
| 2005 | 1373.33 | 120.00 |
| 2006 | 1378.67 | 173.33 |
| 2007 | 1405.33 | 141.33 |
| 2008 | 1386.67 | 154.67 |
| 2009 | 1365.33 | 117.33 |
| 2010 | 1373.33 | 133.33 |

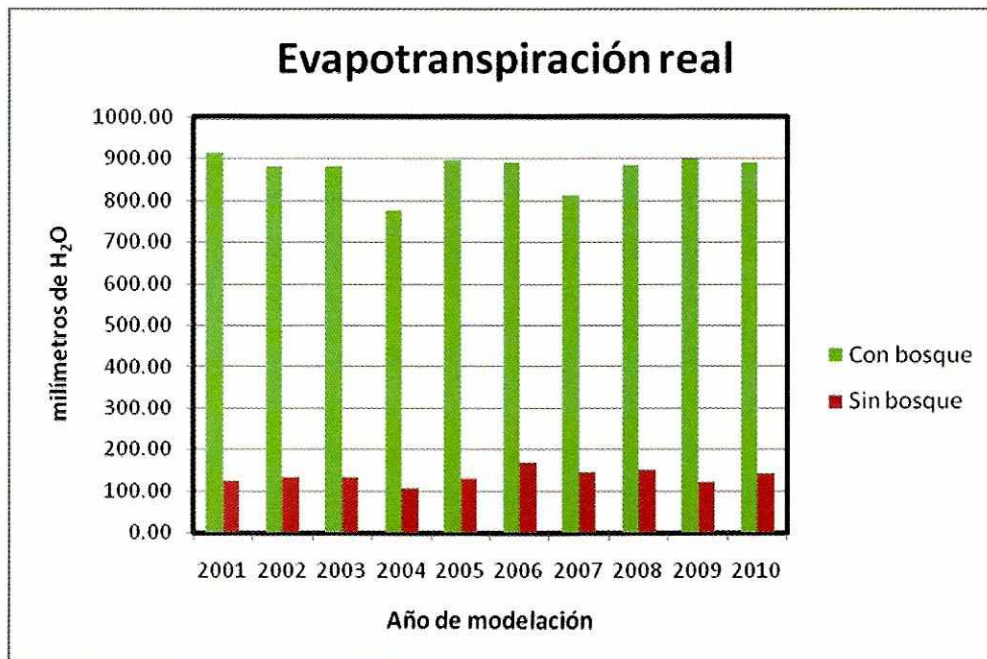
Gráfica No. 8. Valores de evapotranspiración potencial modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 17. Valores de evapotranspiración real modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Evapotranspiración real (mm) | |
|------|------------------------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 913.33 | 125.00 |
| 2002 | 880.00 | 133.33 |
| 2003 | 881.67 | 133.33 |
| 2004 | 775.00 | 108.33 |
| 2005 | 896.67 | 130.00 |
| 2006 | 890.00 | 170.00 |
| 2007 | 813.33 | 146.67 |
| 2008 | 883.33 | 153.33 |
| 2009 | 900.00 | 123.33 |
| 2010 | 890.00 | 143.33 |

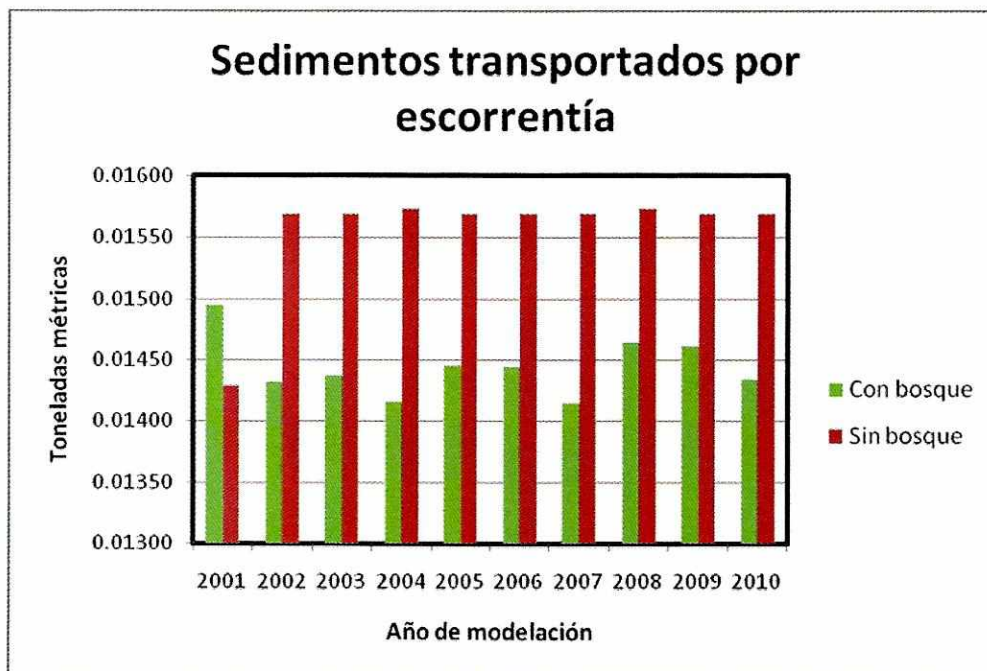
Gráfica No. 9. Valores de evapotranspiración real modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 18. Valores de sedimentos transportados por escorrentía modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Sedimentos transportados (toneladas métricas) | |
|------|---|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 0.01495 | 0.01429 |
| 2002 | 0.01433 | 0.01570 |
| 2003 | 0.01438 | 0.01570 |
| 2004 | 0.01417 | 0.01574 |
| 2005 | 0.01445 | 0.01570 |
| 2006 | 0.01444 | 0.01570 |
| 2007 | 0.01415 | 0.01570 |
| 2008 | 0.01465 | 0.01574 |
| 2009 | 0.01462 | 0.01570 |
| 2010 | 0.01434 | 0.01570 |

