

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES

IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DEL
CICLO HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS SAN LUCAS Y
ARENAL, GUATEMALA, GUATEMALA

TESIS

PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

ROMELIA MARGARITA ASTURIAS HERNÁNDEZ

En el acto de investidura como
INGENIERA AGRÓNOMA

EN

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
EN EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADA

GUATEMALA, AGOSTO DEL 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

LIC. CARLOS ESTUARDO GALVEZ BARRIOS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	DR. ARIEL ABDERRAMAN ORTÍZ LÓPEZ
VOCAL PRIMERO	ING. AGR. ALFREDO ITZEP MANUEL
VOCAL SEGUNDO	ING. AGR. WALTER ARNOLDO REYES SANABRIA
VOCAL TERCERO	ING. AGR. DANILO ERNESTO DARDÓN AVILA
VOCAL CUARTO	BR. DUGLAS ANTONIO CASTILLO ALVAREZ
VOCAL QUINTO	P. AGR. JOSÉ MAURICIO FRANCO ROSALES
SECRETARIO	ING. AGR. PEDRO PELAEZ REYES

Guatemala, agosto del 2006

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Señores miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis titulado:

**IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DEL CICLO
HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS SAN LUCAS Y ARENAL,
GUATEMALA, GUATEMALA s**

Presentándolo como requisito previo a optar al Título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que la presente investigación llene los requisitos académicos para su aprobación, me despido,

Atentamente,



Romelia Margarita Asturias Hernández

Carné 199210139

ACTO QUE DEDICO

A:

DIOS	Creador de todo el universo
MIS PADRES	Max Ignacio Asturias Martínez Jovita de Jesús Hernández Gómez Por sus invaluable sacrificios que me permitieron llegar hasta aquí.
MI ESPOSO	Marvin Roberto Salguero Barahona Por su apoyo incondicional, y por ser una parte importante en mi vida con amor.
MIS HIJAS	María Belén Salguero Asturias María del Carmen Salguero Asturias Con amor
MIS HERMANOS	Norma, Lily, Francisco y Max Con amor fraternal
MIS ABUELOS	María Gómez, con mucho amor Tomás Antonio Hernández V. (Q.E.P.D.) Francisco José Asturias Z. (Q.E.P.D.) Egriselda Martínez (Q.E.P.D.) María Concepción Cardona, con mucho cariño
MIS SOBRINOS	Con mucho cariño, sigan adelante.
MIS SUEGROS	Roberto Salguero Alvarado María Elizabeth Barahona de Salguero Por su apoyo incondicional
MIS CUÑADAS (OS)	Con cariño
MIS TIOS Y PRIMOS	Con mucho respeto y cariño
MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS	Especialmente a Lucia Soto, Lucrecia Pocón, Siria Tejeda, Saida Corado, Larissa Cabrera Por su amistad y sus consejos. Las quiero mucho

TESIS QUE DEDICO

A: MI PATRIA GUATEMALA

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

EL INSITUTO NORMAL PARA SEÑORITAS CENTROAMERICA -INCA-

EL INSTITUTO BASICO MIGUEL GARCÍA GRANADOS

LA ESCUELA PARA NIÑAS No.50 "INDOAMERICANA"

LA ESCUELA ELENA GUERRA DE SANDOVAL

AGRADECIMIENTOS

A:

Ingeniero Agrónomo M. Sc. Marvin Salguero, por su asesoramiento y dedicación en el desarrollo del presente trabajo.

Los habitantes del área de estudio que de una u otra forma colaboraron proporcionando valiosa información para la culminación de esta investigación.

Todas las personas que han colaborado en mi formación profesional.

CONTENIDO

	Página
Índice	i
Índice de cuadros	iii
Índice de figuras	v
Resumen	xii
1. Introducción	1
2. Definición del Problema	2
3. Marco Teórico	3
3.1 Marco Conceptual	3
3.1.1 Historia natural de la urbanización	3
3.1.2 Urbanización en América Latina	4
3.1.3 Impactos ambientales de la urbanización	6
3.1.4 Hidrología Urbana	11
3.1.4.1 El Proceso Erosivo	13
3.1.4.2 Escorrentía	14
3.1.5 Metodologías utilizadas	20
3.1.5.1 El método racional	20
3.1.5.2 Método del USSCS (Curva Número)	24
3.1.5.3 Formula empírica de Mac Math	34
3.2 Marco Referencial	35
3.2.1 Localización del área de estudio	35
3.2.2 Hidrografía	35
3.2.3 Relieve	38
3.2.4 Geología	38
3.2.5 Suelos	39
3.2.6 Fisiografía	42
3.2.7 Clima	42
3.2.8 Población	43
3.2.9 Antecedentes	44
3.2.9.1 Usos del suelo	44
3.2.9.2 Cuencas Hidrográficas y desastres naturales	45

4. Objetivos	49
4.1 General	49
4.2 Específicos	49
5. Metodología	50
6. Resultados	56
6.1 Establecimiento de escenarios	56
6.1.1 Capacidad de uso (Uso correcto)	56
6.1.2 Uso de la tierra del año 1966	57
6.1.3 Uso de la tierra del año 2006	57
6.2 Balances hídricos de suelos	62
6.2.1 Balance hídrico de suelos en condiciones de capacidad de uso de la tierra	62
6.2.2 Balance hídrico de suelos bajo condiciones de uso de la tierra del año 1966	63
6.2.3 Balance hídrico de suelos bajo condiciones de uso de la tierra del año 2006	64
6.3 Estimación de los caudales máximos de escorrentía	66
6.3.1 Método Racional	66
6.3.1.1 Capacidad de uso de la tierra	66
6.3.1.2 Uso de la tierra del año 1966	67
6.3.1.3 Uso de la tierra del año 2006	68
6.3.2 Fórmula de Mac Math	72
6.3.3 Método de USSCS o Curva Número	74
7. Conclusiones	77
8. Recomendaciones	78
9. Bibliografía	79
10 Anexos	82

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 1. Valores de Coeficientes de escorrentía (C)	23
Cuadro 2. Valores del coeficiente C de la escorrentía	24
Cuadro 3. Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente	30
Cuadro 4. Número de curva de escorrentía para áreas urbanas	29
Cuadro 5. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas	31
Cuadro 6. Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas	32
Cuadro 7. Números de curva de escorrentía correspondientes a tres condiciones de AMC	33
Cuadro 8. Coeficientes para fórmula de Mac Math, para cálculo de escorrentía	34
Cuadro 9. Registros climáticos de la estación Observatorio Central, INSIVUMEH	42
Cuadro 10. Registros climáticos de la estación Suiza Contenta, San Lucas Sacatepéquez	42
Cuadro 11. Cambios del uso de la tierra en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, en el periodo 1966-2006.	58
Cuadro 12. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Capacidad de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	62
Cuadro 13. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Uso de la tierra para el año 1966, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	63
Cuadro 14. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Uso de la tierra para el año 2006, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	64
Cuadro 15. Resumen general de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala.	65
Cuadro 16. Coeficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de capacidad de uso en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	67
Cuadro 17. Coeficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de uso de la tierra del año 1966, en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	67