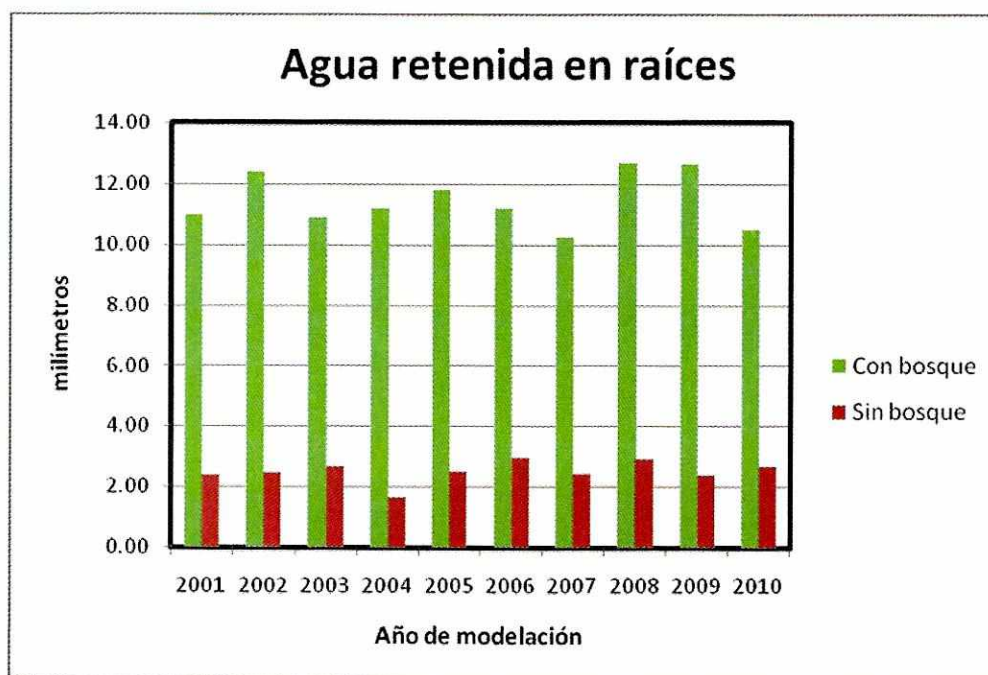
Gráfica No. 10. Valores de sedimentos transportados por escorrentía modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 19. Valores de volumen de agua retenida en raíces modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Agua retenida en raíces (mm) | |
|------|------------------------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 10.99 | 2.42 |
| 2002 | 12.42 | 2.47 |
| 2003 | 10.89 | 2.71 |
| 2004 | 11.18 | 1.67 |
| 2005 | 11.81 | 2.54 |
| 2006 | 11.18 | 2.99 |
| 2007 | 10.24 | 2.45 |
| 2008 | 12.71 | 2.94 |
| 2009 | 12.64 | 2.42 |
| 2010 | 10.47 | 2.71 |

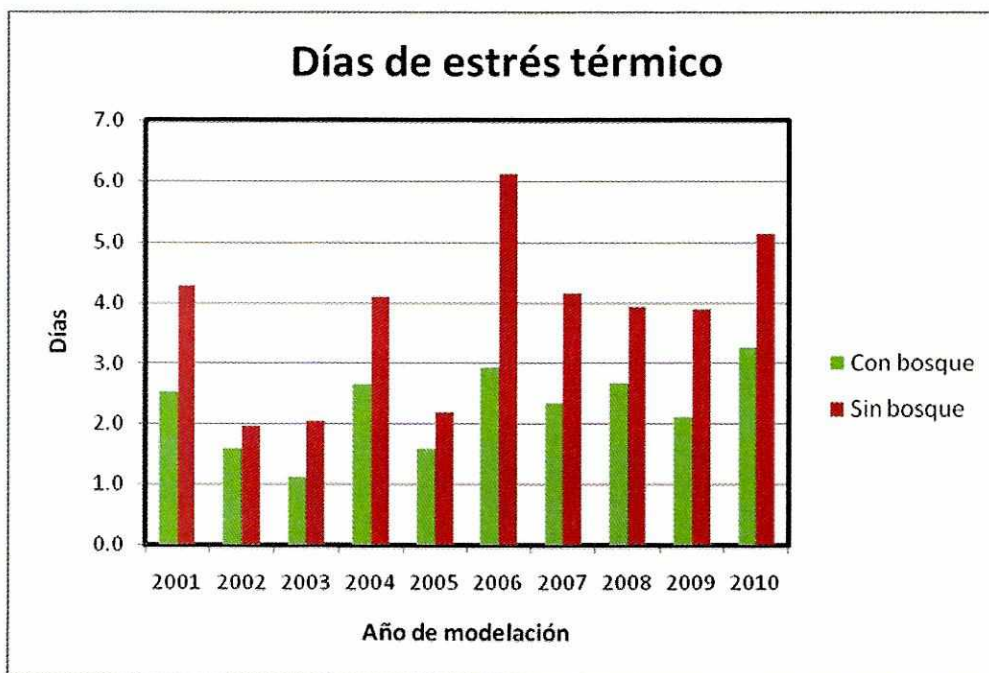
Gráfica No. 11. Valores de volumen de agua retenida en raíces modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 20. Valores de días de estrés térmico modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Días estrés térmico | |
|------|---------------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 2.5 | 4.3 |
| 2002 | 1.6 | 2.0 |
| 2003 | 1.1 | 2.1 |
| 2004 | 2.6 | 4.1 |
| 2005 | 1.6 | 2.2 |
| 2006 | 2.9 | 6.1 |
| 2007 | 2.4 | 4.2 |
| 2008 | 2.7 | 3.9 |
| 2009 | 2.1 | 3.9 |
| 2010 | 3.3 | 5.1 |