Cuadro 18.	Coefficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de uso de la tierra del año 2006, en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	68
Cuadro 19.	Intensidades de lluvia (mm/h), para el tiempo de concentración promedio de las microcuencas San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, para diferentes periodos de retorno.	70
Cuadro 20.	Caudales máximos esperados, bajo diferentes escenarios de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método racional.	71
Cuadro 21.	Coefficientes de escorrentía promedio para el método Mac Math, de cálculo de escorrentía máxima de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	72
Cuadro 22.	Caudales máximos esperados, bajo diferentes escenarios de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método de Mac Math.	73
Cuadro 23.	Ponderación de los valores de número de curva para las diferentes categorías de uso de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	74
Cuadro 24.	Caudales de escorrentía calculados por el método de la curva número para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método de la curva número.	75
Cuadro 25.	Comparación de los caudales máximos calculados por los métodos Racional, Mac Math y Curva Número, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.	76
Cuadro 26 "A".	Balance hídrico de suelos de agricultura sin limitaciones (capacidad de uso)	84
Cuadro 27 "A".	Balance hídrico de suelos de agroforestería con cultivos anuales (capacidad de uso)	85
Cuadro 28 "A".	Balance hídrico de agricultura con mejoras (capacidad de uso)	86
Cuadro 29 "A".	Balance hídrico de suelos de agroforestería con cultivos permanentes (capacidad de uso)	87
Cuadro 30 "A".	Balance hídrico de suelos de tierras forestales de producción (capacidad de uso)	88
Cuadro 31 "A".	Balance hídrico de suelos de tierras forestales para protección (capacidad de uso)	90
Cuadro 32 "A".	Balance hídrico de suelos de hortalizas (uso de la tierra del año 1966)	91
Cuadro 33 "A".	Balance hídrico de suelos de café (uso de la tierra del año 1966)	92
Cuadro 34 "A".	Balance hídrico de suelos de maíz y pastos (uso de la tierra del año 1966)	93
Cuadro 35 "A".	Balance hídrico de suelos de centros poblados (uso de la tierra del año 1966)	94

Cuadro 36 "A". Balance hídrico de suelos de bosques (uso de la tierra del año 1966)	95
Cuadro 37 "A". Balance hídrico de suelos de arbustos de poco valor (uso de la tierra del año 1966)	96
Cuadro 38 "A". Balance hídrico de suelos de tierras con cultivos anuales (uso de la tierra del año 2006)	97
Cuadro 39 "A". Balance hídrico de suelos de pastos naturales no mejorados (uso de la tierra del año 2006)	98
Cuadro 40 "A". Balance hídrico de suelos de frutales de clima frío (uso de la tierra del año 2006)	99
Cuadro 41 "A". Balance hídrico de suelos de centros poblados (uso de la tierra del año 2006)	100
Cuadro 42 "A". Balance hídrico de suelos de bosques (uso de la tierra del año 2006)	101
Cuadro 43 "A". Balance hídrico de suelos de superficies degradadas (uso de la tierra del año 2006)	102

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Mapa de ubicación de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	36
Figura 2. Mapa de hidrografía y relieve de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	37
Figura 3. Mapa de series de suelos según Simmons de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	41
Figura 4. Mapa de capacidad de uso de la tierra de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	59
Figura 5. Mapa de uso de la tierra para el año 1966 de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	60
Figura 6. Mapa de uso de la tierra para el año 2006 de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala	61
Figura 7"A". Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia, para la estación INSIVUMEH Observatorio Central.	102

IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DEL CICLO
HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS SAN LUCAS Y ARENAL, GUATEMALA,
GUATEMALA

LAND USE CHANGE IMPACT IN THE HYDROLOGIC CYCLE BEHAVIOR IN SAN LUCAS AND
ARENAL RIVERS BASINS, GUATEMALA, GUATEMALA.

Resumen

El hombre hace uso de los recursos naturales para la satisfacción de sus diferentes necesidades, causando impacto de diferente índole en los mismos, la presión sobre la base de recursos naturales es cada día mayor, debido a que existen demandas crecientes de la población en torno a la utilización de los recursos existentes cuya oferta va en detrimento. Estos problemas son crecientes a través del tiempo y el cambio de cobertura esta muy asociado a ellos y por ende el crecimiento demográfico y la presión de esa población sobre los recursos naturales disponibles.

Las microcuencas del río San Lucas y río Arenal, se encuentran ubicadas dentro de la subcuenca del río Villalobos, que desemboca a su vez en el lago de Amatitlán. Por lo cual, los problemas ambientales asociados al estado de estas dos cuencas tienen un impacto directo sobre el lago de Amatitlán.

El objetivo de la investigación fue comparar el impacto que causa el cambio del uso del suelo en el comportamiento del ciclo hidrológico; mediante la elaboración de tres escenarios: 1. Capacidad de uso del suelo; utilizando la metodología del INAB; 2. Uso de la tierra del año 1966 y 3. Uso de la tierra para el año 2006. Esto se determinó a través de la comparación de los balances hídricos de suelo, así como con la estimación de los caudales máximos de escorrentía, de la microcuencas de los ríos san Lucas y Arenal.

Como resultado al comparar el uso de la tierra para los años 1966 y 2006, se observa que hay un cambio de uso del suelo, donde la reducción de los bosques en un 16.29% y la reducción de las tierras con agricultura en un 21.10%, son los más relevantes y esto va acompañado de un aumento de área ocupada por los centros poblados en un de 34%. Lo que indica que los bosques y las tierras de cultivo han sido desplazados para darle

lugar a un proceso de urbanización en el área, ya que existe una alta correspondencia entre las áreas hacia donde se ha expandido la urbanización y una disminución de los usos mencionados.

El análisis de los balances hídricos indica que el uso de la tierra según su capacidad favorece la infiltración y por ende la recarga profunda disminuyendo la escorrentía. Mientras, que los usos de la tierra de los años 1966 y 2006, al contrario aumentan la escorrentía y van en detrimento de la recarga potencial a los acuíferos del área.

La estimación de los caudales medios de escorrentía esperados para las microcuencas aumentan un 23% al comparar los escenarios de capacidad de uso de la tierra y el uso de la tierra para el año 1966; mientras que las diferencias aumentan al compara las condiciones de capacidad de uso de la tierra con las uso de la tierra para el año 2006, alcanzando un 100% de variación, o sea que los caudales medios esperados se duplican. Por lo tanto se considera que para el año 1966, las microcuencas no habían sufrido impactos tan severos como los que se presentan para el año 2006.

Sin embargo, al comparar los caudales máximos esperados (crecidas), se observa como estos aumentan en un 13% en el uso de la tierra para el año 1966, con relación al uso según su capacidad, mientras que para el año 2006 aumentan en un 44% con relación al uso según su capacidad. Lo cual indica que debido al cambio de uso de la tierra la magnitud de los caudales máximos esperados (crecidas), van a ser mayores, aumentando el riesgo de ocurrencia de desastres naturales.

La información generada puede ser utilizada para planificación estratégica en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo de caudales de agua superficial y de niveles de agua subterráneos, así como realizar estudios del impacto del uso el suelo sobre los procesos de erosión y vulnerabilidad a desastres naturales, los cuales se encuentran íntimamente relacionados con el comportamiento del ciclo hidrológico. Así, como elaborar un plan de ordenamiento territorial para las microcuencas que permita regular el proceso de urbanización, para que este sea desarrollado de una forma sostenible con el ambiente.

1. Introducción

El hombre hace uso de los recursos naturales para la satisfacción de sus diferentes necesidades, causando impacto de diferente índole en los mismos, la presión sobre la base de recursos naturales es cada día mayor, debido a que existen demandas crecientes de la población en torno a la utilización de los recursos existentes cuya oferta va en detrimento.