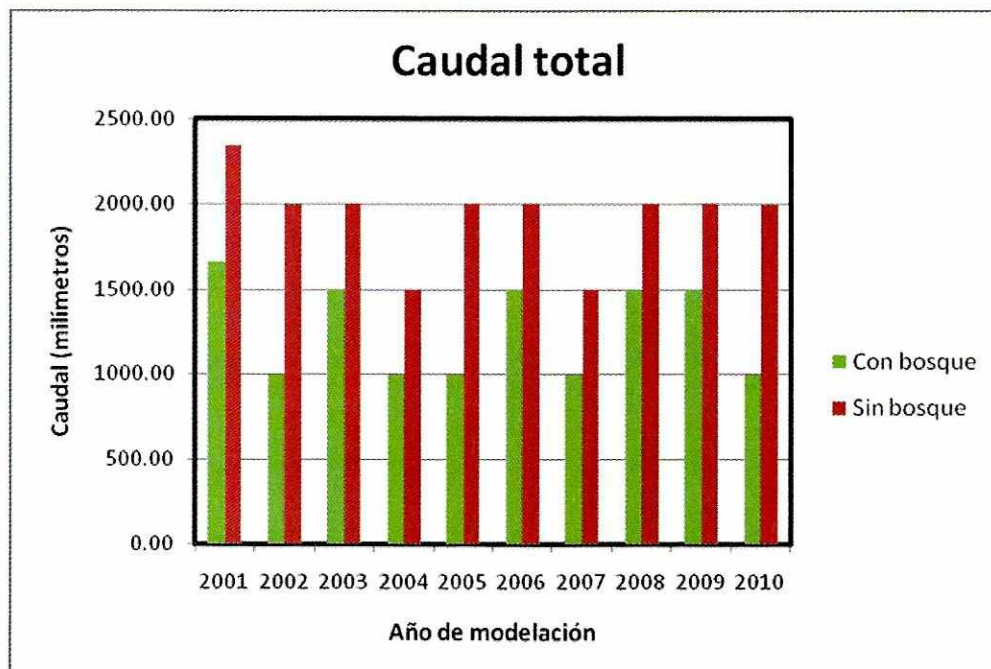
Gráfica No. 12. Valores de días de estrés térmico modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



Cuadro No. 21. Valores de caudal total modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.

| Año | Caudal (mm) | |
|------|-------------|------------|
| | Con bosque | Sin bosque |
| 2001 | 1658.33 | 2350.00 |
| 2002 | 1001.27 | 2000.61 |
| 2003 | 1500.26 | 2001.08 |
| 2004 | 1000.82 | 1501.29 |
| 2005 | 1001.29 | 2000.78 |
| 2006 | 1500.09 | 2000.73 |
| 2007 | 1000.82 | 1501.32 |
| 2008 | 1500.12 | 2000.82 |
| 2009 | 1500.15 | 2001.04 |
| 2010 | 1001.04 | 2000.45 |

Gráfica No. 13. Valores de caudal total modelados para el período 2001 – 2010 en la cuenca del Río Colorado.



VII. DISCUSIÓN

Los suelos encontrados dentro de la cuenca del Río Colorado presentan propiedades físicas, como estructura y porosidad, que favorecen la infiltración y la retención hídrica en aquellas regiones cubiertas de bosque. Mientras que en aquellas regiones en las que se ha cambiado el uso del suelo de bosque a agricultura, la capacidad hídrica de infiltración y retención se han disminuido considerablemente, aunando en los problemas de erosión, compactación y pérdida de la capacidad productora de los suelos.

Dentro de la cuenca se encuentran suelos que van desde franco arenosos hasta franco arcillosos limosos siendo el más representativo el suelo de clase franco, el cual se caracteriza por tener entre 20 – 25 % de arcilla, 30 – 35 % de limo y entre 40 – 50% de arena, por lo cual es muy favorable para la infiltración de agua.

El uso del suelo en la cuenca es en su mayoría forestal, gracias a que ha logrado mantenerse su cobertura por encontrarse en la zona núcleo y zona de amortiguamiento de la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas. En aquellas áreas donde hay presión humana, empiezan a observarse áreas taladas y usadas para la agricultura.

La cubierta forestal es la característica más notable en los suelos forestales de la cuenca, que permite mantener propiedades afines al proceso hidrológico por la alta capacidad de permeabilidad, por estar conformados de altos porcentajes de materia orgánica, hojarasca y materiales en descomposición.

Otra de las variables que es importante, dentro del proceso hidrológico, es el clima de región, el cual se caracteriza por ser muy seco en el verano y con lluvias copiosas durante el invierno, llegando a provocar durante los últimos años altas sequías así como también desborde de ríos e inundaciones de poblados.

Con la modelación pudo observarse que para los valores de escorrentía superficial son de un 31.97% promedio anual mayores cuando no existe cobertura forestal en la cuenca, sino únicamente agricultura.

En el caso de la evapotranspiración potencial y real, los valores promedio anuales para el escenario simulado son 90.32% y 84.33% menores, respectivamente, que cuando hay cobertura forestal. Esto debido a las altas tasas de evapotranspiración que presenta toda la vegetación, y es el proceso de respiración que cada una de ellas tiene. Los bosques, al

poseer mayor área foliar, tienen valores de evapotranspiración mucho más altos que los cultivos. Debido a esto muchos creen que hay mayor disponibilidad de agua sin cobertura, el problema está en el hecho en que el agua cuando está disponible es en altos volúmenes provocando deslaves e inundaciones, en cambio cuando la cobertura forestal se encuentra presente, aunque hay menor volumen de agua está es regulada durante todo el tiempo.

Para los parámetros de transporte de sedimentos, se observa que hay hasta un 7.81% promedio anual más de sedimentos transportados en el cauce de los ríos cuando no hay cobertura boscosa. La cobertura sirve como barrera evitando que la lluvia caiga directamente al suelo, disminuyendo su velocidad de impacto y evitando la erosión hídrica. El alto impacto de erosión que provoca la lluvia en aquellas regiones con cultivos y con altas pendientes es causado por las altas tasas de escorrentía superficial que se forman luego de una lluvia prolongada, logrando a su vez el asolve de los ríos y la pérdida de la fertilidad de los suelos. Hay que tener en cuenta, que durante las épocas post cosecha y de preparación de la tierra para nuevas siembras, el suelo queda desnudo por completo, por lo que si hay algún fenómeno lluvioso durante ese período, son altas las tasas de erosión hídrica que pueden afectar a los terrenos.

Para el proceso de retención de agua en las raíces, el valor promedio anual cuando no existe cobertura forestal está por debajo por un 77.79% de cuando si existe. Esto debido a que las raíces permiten una mejor estructura del suelo, favoreciendo su permeabilidad, además que los suelos cubiertos con una capa de materia orgánica, reducen el tiempo de formación de escorrentías superficiales, permitiéndole al suelo tener mayor tiempo para absorber el agua hacia la zona de raíces y las capas profundas en donde se encuentran los mantos freáticos.