Este es el caso de los recursos naturales que se encuentran cercanos a los centros urbanos que tienen un crecimiento acelerado, la presión de la población es cada día mayor por el espacio y fruto de esa creciente demanda de espacio y a una serie de factores socioeconómicos y políticos que no permiten atender esas demandas de una forma organizada y compatible con el entorno natural, se presentan problemas ambientales que causan el deterioro de la calidad y cantidad de recursos naturales presentes en estas áreas.

En Guatemala, la cuenca del lago de Amatitlán es un claro ejemplo de esta problemática, la urbanización ha avanzado de la ciudad capital hacia la periferia, convirtiendo a la ciudad capital y sus municipios vecinos en un área conurbada. Los efectos de este proceso de urbanización, son principalmente el cambio del uso del suelo y por ende la disminución en la cobertura vegetal de la mayoría de las áreas. Estos cambios tienen efectos directos sobre el comportamiento del ciclo hidrológico en estas áreas donde se altera principalmente la recarga hídrica y la esorrentía.

La magnitud de estas alteraciones no ha sido estimada, sin embargo, año tras año se ven evidenciados los efectos, principalmente en las partes bajas de las cuencas donde los desastres naturales por estas causas son frecuentes.

El presente estudio tuvo como objetivo sistematizar la información disponible y generar información sobre esta problemática, evaluando los impactos de los cambios del uso del suelo en el ciclo hidrológico de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, específicamente en los balances hídricos de suelo y los caudales máximos de esorrentía esperados. Esta investigación se realizó en el periodo de mayo del 2005 a julio del 2006.

2. Definición del Problema

El hombre a través del uso que hace de los recursos naturales para sus diferentes actividades, representa un factor importante en la alteración de los ecosistemas naturales. Los impactos que puede provocar a los diferentes ciclos o sistemas naturales pueden ser positivos o negativos, dependiendo de la forma y el grado de utilización de los diferentes recursos.

La urbanización es un proceso a través del cual el hombre utiliza espacio físico, que originalmente estaba siendo ocupado por otras actividades, para desarrollar asentamientos humanos de diferentes características. Este proceso creciente de urbanización, está causando un cambio del uso del suelo, el cual modifica a la vez los ciclos naturales, convirtiéndolo en ciclos antrópicos o alterados. Las características físicas de los suelos determinan en gran parte la susceptibilidad de los mismos ante estos cambios, en lugares de alta susceptibilidad se eleva el proceso de degradación de los suelos.

La Ciudad de Guatemala, sufre un proceso de urbanización creciente debido a la explosión demográfica de los últimos años, la urbanización ha sobrepasado los límites mismos de la ciudad y ha alcanzado poblaciones vecinas como Villa Nueva, San Lucas Sacatepéquez, San José Pinula, Chinautla, etc. Por la proximidad de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal a esta área, no ha sido ajena del proceso de urbanización, lo cual ha generado un cambio en el uso del suelo y su respectivo impacto en los recursos suelo, agua y bosque. En el área el cambio de uso está muy asociado a estos impactos en los recursos naturales, aunado a que es un área donde se ha incrementado la pavimentación, el área de techos, y esto disminuye la infiltración del agua. La magnitud del impacto no se ha determinado, solo se pueden ver efectos asociados como deslizamientos, inundaciones, pérdida de infraestructura, incluso pérdida de vidas humanas.

El presente estudio genera información básica sobre los impactos del cambio del uso del suelo en la magnitud de los diferentes componentes del ciclo hidrológico del área. Con lo cual se puede sustentar la formulación de proyectos y programas que promuevan el uso y aprovechamiento de los recursos naturales aún existentes en el área de estudio.

3. Marco Teórico

3.1 Marco Conceptual

3.1.1. Historia natural de la urbanización

Tanto si se estudia la ciudad desde un punto de vista morfológico como funcional, retrocediendo incluso hasta las sociedades animales, los rasgos esenciales de lo urbano ya se pueden encontrar tanto en la forma externa como en el modelo interno de estos primitivos asentamientos (28).

La tendencia a la cohabitación formal y a la residencia estable dio lugar, a una forma ancestral de ciudad: la aldea, un instrumento colectivo resultado de la nueva economía agraria. Esta aldea exhibía ya sus principales características: un perímetro definido, ya fuera por una empalizada o por un montículo de tierra, separándola de los campos circundantes; viviendas, así como vertederos y cementerios (28).

La aparición de la ciudad a partir de la aldea fue posible gracias a las mejoras en la agricultura y en la conservación de los alimentos, en particular, el cultivo de cereales que podían ser producidos en abundancia y almacenados. Lo cual permitía cierta seguridad frente a los años de escasez, y permitía alimentar a un mayor número de población que no se dedicaba directamente a tareas relacionadas con la producción de alimento (28).

Una tendencia que distingue a la ciudad es la pérdida de los vínculos que unen a sus habitantes con la naturaleza y la transformación, eliminación o sustitución de los elementos más condicionados por el entorno natural, cubriendo el territorio natural con un escenario artificial que ensalza la dominación del hombre y estimula la ilusión de su independencia completa respecto de la naturaleza (28).

Cada uno de los elementos que caracterizaban la nueva forma urbana (la muralla, las viviendas duraderas, las arquerías, la calle pavimentada, los almacenes de provisiones, el acueducto, el alcantarillado) reducía el impacto de la naturaleza y aumentaba el dominio de la humanidad. La sustitución de la naturaleza por la ciudad descansaba, en parte, en la ilusión de autosuficiencia e independencia y la ilusión de la posibilidad de una continuidad física sin una renovación consciente (28).

Esto sucede cuando la ciudad pierde su relación simbiótica con su entorno inmediato; cuando el crecimiento sobreexplota los recursos locales como el agua y pone en peligro su suministro; cuando, para proseguir su

crecimiento, una ciudad se ve obligada a buscar agua, combustible o materias primas para su industria más allá de sus límites inmediatos; y, por encima de todo, cuando su tasa interna de nacimientos se hace insuficiente para mantener, si no aumentar, su población (28).

Hasta este punto, cuando la ciudad alcanza los límites de sostenibilidad de su propio territorio, el crecimiento se produce a través de la colonización. Superada esta fase, el crecimiento tiene lugar, desafiando los límites naturales, a través de una ocupación intensiva del territorio y de una invasión de las áreas circundantes, y de las ciudades rivales que compiten por los mismos recursos (28).

Cuanto mayor es el nivel de urbanización, más decisiva aparece la independencia respecto de las limitaciones naturales; cuanto mayor es el desarrollo de la ciudad como entidad independiente, más irreversibles resultan las consecuencias para el territorio que domina (28).

Las fuerzas ciegas de la urbanización, fluyendo a lo largo de las líneas de menor resistencia, no muestran ninguna capacidad de crear un modelo urbano e industrial que sea estable, sostenible y renovable. Por el contrario, según aumenta la congestión y prosigue la expansión de la ciudad, tanto el paisaje urbano como el rural se desfiguran y se degradan, al tiempo que las inútiles inversiones para solucionar la congestión, como la construcción de nuevas autopistas o la utilización de recursos hídricos más distantes, aumentan las cargas económicas y sólo sirven para promover más ruina y desorden del que intentan paliar (28).

3.1.2 Urbanización en América Latina

A partir del decenio de 1950, los países de América Latina y el Caribe han experimentado un crecimiento demográfico sin precedentes en su historia: de 166.3 millones de habitantes en el año 1950, a 359.3 millones en 1980 y más de 476.6 en 1995. Según las proyecciones de las Naciones Unidas, la población de la región llegaría en el año 2030 a casi 719.9 millones de habitantes. La tasa de crecimiento medio anual llegó al tope del 2.75% en la primera mitad de los años sesenta (32).

El incremento de la población ha ido acompañado de una notoria concentración de ésta en las zonas urbanas, algunas de las cuales ya figuran entre las concentraciones de población y actividades económicas más grandes a nivel mundial, y el despoblamiento de las zonas rurales. La urbanización o la concentración de la población en las zonas urbanas es un reflejo del movimiento migratorio del medio rural al urbano, del crecimiento vegetativo de las zonas urbanas y de la reclasificación de las zonas rurales en urbanas (32).

El proceso de urbanización de los países de América Latina y el Caribe está alcanzando un nivel tal que ha convertido a la región en una de las más urbanizadas del planeta junto con América del Norte y Europa. La población urbana de la región representaba en el año 1950 el 41.4% del total, alcanzando 68.9 millones de habitantes. Para 1995 ese porcentaje había subido al 73.4%, puesto que el número de habitantes urbanos había aumentado más de cinco veces (349.8 millones) y en el año 2030 se proyecta que habrá llegado al 83.2% y el número de residentes urbanos ascenderá a 598.8 millones. Paradójicamente esta concentración urbana se pretende alcanzar dentro de un marco llamado "de desarrollo sostenible"(32).

El proceso de urbanización en América Latina y el Caribe tiene entre sus principales características el concentrar, en el caso de los países más grandes, la mayor parte de los habitantes de áreas urbanas y de la actividad económica en pocas ciudades. En varios países, este fenómeno se da con frecuencia en una sola ciudad, generalmente la capital del país. Por ejemplo, el área metropolitana de la Ciudad de Panamá concentra el 66% de la población urbana de Panamá, San José el 55% de Costa Rica, la Ciudad de Guatemala el 53% de Guatemala, Santiago el 41% de Chile, Lima el 40% de Perú y Buenos Aires el 39% de Argentina (32).

Una de las consecuencias de la rápida urbanización y la migración rural-urbana ha sido la creación de extensas zonas urbanas marginales en la periferia de las ciudades más grandes sin ninguna planificación de infraestructura y servicios. Muchos de los pobres urbanos, especialmente los pobres que llegan de las áreas rurales o ciudades más pequeñas, se establecen en asentamientos irregulares (también conocidos como tomas, o invasiones), en las periferias. Por lo general, éstos se crean de manera ilegal y fuera del plano regulador del casco urbano (32).

Muchos de estos asentamientos ilegales se establecen en lugares ambientalmente sensibles, más expuestos a peligros de diverso tipo, especialmente inundaciones y deslizamientos de tierra y lodo. Son los menos adecuados para construcción, como por ejemplo, "*en las empinadas laderas de La Paz, Bolivia; en pantanos y lechos de lagos o depósitos de basura en la Ciudad de México; en las laderas con fuerte pendiente de los ríos en Asunción, Paraguay; en las bahías poco profundas y ensenadas de Salvador, Brasil; y en las lagunas contaminadas de Cartagena, Colombia*" (12).

3.1.3 Impactos ambientales de la urbanización

Según Dourojeanni y Jouravlev, (1999), no existe un sólo aspecto de la vida del ser humano y de su entorno que no se vea influenciado o afectado por la expansión de la población y su concentración en zonas urbanas. Las zonas urbanizadas se ven, sin embargo, afectadas a su vez por las actividades que se realizan en su entorno, sobre todo por las acciones que se realizan en las partes altas de las cuencas donde se asientan las poblaciones y por las lluvias que caen directamente en las zonas urbanas. La interacción de los centros urbanos, las cuencas, los ríos o las lluvias y las zonas de pendiente debe ser considerada adecuadamente para prevenir riesgos así como para garantizar el abastecimiento de agua para el consumo humano, una de las claves para lograr un desarrollo sustentable o sostenible (12).

No resulta extraño que el rápido incremento de la población urbana, sumada a la progresiva expansión de los sistemas de alcantarillado, el uso más intensivo de la tierra agrícola próxima a las ciudades, la destrucción de la cobertura vegetal por construcción urbana, el aumento la regulación artificial del caudal, la ocupación del territorio de las cuencas de captación y de las áreas de recarga de las aguas subterráneas, así como las interferencias en el ciclo hidrológico y clima local como resultado de las construcciones urbanas haya tenido serias repercusiones sobre los recursos hídricos y el medio ambiente en general. Igualmente significativos, desde el punto de vista de la gestión del agua, han sido los cambios que han ocurrido en la estructura económica, especialmente el crecimiento de la industria manufacturera en las zonas metropolitanas (12).

Los procesos urbanísticos, es decir, la conversión de un sistema ecológico natural a uno urbano, son responsables de varios efectos sobre el ambiente, tales como alteración de la composición de la atmósfera, de los parámetros hidrológicos de la cuenca, de la geomorfología de los cauces y de otros cuerpos de agua, así como de las condiciones naturales del suelo. Existen diversas fuentes de contaminación asociadas con el urbanismo, tal como desechos industriales, sistemas de calefacción y refrigeración, sistemas de transporte, disposición de aguas servidas, recolección y disposición de desechos sólidos (basuras), disposición de desechos vegetales orgánicos y caída de restos vegetales sobre superficies impermeables (12).

Durante el período de construcción de los asentamientos, los efectos se reflejan como grandes pérdidas de suelo. En cuencas fuertemente urbanizadas la mayor parte de sedimentos que transportan las corrientes puede provenir de pequeñas áreas bajo construcción. La construcción de estructuras hidráulicas asociadas con los desarrollos urbanísticos, tal como puentes, canalizaciones, muros, retenciones, rectificación de cauces, etc., alteran la geomorfología del cauce en forma irreversible, lo mismo que el hábitat natural. El incremento de las áreas impermeables reduce la infiltración y el tiempo de concentración de la escorrentía superficial

resultando en una respuesta de la cuenca (caudal) más rápida y de mayor magnitud que la de condiciones naturales; el caudal base, por el contrario, disminuye (12).

Agrava lo anterior el hecho de que en los centros urbanos de la región existe una despreocupación generalizada con respecto a las zonas de captación de agua, sean éstas superficiales o subterráneas. En muchos casos, las ciudades simplemente amplían sus demandas e importan el agua y energía generada por plantas hidroeléctricas de todos los alrededores, sin mayor preocupación por el manejo de las cuencas de donde provienen estos recursos. Todo ello acarrea conflictos de tipo social, económico y ambiental a los cuales los centros urbanos prestan escasa atención si ocurren fuera del área urbana y no les afecta directamente (12).

Otro aspecto importante con relación a las zonas urbanas es la creciente contaminación y agotamiento de las aguas subterráneas. Éstas merecen una consideración especial ya que se estima que en la región un 50% de las comunidades dependen exclusivamente de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento de agua (OPS, 1998). A pesar de su importancia, la protección de las aguas subterráneas no ha recibido hasta ahora casi ninguna atención. No hay prácticamente preocupación por mantener zonas de recarga (12).

Un aspecto que aumenta los riesgos en zonas urbanas es la degradación de la vegetación en las laderas y cuencas de captación de agua y la expansión urbana en dichas zonas. Ello ha motivado un aumento en la escorrentía superficial, disminución de la recarga de agua subterránea, aumento de la erosión y, por ende, una mayor violencia en la descarga de agua en épocas de lluvias. Hay una enorme pérdida en el flujo de agua subterránea y subsuperficial, clave en la alimentación de manantiales utilizados en épocas secas por la población (12).