Otro factor importante, es la cantidad de días de estrés térmico que se presenta en áreas sin cobertura boscosa, debido a que el bosque crea una atmósfera bastante regular, que permite mantener los valores de temperatura más o menos estables, en cambio en el campo abierto, la alta radiación evapora parte del agua del suelo disponible para las plantas, originando problemas de stress térmico, el cual es generado a partir de la falta de suficiente disponibilidad de agua y las altas tasas de evaporación. Para el escenario simulado pueden observarse valores promedio 64.47% mayores al del escenario con cobertura boscosa.

Los caudales se diferencian principalmente, en que al corto plazo las regiones sin cobertura boscosa tienen mayores volúmenes disponibles, de hasta un 57.47% promedio anual, debido a que existe muy poca o nula intercepción. Mientras que en las regiones con cobertura, gran parte de la vegetación intercepta gotas de agua, hojas, ramas, tronco, lo cual evita que el agua llegue rápidamente al suelo, y empiece a formar canales de agua.

VIII. CONCLUSIONES

1. La capacidad hídrica de los suelos, en general es muy buena, poseen una textura bastante favorable a la infiltración y retención de agua, gracias a la presencia de la cobertura forestal en buen porcentaje dentro del área.
2. El uso del suelo y cobertura de la Cuenca del Río Colorado es de un 75% boscosa, y únicamente un 25% de agricultura, lo cual ha favorecido a mantener agua en el cauce del río aún en la época seca, a diferencia de otras cuencas aledañas en el área, en las cuales la invasión y problemática de deforestación generan mucha presión en los bosques.
3. El bosque dentro de la cuenca favorece la regulación del recurso hídrico, debido a que permite mantener altas tasas de retención de agua en raíces y reduce la velocidad y volumen de agua que se escurre superficialmente.
4. Por otro lado, las altas tasas de evapotranspiración presentes en áreas boscosas reducen la disponibilidad de agua; por lo que al eliminarla se obtienen volúmenes mayores disponibles durante períodos de lluvia.
5. El volumen de sedimentos transportados por la escorrentía en áreas sin cobertura boscosa es mayor que en aquellas áreas que sí tienen, debido a que no se encuentran material vegetal que interfiera en la formación de canales de escorrentía, ni que evite la erosión del suelo y el lavado de nutrientes.
6. Debido a la falta de material vegetal que evite el escurrimiento del agua sobre el suelo en aquellas regiones con ausencia de cobertura vegetal, se generan volúmenes de escorrentía superficial mayores que en aquellas regiones donde la cobertura vegetal interfiere en la formación de canales de escorrentía.
7. También es importante notar, que la ausencia de cobertura boscosa a pesar que genera disponibilidad de agua a corto plazo, ésta puede llegar a provocar deslaves y otros desastres naturales, por la fuerza de corriente que se puede generar en aquellos lugares con altas pendientes. En las partes bajas de las regiones deforestadas es donde mayor riesgo de inundaciones existe en la época lluviosa. Algunos estudios han demostrado que la eliminación de la cobertura forestal disminuye hasta en un 50% la vida útil de la infraestructura vial.

8. Mientras que en aquellas regiones con bosque, se pueden reducir hasta en la mitad la ocurrencia de inundaciones.
9. SWAT es una interfase bastante útil en el desarrollo de planes de manejo para las cuencas hidrográficas, permite la delimitación de las áreas según parámetros que cada usuario puede ir estableciendo según el detalle que se necesita para el estudio. Además de permitir modelar a lo largo del tiempo el efecto de las diferentes actividades desarrolladas dentro de la cuenca, y así poder tomar medidas preventivas y de protección

IX. RECOMENDACIONES

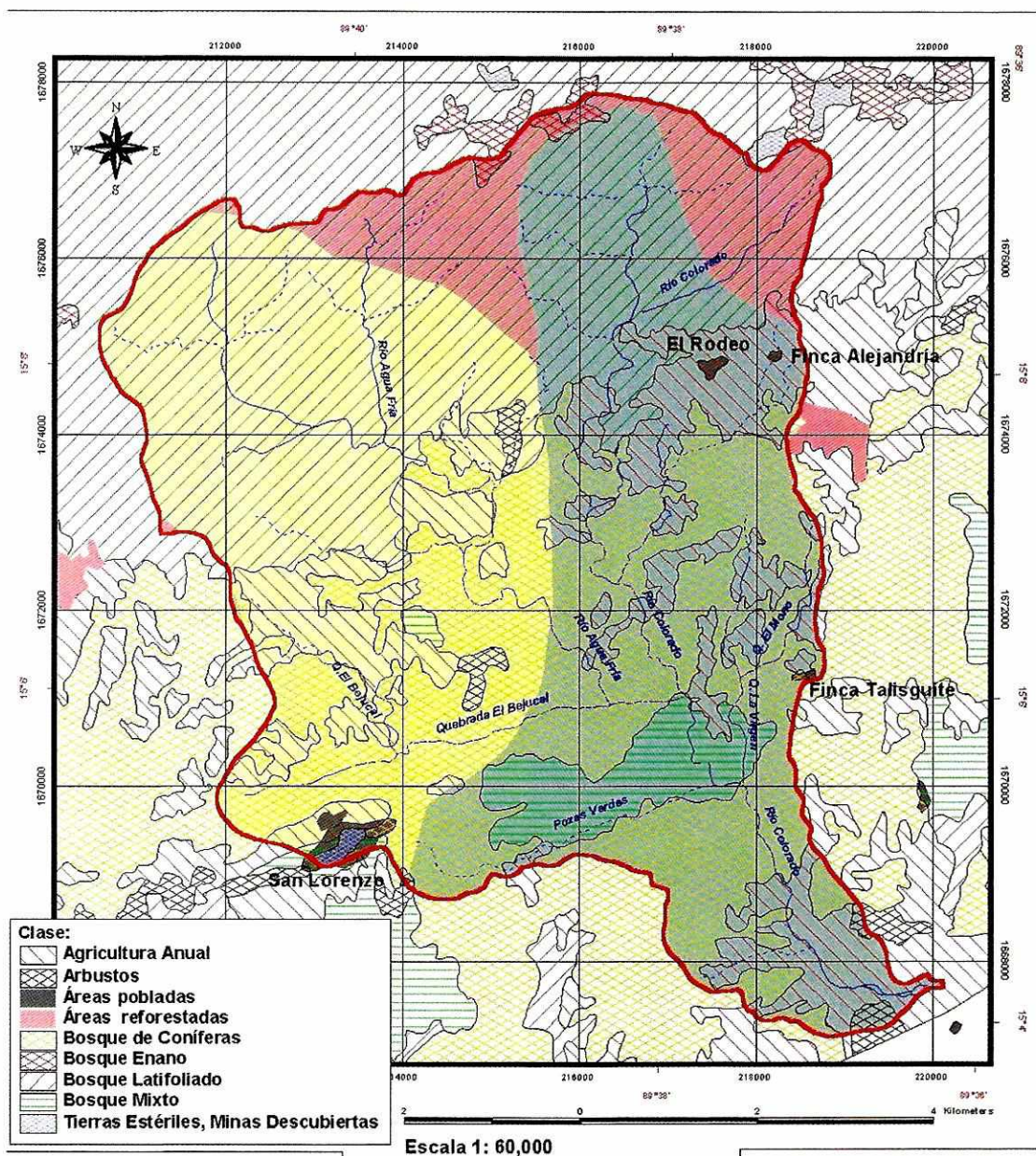
1. Generar información climática continua y de cobertura nacional, para tener bases de datos completas con las que se pueda determinar los cambios climáticos a lo largo de los años.
2. Generar bases de datos hidrológicas, con las cuales se pueda conocer y modelar el comportamiento del recurso a lo largo del tiempo.
3. Promover estudios sobre hidrología, con los cuales se pueda llegar a entender de mejor manera la importancia de los bosques como reguladores hídricos, los cuales pueden servir como base para leyes y políticas que promuevan la concientización, la educación y la promoción de protección de los bosques en las cabeceras de cuenca principalmente.
4. Realizar estudios con la aplicación SWAT en cuencas dentro de la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas, con diferentes condiciones de suelo y cobertura, para fortalecer la información obtenida durante este estudio.