Las construcciones y otras actividades que alteran la superficie de las cuencas proveedoras de aguas para las áreas urbanas están poniendo en peligro las posibilidades de mantener el abastecimiento actual de agua y asegurarlo en el futuro para las poblaciones. Ante estos problemas, cabe recordar la reflexión de un extranjero de visita en Lima, Perú: *"no los entiendo: traen el agua de la sierra, la energía de la sierra, los alimentos de la sierra y la gente de la sierra ... para vivir en Lima. ¿Por qué mejor no ponen a Lima en la sierra?"* (12).

WILA

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, reunida en Estocolmo, Suecia, del 5 al 16 de junio de 1972, y atenta a la necesidad de un criterio y principios comunes que ofrezcan a los pueblos del mundo inspiración y guía para preservar y mejorar el medio ambiente; Expresa la convicción común de que:

- a. Los recursos naturales de la tierra, incluidos, el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga.
- b. Debe mantenerse y, siempre que sea posible, restaurarse o mejorarse la capacidad de la tierra para producir recursos vitales renovables.
- c. Los recursos no renovables de la Tierra deben emplearse de forma que se evite el peligro de su futuro agotamiento y se asegure que toda la humanidad comparta los beneficios de tal empleo.
- d. Debe aplicarse la planificación a los asentamientos humanos y a la urbanización con miras a evitar repercusiones perjudiciales sobre el medio y a obtener los máximos beneficios sociales, económicos y ambientales para todos (30).

El Fondo de Población de la ONU (UNFPA) advirtió sobre los riesgos para el planeta del crecimiento poblacional, según datos del informe anual presentado hoy en Londres por la directora de ese organismo, Thoraya Ahmed Obaid. El aumento de la población y el alto consumo de los sectores ricos está agravando el estrés sobre el medio ambiente mundial, provocando un aumento del calentamiento global, la deforestación, la creciente escasez de agua y la disminución de las tierras de cultivo", destacó el reporte (32).

El informe *Estado de la Población Mundial 1999*, del Fondo Poblacional de las Naciones Unidas (FPNU, 1999), documenta la tendencia a la creciente urbanización. El Informe ofrece la siguiente predicción sobre la urbanización: *la "huella" ecológica y sociológica de la ciudad se extiende en áreas cada vez más amplias, creando una continuidad urbana y rural de comunidades que comparten algunos aspectos de su estilo de vida. Cada día menos y menos lugares en el planeta escapan al efecto de la dinámica de las ciudades* (31).

Molina Terrén (25), menciona en su estudio "Criterios para reducir el impacto ambiental de la urbanización", que la continua extensión de las periferias urbanas y el progresivo abandono de sus cascos históricos, es **cualquier cosa menos sostenible**, y tampoco tiene mucho de racional ni meditado. Cualquier sistema que pretenda la gestión sostenible del territorio debería proscribir la vulgar acepción de **urbanizar**, puesto que es una actividad que causa desmedido impacto ambiental, al consistir básicamente en eliminar suelo rústico mediante un desproporcionado consumo de recursos escasos. Es por ello que, dentro de un marco económico

mediante un desproporcionado consumo de recursos escasos. Es por ello que, dentro de un marco económico que tenga la pretensión de perdurar, la única propuesta urbanística sensata consiste en limitar drásticamente la expansión del suelo urbano y mejorar la gestión y calidad del existente, conservándolo y rehabilitándolo con materiales y técnicas que causen mínimo impacto ambiental (31).

Según Peña Llopis (33), quien realizó un estudio de cambios del uso del suelo en una cuenca de Alicante España, la dinámica de cambio de usos se ve influida por factores físicos y socioeconómicos. Existe un patrón de distribución de los usos del suelo, debido a causas antrópicas o naturales que limita la distribución de los usos por factores topográficos y socioeconómicos. Además, Los resultados teóricos del modelo indican un incremento de la infiltración, intercepción y percolación, y una disminución de la escorrentía y la evapotranspiración. Los resultados reales de infiltración para el periodo 1980-1997 no muestran evidencias estadísticamente significativas que permitan concluir con que los cambios de usos han afectado a los balances hídricos.

Narcís, P. (29), en su artículo "La urbanización nos ahoga" menciona que "el suelo no urbanizado filtra el 70% del agua de lluvia, mientras que el pavimentado sólo el 5%. Nos recordamos de las inundaciones cuando llueve mucho, pero el impacto producido por sus efectos dura poco en los medios de comunicación, y menos en los despachos de los políticos. Y se vuelve al pensamiento ¿donde hay suelo para construir más viviendas?, ¿Adónde irán a parar los nuevos polígonos industriales?, ¿por dónde pasará el tren de alta velocidad o la nueva autopista? Pocos piensan en los efectos que esta pérdida de suelo sin urbanizar va a originar cuando vengan las nuevas lluvias. Como excusa siempre nos quedará el recurso de acudir a lo inusual de la situación, ya que 200 litros por metro cuadrado en pocas horas es una lluvia extraordinaria o sea no siempre pasará."

Además menciona Narcís (29), que las inundaciones de hoy son consecuencia de la política territorial de especulación de ayer, ya que el coeficiente de escorrentía del agua de lluvia en el suelo (agua que se escurre sin filtrarse) pasa del 30% en el suelo no urbanizado hasta el 95% en los suelos pavimentados. Se calculado que el caudal de las crecidas puede llegar a multiplicarse por ocho si el suelo está urbanizado, generándose inundaciones a pesar de la cobertura de sus ríos. Las infraestructuras (autopistas, carreteras, trenes) contribuyen a agravar el problema. Primero, porque son generadores de escorrentía rápida (más agua en menos tiempo al río o a los colectores), y segundo, porque se oponen al movimiento del agua. Parece ser que quienes diseñan los pasos de las infraestructuras por los ríos nunca han visto una crecida fluvial allí donde lo más que hay es fango y muchos restos de vegetación que pueden obturar puentes o tuberías. Las soluciones al

y riveras. Pero sólo sirven para esconder los problemas hasta la próxima lluvia extraordinaria. A nadie se le ocurrirá cuestionar la nueva urbanización que se pretende desarrollar cubriendo un torrente o el nuevo carril de la autopista necesario para evitar atascos, operaciones que van a agudizar el problema en la próxima lluvia.

La planificación de los recursos hídricos se realiza a nivel de cuenca hidrográfica debido a que lo que llueve en ésta área y escurre superficialmente se concentra y tiene un punto de salida en la red hidrográfica. En otras palabras el buen o mal manejo de las actividades productivas dentro de una cuenca repercute aguas abajo de donde se llevan a cabo dichas acciones. Entre las características biofísicas relevantes a evaluar para predecir los posibles efectos de un fenómeno natural extremo están: Los tipos de material parental (geología), suelos y pendientes. Estas condiciones, conjuntamente con la cantidad e intensidad de las precipitaciones y el uso actual del suelo contribuyen al proceso de erosión, transporte y sedimentación de sólidos. Los efectos se agravan cuando se presentan fenómenos naturales como el Mitch y hay un manejo inadecuado del suelo. Es decir, la incompatibilidad entre la capacidad de uso y el uso actual de la tierra favorece los procesos de erosión, con sus consecuentes efectos negativos sobre el ambiente y la infraestructura (4).

Según Monzón (27), mucha de la destrucción de los bosques causada por humanos es una consecuencia de la sobrepoblación. En muchos lugares, hay demasiado personas tratando de vivir de recursos forestales muy reducidos. Se cortan los árboles no solamente por su madera y otros productos, sino que el terreno puede luego ser convertido en pastizales para el ganado y en campos agrícolas para alimentar un número creciente de personas. A medida que las ciudades se expanden, se eliminan los bosques para permitir la construcción de viviendas, centros comerciales. A medida que la población aumenta, las ciudades se expanden hacia nuevas áreas que antes estaban cubiertas con árboles.

Reyna (35), expresa que la presión demográfica, manifestada por el crecimiento y volumen de la población así como su distribución y desplazamiento, mantiene unas interrelaciones muy complejas entre pobreza, consumo y agotamiento de los recursos naturales, y el medio ambiente. Veamos cuales son esas interrelaciones:

- a. **Deforestación.** La deforestación es consecuencia también de un aumento de la población. La capa forestal desaparece progresivamente como efecto de la presión demográfica sobre el medio ambiente. Así, desaparecen o se erosionan tierras fértiles por el aumento en la cría de ganado. Los acuíferos se agotan por excesos de riegos, los cuales provocan a su vez mayor salinización.

- b. **La densidad de población.** Los acuíferos y reservas de agua son bienes públicos amenazados por el factor del crecimiento poblacional, que se agravan cuando se unen otros factores conexos con la población, ejemplo de la contaminación por industria, demanda excesiva de recursos del bosque, pesca incontrolada o indiscriminada, mala gestión forestal o medioambiental, etc. El impacto tiene efectos más intensos en aquellos lugares donde se asientan las poblaciones humanas más densas, que son generalmente las zonas costeras. El resultado de este impacto en el medio ambiente próximo a las zonas más pobladas, es que muchos pantanos, humedales y arrecifes coralinos están seriamente amenazados.
- c. **La velocidad de cambio de la población.** La consecuencia inmediata del aumento de población urbana, es la ocupación de cada vez mayor terreno fértil y cultivable para establecerse y levantar construcciones.

3.1.4 Hidrología Urbana

Mencionan Gutiérrez y Ayala (18), que la característica principal de las cuencas urbanas está representada por el incremento de la impermeabilización y la reducción de la infiltración debido al revestimiento del suelo como consecuencia de la construcción de nuevos edificios, pavimentación de veredas, calles y avenidas, y la remoción de la cobertura vegetal. Estos factores incrementan el volumen y la velocidad de escorrentía produciendo caudales pico mayores en comparación con la cuenca no intervenida.

Además manifiestan que la consecuencia más importante de la urbanización es la modificación drástica de las condiciones naturales, que gobiernan el movimiento, la distribución y la calidad del agua. En general la urbanización intensifica y acelera el proceso lluvia-escorrentía. La urbanización convierte en impermeables áreas que eran permeables y hace que se incremente la porción de lluvia que se convierte en escorrentía superficial, es decir incrementa el coeficiente de escorrentía. Además, la aceleración producida en el proceso lluvia-escorrentía, debida a la sustitución del suelo natural por superficies menos rugosas y mejor alineadas, hace que se produzca una disminución del tiempo de ocurrencia de las avenidas y por lo tanto, un incremento en el gasto máximo de las mismas. Otros efectos de la urbanización, que siendo indirectas son muy importantes, son las invasiones de los cauces naturales y sus planicies de inundación y la deforestación de las cuencas aportadoras.

El proceso lluvia-escorrentía en zonas urbanas, presenta características muy peculiares, describiendo a continuación las fases más relevantes.

El proceso lluvia-escorrimento en zonas urbanas, presenta características muy peculiares, describiendo a continuación las fases más relevantes.

1. La lluvia es interceptada parcialmente por la vegetación, principalmente por las ramas de los árboles, antes de llegar al suelo.
2. Al llegar la lluvia al suelo se presentan dos fenómenos simultáneos: • La lluvia se infiltra en el terreno. • Comienza a mojarse la superficie, llenando las depresiones.
3. Los procesos anteriores continúan hasta formarse un tirante suficiente que rompa la tensión superficial. Este hecho sucede cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del terreno. Se inicia el escurrimento superficial.
4. Al ocurrir el escurrimento superficial se presentan varios procesos simultáneos: • El agua se infiltra con una velocidad variable (depende del grado de saturación del terreno, intensidad de la lluvia y volumen de agua almacenado sobre la superficie). • Las depresiones más grandes del terreno continúan llenándose. • Se produce el escurrimento en el cual los tirantes y las velocidades varían en forma continua y son gobernados por las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. Este proceso es alimentado por la **lluvia efectiva**.
5. El agua que llega a las cunetas se acumula en ellas, hasta que se forma un tirante suficiente y escurre hacia las coladeras.
6. El agua que llega a las coladeras ingresa al sistema de drenaje.
7. El escurrimento en los colectores de drenaje está gobernado por las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. Inicialmente el escurrimento es a superficie libre. Después, cuando la capacidad de los conductores no es suficiente, el agua escurre a presión y en ocasiones puede derramarse (18).

Cerrillo (7), en su artículo “Efectos de la Tormenta” da a conocer que el fuerte ritmo de ocupación del suelo y el consiguiente proceso de impermeabilización del terreno es una de las principales causas de los graves efectos que están causando las inundaciones registradas en los últimos tiempos. La creación de áreas urbanizadas o la consolidación de las existentes así como las infraestructuras de todo tipo han comportado el asfaltado de extensas superficies del suelo, con lo que se incrementa peligrosamente el caudal de agua que circula en caso de lluvia. Así lo señalan algunos de los expertos consultados, que ven necesario sincronizar el desarrollo urbano con las obras hidráulicas. La impermeabilización del suelo también explica la reiteración de las inundaciones. El agua, al no poder filtrarse con facilidad a los acuíferos subterráneos, escurre por la superficie. El suelo ha dejado de ser una esponja y se ha transformado en una peligrosa tabla lisa que lo

En este artículo es citado también Joseph Dolz Ripollès, ingeniero hidráulico de la Universidad Politécnica de Cataluña, afirma que "el uso del territorio se ha de realizar de manera que se respeten sus características hidrológicas", y aboga por tomar medidas para limitar o compensar la impermeabilización del suelo, según recoge en el libro "Riadas", editado por la Fundación Agrícola Catalana. Dicha fundación propone que cada vez que se creen nuevas áreas urbanizadas se tomen medidas preventivas para garantizar la circulación del agua, como la ampliación de la capacidad de los alcantarillados. Se sugiere la construcción de pozos, balsas o depósitos para infiltrar o regular el agua, o habilitar espacios ajardinados así como el uso de materiales porosos en ellos.

3.1.4.1 El Proceso Erosivo

Según Inzunza (24), el proceso erosivo se presenta desde el nacimiento de los ríos cuando fluyen aguas abajo, disminuyendo progresivamente su altitud respecto del nivel del mar, obviamente dado a que las aguas siguen una dirección bajando sobre los cauces por acción de la fuerza de gravedad.

Desde "aguas arriba" hacia "aguas abajo" el tamaño promedio de las partículas del fondo de los cursos de agua se van reduciendo desde los grandes bolones o rocas mayores de los arroyos de montaña, pasando por piedras bochas y cantos rodados de mediano tamaño y gravas menores llegando hasta los finos sedimentos arenosos y arcillosos de los grandes ríos.

En términos hidrológicos, los estudios y experiencias realizadas determinan que en los ríos ocurre el transporte de materiales de origen erosivo que tiene diversas formas y estas son:

- a. Suspensión: Los materiales son arrastrados por la corriente sin tocar el fondo
- b. Saltación: Los materiales avanzan a saltos sucesivos, describiendo trayectorias discontinuas tanto en el espacio como en el tiempo.
- c. Acarreo: Los materiales ruedan o se deslizan sobre el fondo. Los materiales transportados por los cursos de agua están formados por una mezcla de partículas de varios tamaños.