X. LITERATURA CITADA

- Brady, N.C. 1974. *The nature and properties of soils*. 8a. ed. Macmillan Company Inc., Nueva York. 639 pp.
- De las Salas, Gonzalo. 1987. *Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América tropical*. IICA. Costa Rica. 447 pp.
- Di Luzio, M., R. Srinivasan & J. Arnold. *ArcView Interface for Swat 2000. User's Guide*. Texas. 2001
- Hernández, O., C. Cobos & A. Ortiz. 2002. *Valoración Económica del Servicio Ambiental de Regulación Hídrica*.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest ecology*. 2da. ed. Prentice Hall. New Jersey. 596 pp.
- Kittrede, J. 1948. *Forest Influence*. McGraw Hill. New York. 394 pp.
- Pritchett, William L. 1986. *Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento*. Limusa. México. 634 pp.
- <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/hidrogeol/04003inf.htm>
- <http://pastizales.uat.edu.mx/cap2bis111.htm>
- <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/otraspp.htm>
- <http://elgranchaco.com/articulo.aspx?c=17>
- <http://www.google.com/search?q=Agua%2BInfiltracion&hl=es&lr=&ie=UTF-8&oe=UTF-8&start=40&sa=N>
- <http://www.agriculturadeprecision.org/mansit/Comportamiento%20Fisico-Funcional%20de%20Suelos.htm>

XI. ANEXOS

A. Mapa No. 8. Asociaciones de clases de suelo y uso y cobertura de suelo



Generado a partir del mapa de Suelos (Holdridge) y Cobertura del año 1995

B. Método de Bouyoucos

Esta metodología se basa en el principio de la dispersión y de la sedimentación. La dispersión consiste en romper los agregados de suelo, a partir de agentes químicos dispersantes, logrando que las partículas menores de 2 mm del suelo entren en suspensión. La sedimentación, que se basa en la velocidad de caída de las partículas en el agua, según su superficie específica. Las partículas más grandes se precipitan más rápido que las partículas pequeñas.

Equipo

1. Balanza analítica
2. Beakers de 250 ml
3. Varilla de vidrio
4. Pizeta
5. Agitadores eléctricos
6. Cilindros de sedimentación
7. Tapón de hule
8. Hidrómetro
9. Termómetro

Reactivos

1. Agua
2. Calzón (NaPO_3)⁶ 1 N

Procedimiento

1. Tamizar el suelo a 2 mm, secado al aire
2. Pese 50 gramos de suelo secado al aire, si el suelo era arcilloso y 100 gramos de suelo cuando el suelo era arenoso.
3. Colocar la muestra en un beacker de 250 ml. Agregar agua destilada hasta la mitad y adicionar 10 ml de calzón.
4. Agitar la mezcla con una varilla de vidrio y dejar reposando, por lo menos 16 horas, para eliminar los problemas de floculación que pueden presentarse por la presencia de materia orgánica en un suelo promedio.

5. Con la ayuda de la pizeta trasladar la muestra remojada al vaso de agitación. Llenarlo $\frac{2}{3}$ con agua destilada, y agitar por 5 minutos para suelo arenoso y por 8 minutos para suelos arcillosos.
6. Trasladar la suspensión a un cilindro de sedimentación, agregar agua a temperatura ambiente hasta un poco más de la mitad, introducir cuidadosamente el hidrómetro y completar hasta la marca inferior del cilindro.
7. Remover el hidrómetro y agitar la suspensión, volteando el cilindro de arriba abajo durante un minuto (20 a 30 movimientos), para distribuir uniformemente las partículas del suelo en el líquido, logrando así una suspensión homogénea.
8. Inmediatamente después de la última del cilindro hacia arriba, colocarlo en una superficie firme y tomar el tiempo. Si hay mucho burbujeo en la superficie agregar 2 o 3 gotas de alcohol isoamílico.
9. A los 20" introducir cuidadosamente el hidrómetro, liberarlo en la suspensión y a los 40" tomar la primera lectura.
10. Sacar el hidrómetro y lavarlo introduciéndolo en un cilindro con agua limpia.
11. Introducir cuidadosamente el termómetro en la suspensión, observar la temperatura y anotarla.