3.1.4.2 Escorrentía

Se entiende por escorrentía a la parte de la precipitación que llega o alimenta a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes de una cuenca. La escorrentía así definida, tiene diversas procedencias en el conjunto de la cuenca, lo cual hace que se consideren distintos tipos de escorrentías (24):

A. Escorrentía Superficial

Es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad. Corresponde pues a la precipitación que no se infiltra, que no queda retenida en las depresiones del suelo y que escapa a los fenómenos de la evapotranspiración.

Cuando se inicia un aguacero, la primera precipitación caída se invierte en abastecer la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo, y solamente cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, comenzará el agua a moverse por la superficie del terreno.

Es entonces cuando se forma una delgada capa de agua que se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno, que es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación, hasta incorporarse a la red de drenaje donde se mezcla con los otros componentes que constituyen la escorrentía total (24).

B. Escorrentía Subsuperficial o Hipodérmica

Es el agua de precipitación que habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve lateralmente por los horizontes superiores para reaparecer de pronto al aire libre e incorporarse a los microsurcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje (24).

C. Escorrentía Subterránea

Es la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la capa freática, circulando a través de acuíferos hasta alcanzar la red de drenaje. Así como la escorrentía superficial se mueve con cierta rapidez, la velocidad del agua subterránea suele ser muy baja, del orden de metro por hora.

Aparte de las tres formas referidas, la escorrentía de un curso de agua está además constituida por la precipitación que cae directamente sobre su superficie de nivel, fracción que en la mayor parte de los casos reviste importancia muy escasa en relación con las otras aportaciones (24).

D. Ciclo de la Escorrentía

Los componentes de la escorrentía evolucionan según un ciclo cuyo estudio permite apreciar su significación particular. Este ciclo que se considera, distingue cuatro fases en correlación con el ritmo de las precipitaciones (24).

a. Primera Fase o Período sin precipitaciones

Después de un período sin precipitaciones, la evapotranspiración tiende a agotar la humedad existente en las capas superficiales y a extraer agua de las subterráneas a través de la franja capilar. Las aguas subterráneas alimentan a las corrientes superficiales descendiendo progresivamente su nivel (24).

b. Segunda Fase o Período de Iniciación de la Precipitación

La evapotranspiración cesa, el agua es interceptada por la vegetación, las superficies de agua libre, los cursos de agua y el suelo. En éste se infiltra una cantidad importante de agua que abastece su capacidad de almacenamiento; el excedente se mueve superficialmente en forma de escorrentía directa que alimenta débilmente los cursos de agua.

Continúan las aportaciones de las corrientes subterráneas a los cursos superficiales no interrumpiéndose el descenso de los niveles de la capa freática (24)

c. Tercera Fase o de Período de Precipitación Máxima

Luego de una cierta duración de la precipitación, la cubierta vegetal apenas intercepta el agua y prácticamente la totalidad de la precipitación alcanza el suelo. Las capas superficiales llegan a estar completamente saturadas. Parte de las precipitaciones se infiltran alimentando la escorrentía hipodérmica y a los acuíferos, originándose en estos últimos una elevación en su nivel. La precipitación que no se infiltra genera escorrentía superficial, que en esta fase alcanza su nivel máximo. La escorrentía subterránea aumenta ligeramente.

La escorrentía total es la suma de las escorrentías de superficie, hipodérmica y subterránea, alcanza igualmente su valor máximo, apareciendo las crecidas. Durante esta fase puede ocurrir que en determinadas zonas se produzca una alimentación de los cursos de agua a las corrientes subterráneas, es decir, un proceso contrario a lo que normalmente ocurre. Esta fase solamente tiene existencia si la intensidad del aguacero alcanza cierto valor (24).

d. Cuarta Fase o Período Posterior a la Precipitación

Cuando la lluvia cesa, la escorrentía de superficie desaparece rápidamente. El suelo y subsuelo permanecen saturados y continúa la infiltración del agua estancada en depresiones superficiales, alimentando a la humedad del suelo, a la escorrentía hipodérmica y a las aguas subterráneas. Se reinician nuevamente los procesos de evapotranspiración. Los cursos de agua, alimentados únicamente por las escorrentías hipodérmica y subterránea entran en régimen de decrecida y se normaliza la alimentación de los cursos de agua por los acuíferos, desapareciendo las posibles inversiones de la fase anterior. El ciclo se cierra con la reaparición de la primera fase (24).

E. Acción de las Precipitaciones

La acción de las precipitaciones produce erosión por salpicadura. Cuando la gota de agua cae a través de la atmósfera, sufre cambios en su tamaño aumentando o disminuyendo por condensación o evaporación.

Desciende por la acción de la fuerza de gravedad, frenando su caída la resistencia que le ofrece el aire. En ausencia de obstáculos golpea al suelo con fuerza considerable disgregando las partículas terrosas y proyectándolas en el aire. En los estudios e investigaciones realizadas se ha determinado que, como consecuencia del choque con el suelo, las gotas proyectan partículas hasta los 60 cm. de altura en vertical y hasta los 1.50 m. en plano horizontal. Sin embargo, la precisa determinación de la energía erosiva de las gotas de agua, exige el adecuado conocimiento del tamaño de las gotas y la velocidad de caída. También interviene en la erosión un factor de relación que liga la intensidad de la precipitación con el tamaño medio de sus gotas.

Al llegar al suelo, la precipitación puede evaporarse, infiltrarse o quedar en la superficie. Descontando la parte evaporada, la permeabilidad del suelo regula en todo momento la distribución de lo precipitado, entre el agua que penetra en el interior y el agua que queda detenida o bien fluye en la superficie. La formación del escurrido superficial depende del régimen de precipitaciones y de las características hidrológicas del suelo. Si la permeabilidad del suelo permite en todo momento la infiltración de una cantidad de agua mayor o igual a la que aporta la precipitación, no se producirá ninguna corriente superficial. En caso contrario, se formará en la superficie una lámina de agua que puede llegar a ponerse en movimiento por acción de la pendiente del terreno.

La acción del escurrido en el proceso erosivo se manifiesta en un doble aspecto: disgrega a los elementos terrosos y, al mismo tiempo, transporta a otros lugares aquellas partículas de tierra que por su tamaño y forma son susceptibles de arrastre.

La acción del escurrido en cuanto a transportar partículas de tierra, encierra una mayor importancia. Los frotamientos y choques de la corriente de agua con la superficie rugosa del suelo, hacen rodar, deslizar o dar pequeños saltos a los granos de tierra. Tales tensiones serán causa de la formación de una turbulencia en la corriente, originándose torbellinos que al contener vectores de fuerza de trayectoria helicoidal, con zonas circulantes de suficiente velocidad de ascenso, pueden llegar a poner en suspensión a las partículas de tierra más pequeñas (24).

F. Intensidad, Duración y Frecuencia de los Aguaceros

Al considerar a la precipitación en el espacio y tiempo de ocurrencia, surge como unidad natural el aguacero. La intensidad, duración y frecuencia de los aguaceros son características de la precipitación de gran significado en la erosión. El producto de la intensidad y duración define la abundancia.