NOTA: El hidrómetro está calibrado para leer a una temperatura de 20 °C. La corrección por temperatura se hace sumando 0.36 a la lectura por cada grado arriba de 20 °C o restando 0.36 por cada grado debajo de 20 °C.

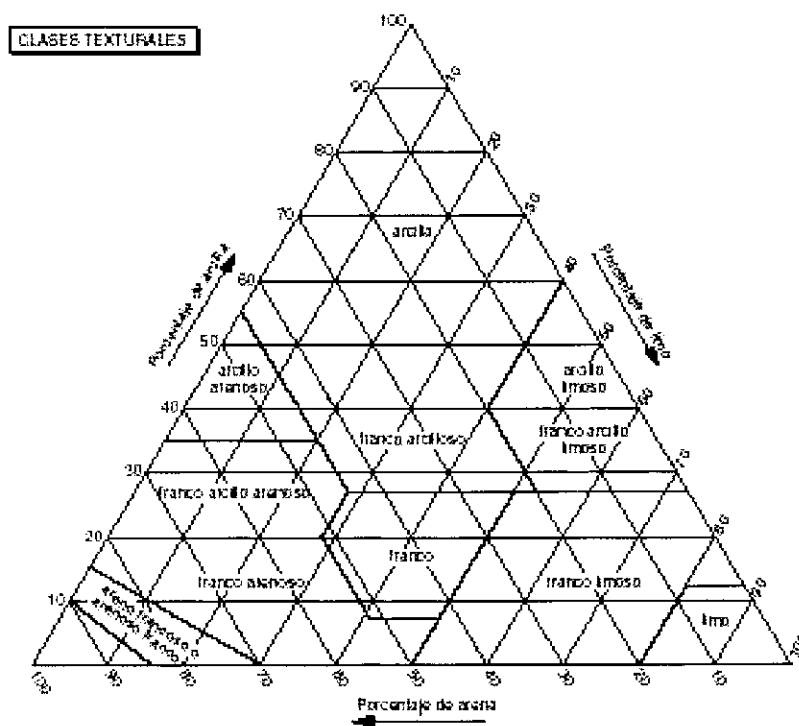
12. A las 2 horas tomar la segunda lectura del hidrómetro, así como también la temperatura de la suspensión.
13. Colocar el hidrómetro en un cilindro con agua conteniendo los 10 ml de calgón y leer el hidrómetro en la parte superior del menisco. Esta lectura se debe restar a la de los 40" y 2 horas para corregir la contribución hecha por el agente dispersante.
14. Una vez determinados los porcentajes de las diferentes partículas, usar el triángulo textual para determinar la clase textual de la muestra (Figura No. 1).

NOTA: El peso en base seca de la muestra corresponde al peso de la arena, limo y arcilla. La lectura corregida a los 40" son gramos de limo y arcilla, y la lectura corregida a las 2 horas son gramos de arcilla.

Cálculos

1. Gramos material en suspensión = Lectura hidrómetro – lectura agente dispersante ± corrección de temperatura
2. % de arena = (gramos de arena / gramos de suelo seco) x 100
3. % de limo = (gramos de limo / gramos de suelo seco) x 100
4. % de arcilla = (gramos de arcilla / gramos de suelo seco) x 100

Figura No. 1. Triángulo de clases texturales del suelo



C. Método de la Probeta

Equipo

1. Balanza analítica
2. Probeta de plástico de 50 ml
3. Franela
4. Tapón de Hule
5. Suelo tamizado a 2 mm

Procedimiento

1. Pesar 50 gramos de suelo seco
2. Poner el suelo en la probeta y cerrarla con el tapón de hule. Anotar el volumen que ocupa el suelo seco.
3. Humedecer la franela y exprimir el exceso de humedad. Doblarla 3 veces.
4. Colocar la franela doblada sobre la mesa.
5. Sobre la franela golpear la probeta 30 veces con una frecuencia de un golpe por segundo y con una trayectoria vertical de 30 centímetros.
6. La intensidad de cada golpe debe permitir el asentamiento del suelo y no la emisión del mismo hacia la boca de la probeta.
7. Anotar el volumen final ocupado por el suelo.

Cálculos

1. Porosidad = Volumen Inicial – Volumen Final
2. Densidad Aparente = Volumen Final / Peso del Suelo

Cuadro No. 22. Clase textural de muestras de suelo

| Muestra | ARCILLA (gr) | LIMO (gr) | ARENA (gr) | ARCILLA (%) | LIMO (%) | ARENA (%) | CLASE TEXTURAL |
|----------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|-------------|--------------|-----------------------------|
| 1B | 8.08 | 11 | 27.32 | 17.41% | 23.71% | 58.88% | FRANCO ARENOSO |
| 1 ^a | 4.08 | 11.64 | 31.05 | 8.72% | 24.89% | 66.39% | FRANCO ARENOSO |
| 2B | 17.08 | 16 | 15.02 | 35.51% | 33.26% | 31.23% | FRANCO ARCILLOSO |
| 2 ^a | 5.58 | 11.14 | 30.69 | 11.77% | 23.50% | 64.73% | FRANCO ARENOSO |
| 3B | 12.58 | 18.14 | 10.46 | 30.55% | 44.05% | 25.40% | FRANCO ARCILLOSO |
| 3 ^a | 12.08 | 14.64 | 21.51 | 25.05% | 30.35% | 44.60% | FRANCO |
| 4B | 9.08 | 17 | 21.77 | 18.98% | 35.53% | 45.50% | FRANCO |
| 4 ^a | 9.08 | 12 | 27.45 | 18.71% | 24.73% | 56.56% | FRANCO ARENOSO |
| 5B | 18.58 | 28.06 | 1.34 | 38.72% | 58.48% | 2.79% | FRANCO ARCILLOSO LIMOSO |
| 5 ^a | 6.08 | 12.36 | 30.77 | 12.36% | 25.12% | 62.53% | FRANCO ARENOSO |
| 6B | 13.08 | 34 | 0.78 | 27.33% | 71.04% | 1.63% | FRANCO LIMOSO |
| 6 ^a | 13.08 | 20.64 | 13.69 | 27.59% | 43.54% | 28.88% | FRANCO |
| 7B | 9.5 | 24.5 | 6.77 | 23.30% | 60.09% | 16.61% | FRANCO LIMOSO |
| 7 ^a | 15.36 | 5.64 | 24.18 | 34.00% | 12.48% | 53.52% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |

Continuación Cuadro No. 22. Clase textural de muestras de suelo.

| Muestra | ARCILLA (gr) | LIMO (gr) | ARENA (gr) | ARCILLA (%) | LIMO (%) | ARENA (%) | CLASE TEXTURAL |
|-----------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|-------------|--------------|-----------------------------|
| 8B | 7 | 27.18 | 11.75 | 15.24% | 59.18% | 25.58% | FRANCO LIMOSO |
| 8 ^a | 10 | 10.18 | 28.27 | 20.64% | 21.01% | 58.35% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 9 ^a | 11 | 16 | 22.13 | 22.39% | 32.57% | 45.04% | FRANCO |
| 9B | 9.5 | 17.86 | 21.07 | 19.62% | 36.88% | 43.51% | FRANCO |
| 9C | 8 | 7 | 33 | 16.67% | 14.58% | 68.75% | FRANCO ARENOSO |
| 10B | 14 | 27.36 | 6.49 | 29.26% | 57.18% | 13.56% | FRANCO LIMOSO |
| 10 ^a | 13 | 10.36 | 25.04 | 26.86% | 21.40% | 51.74% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 11B | 8 | 20 | 19.13 | 16.97% | 42.44% | 40.59% | FRANCO |
| 11 ^a | 12.36 | 17.64 | 18.79 | 25.33% | 36.15% | 38.51% | FRANCO |
| 12B | 12.18 | 17.82 | 18.88 | 24.92% | 36.46% | 38.63% | FRANCO |
| 12 ^a | 10.36 | 5.64 | 33.26 | 21.03% | 11.45% | 67.52% | FRANCO ARCILLOSO ARENOSO |
| 13B | 10 | 23.36 | 15.14 | 20.62% | 48.16% | 31.22% | FRANCO |
| 13 ^a | 8 | 18.72 | 22.24 | 16.34% | 38.24% | 45.42% | FRANCO |
| 14 | 9 | 17 | 22.62 | 18.51% | 34.97% | 46.52% | FRANCO |

D. Estaciones climatológicas

1. *Estación La Fragua*. Está localizada en Zacapa a una altura de 210 metros sobre el nivel del mar, en una zona bioclimática llamada monte espinoso subtropical. Su climadiagrama posee un déficit de humedad en todos los meses del año, siendo la época más crítica en los meses de febrero a mayo. Los meses que presentan menos déficit de humedad son junio y septiembre (Cuadro No. 23).

Cuadro No. 23 Registros climáticos de la estación La Fragua.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|--------|-------|-------|-------|----------|
| ene | 107.70 | 1.72 | 78.16 | 25.65 | -105.98 |
| feb | 114.55 | 1.27 | 79.60 | 26.45 | -113.28 |
| mar | 187.71 | 4.85 | 83.96 | 28.87 | -182.86 |
| abr | 234.19 | 30.47 | 86.68 | 30.38 | -203.72 |

Continuación Cuadro No. 23. Registros climáticos de la estación La Fragua.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| may | 256.54 | 83.28 | 87.05 | 30.58 | -173.26 |
| jun | 207.77 | 178.42 | 84.60 | 29.22 | -29.35 |
| jul | 190.50 | 100.98 | 83.20 | 28.45 | -89.52 |
| ago | 193.80 | 120.76 | 83.65 | 28.69 | -73.04 |
| sep | 166.12 | 144.15 | 82.65 | 28.14 | -21.97 |
| oct | 154.18 | 83.60 | 81.83 | 27.68 | -70.58 |
| nov | 84.84 | 15.46 | 78.56 | 25.87 | -69.38 |
| dic | 106.17 | 1.90 | 78.09 | 25.61 | -104.27 |

2. *Estación Pasabién.* Está localizada en Río Hondo, Zacapa a una altura de 260 metros sobre el nivel del mar aproximadamente. Está próxima al ecotono entre el monte espinoso subtropical y bosque seco subtropical. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de marzo y abril. Los meses de menos déficit al igual que la estación La Fragua son junio y septiembre (Cuadro No. 24).

Cuadro No. 24. Registros climáticos de la estación Pasabién.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| ene | 102.62 | 1.95 | 77.37 | 25.21 | -100.67 |
| feb | 94.49 | 0.81 | 77.18 | 25.10 | -93.68 |
| mar | 161.04 | 5.32 | 82.04 | 27.80 | -155.72 |
| abr | 192.28 | 36.97 | 84.20 | 29.00 | -155.31 |
| may | 216.16 | 94.50 | 84.92 | 29.40 | -121.65 |
| jun | 195.07 | 189.79 | 83.84 | 28.80 | -5.28 |
| jul | 179.07 | 81.93 | 82.40 | 28.00 | -97.14 |
| ago | 185.67 | 154.99 | 83.12 | 28.40 | -30.68 |
| sep | 163.32 | 164.78 | 82.40 | 28.00 | 1.46 |
| oct | 150.88 | 101.86 | 81.50 | 27.50 | -49.02 |
| nov | 117.09 | 21.75 | 79.16 | 26.20 | -95.34 |
| dic | 90.93 | 7.81 | 76.10 | 24.50 | -83.12 |

3. *Estación Morazán.* La estación Morazán, se localizada en El Progreso, a una altura de 370 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, su zona bioclimática es el bosque seco subtropical. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de marzo y abril (Cuadro No. 25).

Cuadro No. 25. Registros climáticos de la estación Morazán.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|--------|--------|-------|-------|----------|
| ene | 114.81 | 4.25 | 78.90 | 26.05 | -110.56 |
| feb | 129.03 | 1.57 | 80.99 | 27.22 | -127.46 |
| mar | 188.21 | 8.08 | 83.99 | 28.88 | -180.13 |
| abr | 231.65 | 43.25 | 86.51 | 30.28 | -188.40 |
| may | 241.55 | 94.82 | 86.24 | 30.13 | -146.73 |
| jun | 189.23 | 160.38 | 83.45 | 28.58 | -28.85 |
| jul | 192.79 | 91.38 | 83.34 | 28.52 | -101.41 |
| ago | 189.99 | 113.99 | 83.42 | 28.57 | -76.00 |
| sep | 146.05 | 174.45 | 81.13 | 27.29 | 28.40 |
| oct | 146.30 | 94.46 | 81.24 | 27.35 | -51.84 |
| nov | 116.33 | 35.68 | 79.30 | 26.28 | -80.65 |
| dic | 109.98 | 14.33 | 78.50 | 25.83 | -95.65 |

4. *Estación Ipala.* La estación de Ipala, se localiza a una altura de 370 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, su zona bioclimática se encuentra en el ecotono del bosque seco subtropical y bosque húmedo subtropical templado. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de marzo y abril (Cuadro No. 26).

Cuadro No. 26. Registros climáticos de la estación Ipala.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|--------|--------|-------|-------|----------|
| ene | 79.76 | 0.74 | 22.43 | 72.37 | -79.02 |
| feb | 81.28 | 2.01 | 23.10 | 73.58 | -79.27 |
| mar | 117.35 | 1.33 | 25.06 | 77.11 | -116.02 |
| abr | 137.67 | 45.16 | 26.40 | 79.52 | -92.51 |
| may | 144.27 | 93.04 | 26.25 | 79.25 | -51.23 |
| jun | 119.89 | 199.20 | 24.83 | 76.69 | 79.31 |

Continuación Cuadro No. 26. Registros climáticos de la estación Ipala.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|--------|--------|-------|-------|----------|
| jul | 114.55 | 144.13 | 24.23 | 75.61 | 29.58 |
| ago | 107.95 | 159.55 | 23.90 | 75.02 | 51.60 |
| sep | 100.58 | 194.55 | 23.90 | 75.02 | 93.97 |
| oct | 86.61 | 71.13 | 23.51 | 74.32 | -15.48 |
| nov | 81.53 | 18.16 | 22.78 | 73.00 | -63.37 |
| dic | 76.96 | 5.43 | 22.21 | 71.98 | -71.53 |

5. *Estación Esquipulas.* La estación de Esquipulas, se localiza a una altura de 950 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, su zona bioclimática es el bosque húmedo subtropical templado. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de marzo y abril (Cuadro No. 27).

Cuadro No. 27. Registros climáticos de la estación Esquipulas.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|--------|--------|-------|-------|----------|
| ene | 68.07 | 6.20 | 20.38 | 68.69 | -61.87 |
| feb | 70.61 | 6.27 | 21.25 | 70.24 | -64.34 |
| mar | 95.25 | 10.38 | 22.78 | 73.01 | -84.87 |
| abr | 109.47 | 50.40 | 24.04 | 75.28 | -59.07 |
| may | 93.73 | 160.73 | 22.03 | 71.65 | 67.00 |
| jun | 101.85 | 281.78 | 22.98 | 73.36 | 179.93 |
| jul | 101.35 | 283.75 | 22.68 | 72.82 | 182.40 |
| ago | 100.33 | 287.87 | 22.76 | 72.97 | 187.54 |
| sep | 90.17 | 361.38 | 22.43 | 72.38 | 271.21 |
| oct | 85.09 | 184.87 | 21.98 | 71.57 | 99.78 |
| nov | 65.28 | 42.99 | 20.25 | 68.44 | -22.29 |
| dic | 62.74 | 21.36 | 19.80 | 67.64 | -41.38 |

6. *Estación La Unión.* La estación de La Unión, se localiza a una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, su zona bioclimática es el bosque húmedo subtropical templado. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de marzo y abril (Cuadro No. 28).

Cuadro No. 28. Registros climáticos de la estación La Unión.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| ene | 62.99 | 43.65 | 67.57 | 19.76 | -19.34 |
| feb | 64.26 | 39.03 | 68.85 | 20.47 | -25.23 |
| mar | 71.63 | 20.39 | 68.59 | 20.33 | -51.24 |
| abr | 106.68 | 48.65 | 74.81 | 23.78 | -58.03 |
| may | 117.35 | 145.95 | 75.36 | 24.09 | 28.60 |
| jun | 108.71 | 271.38 | 74.40 | 23.55 | 162.67 |
| jul | 102.87 | 195.33 | 73.04 | 22.80 | 92.46 |
| ago | 100.84 | 248.68 | 73.04 | 22.80 | 147.84 |
| sep | 99.06 | 295.52 | 73.91 | 23.28 | 196.46 |
| oct | 85.60 | 147.56 | 71.63 | 22.02 | 61.96 |
| nov | 64.52 | 96.40 | 68.28 | 20.15 | 31.88 |
| dic | 62.74 | 86.13 | 67.62 | 19.79 | 23.39 |

7. *Estación Albores.* La estación de Albores, se localiza a una altura de 1900 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, su zona bioclimática es el bosque muy húmedo subtropical frío. Esta estación presenta un déficit mensual de humedad principalmente en los meses de enero al mes de abril (Cuadro No. 29).

Cuadro No. 29. Registros climáticos de la estación Albores.

| | ETP | PP | °F | °C | PP - ETP |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Ene | 52.58 | 19.69 | 60.80 | 16.00 | -32.89 |
| Feb | 52.83 | 23.17 | 62.02 | 16.68 | -29.66 |
| Mar | 70.61 | 14.74 | 64.84 | 18.24 | -55.87 |
| Abr | 80.01 | 55.64 | 67.06 | 19.48 | -24.37 |
| May | 84.58 | 159.20 | 66.90 | 19.39 | 74.62 |
| Jun | 81.03 | 299.49 | 66.46 | 19.14 | 218.46 |
| Jul | 77.47 | 252.69 | 65.12 | 18.40 | 175.22 |
| Ago | 75.18 | 304.60 | 64.92 | 18.29 | 229.42 |
| Sep | 68.83 | 420.48 | 64.62 | 18.12 | 351.65 |
| Oct | 62.99 | 260.68 | 63.20 | 17.33 | 197.69 |
| Nov | 51.82 | 127.49 | 60.96 | 16.09 | 75.67 |
| Dic | 45.97 | 45.62 | 58.86 | 14.92 | -0.35 |