Cuando la intensidad es superior a la penetración del agua en el suelo, se formará en escurrido superficial promotor fundamental de que se produzcan erosiones, siendo evidente que los efectos revestirán una mayor o menor importancia según el tiempo de duración del fenómeno. Así como las gotas de lluvia tienen mayores efectos erosivos para lluvias violentas y de velocidades elevadas.

La frecuencia de los aguaceros ejerce influencia en el fenómeno erosivo debido a sus repercusiones en el estado de humedad del suelo en el tiempo. Si los intervalos son cortos, el contenido de humedad del suelo es elevado al iniciarse un nuevo aguacero, incidiendo en la generación de escorrentías superficiales, aunque su intensidad sea baja. Si los citados intervalos son largos en cambio, el suelo llegará prácticamente a secarse, retardándose la formación de escorrentías superficiales e incluso, puede que no lleguen a existir si la intensidad de la lluvia es baja. Los principios racionales expuestos han sido corroborados en multitud de experiencias (24).

G. Factores determinantes del fenómeno erosivo

Determinan al fenómeno erosivo:

a. el suelo: La cantidad de tierra desplazada por la percusión de las gotas de lluvia es tanto más grande cuanto más susceptibles sean las partículas a disgregarse.

En lo que concierne al escurrido, debe primero señalarse que su existencia está condicionada por el poder de infiltración del suelo, y para que las partículas sean arrastradas deben tener cierto tamaño, en lo que influye fundamentalmente la composición granulométrica y las propiedades físico-químicas del suelo.

b. el relieve: La erosión hídrica acelerada, prácticamente no existe en las zonas llanas, siendo posible únicamente en suelos de pendiente suficiente, donde la percusión de las gotas de lluvia y la acción del flujo superficial llegan a ejercer efectos considerables.

Cuando el terreno es más o menos horizontal, el desplazamiento de las partículas de tierra por el impacto de las gotas se hace en todos los sentidos, existiendo así una compensación mutua. Por el contrario, si el terreno es inclinado predominarán los desplazamientos hacia las partes más bajas. La influencia del relieve en la acción del escurrido encierra una mayor importancia. La potencia erosiva del flujo superficial y su capacidad de transporte depende de la densidad de las aguas y de la velocidad con que éstas se mueven. A su vez la velocidad es mayor cuanto más grande sean la altura del flujo y el grado de pendiente del terreno.

La longitud de la pendiente es también un determinante de gran significado en los fenómenos erosivos. Su influencia aparece manifiesta al considerar que cada zona de una ladera está sometida a la escorrentía de zonas de mayor altitud, y que la altura del flujo en cada punto debe ser mayor a medida que aumenta su distancia a la cumbre, y por consiguiente es de esperar que en las zonas bajas los fenómenos erosivos revestirán mayor intensidad.

De esto se deduce que los desplazamientos de tierra en las laderas, por unidad de superficie, deben ser mayores cuanto mayores sean la inclinación y la longitud de la pendiente.

c. la vegetación: La influencia de la vegetación en el fenómeno de la erosión obedece a diferentes causas:

- i. Protege el suelo de la percusión de las gotas de agua
- ii. Aumenta el poder de infiltración del suelo, disminuyendo el volumen de agua de escorrentía

- iii. En las zonas boscosas los troncos y ramas caídas obstaculizan el escurrimiento reduciendo su velocidad hasta su cuarta parte. Esto significa que la energía erosiva se reduce enormemente respecto de la que resultaría en terreno desnudo.
- iv. Brinda mayor consistencia del suelo a consecuencia del entrelazamiento de las raíces. Esta consecuencia afecta a mayor o menor profundidad, según sea la naturaleza de la vegetación: pequeña cuando se trate de hierbas y mucho mayor cuando se trata de árboles o arbustos.

De lo anterior se deduce que en las zonas forestales con cierta densidad de cubierta vegetal, se reduce el fenómeno de la erosión al mínimo.

El mecanismo mencionado en síntesis consiste: primero en una disgregación de los elementos terrosos y, luego en un transporte de las partículas individualizadas, por las aguas que corren en la superficie del suelo.

Esta es la manifestación más frecuente de erosión hídrica aunque existen otras formas no tan generalizadas y que obedecen a mecanismos distintos. A veces la actuación de las aguas crea condiciones propicias en el suelo para que éste se desplace por la acción de la gravedad, como en el caso de los desplazamientos en masa.

La acción del agua en estos casos es diversa. La saturación del suelo es una circunstancia favorable a los movimientos en masa. Cuando ello ocurre en suelos con pendiente y no sujetos por vegetación, es posible que por gravedad se originen movimientos de tierra, tanto en la superficie como en el interior. Estos últimos con las cavernas que generan pueden ir acompañados de hundimientos.

Otra circunstancia favorable ocurre cuando el agua alcanza a un horizonte de suelo apoyado en una capa impermeable. Esta se lubrica por acción de las aguas y si está en pendiente puede crear un desequilibrio en toda la zona del suelo situada por encima. Tal desequilibrio se ve favorecido por el hecho de que las raíces de las plantas no penetran esas capas impermeables, sin contribuir a sujetar impidiendo que se produzca el movimiento del suelo (24).

3.1.5 Metodologías utilizadas

3.1.5.1 El método racional

Este modelo hidrológico determinístico se usa ampliamente en nuestro medio, debido a su aparente simplicidad, aunque no siempre con buenos resultados, ya que pocos ingenieros entienden bien el significado de cada uno de los parámetros involucrados en la expresión (1).

Los efectos de la lluvia y del tamaño de la cuenca son considerados en la expresión explícitamente; otros procesos son considerados implícitamente en el tiempo de concentración y el coeficiente de escorrentía. El almacenamiento temporal y las variaciones espaciotemporales de la lluvia no son tenidos en cuenta. Debido a esto, el método debe dar buenos resultados, solo en cuencas pequeñas no mayores de 50 km².

Método desarrollado en el año de 1889, pero por su sencillez todavía se sigue utilizando. La hipótesis fundamental de esta fórmula es de que una lluvia constante y uniforme que cae sobre la cuenca de estudio, producirá un gasto de descarga el cual alcanza su valor máximo cuando todos los puntos de la cuenca esta contribuyendo al mismo tiempo en el punto de diseño (1).

La hipótesis se satisface para un lapso de tiempo, denominado tiempo de concentración t_c , definido como el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo o de estudio.

Las limitaciones más importantes que tiene esta metodología son:

- 1) Proporciona solamente un caudal pico, no el hidrograma de creciente.
- 2) Asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación (si duplica la precipitación, la escorrentía se duplica también). En la realidad, esto no es cierto, pues la escorrentía depende también de otros factores, tales como precipitaciones antecedentes, condiciones de humedad del suelo, etc.
- 3) Asume que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos, lo que no es cierto. La precipitación es filtrada por la cuenca para producir escorrentía, y ese filtro no es lineal. La transformación de precipitación en escorrentía se ve afectada por las características de la cuenca, el estado de la cuenca al momento de la lluvia y otros factores. Precipitaciones, por ejemplo, con períodos de retorno pequeños pueden producir caudales con períodos de retorno mayores, debido a las condiciones de humedad de la cuenca en el momento en que ocurra la tormenta (1).

La fórmula del Método Racional incluye los siguientes supuestos:

- a. El valor máximo de escurrimiento para una intensidad particular de lluvia, ocurre si la duración de la lluvia es igual o mayor que el tiempo de concentración.
- b. El tiempo de concentración se define como el tiempo requerido para que corra el agua desde el punto más alejado de la cuenca, hasta el punto de descarga del caudal
- c. El valor máximo de escurrimiento para una intensidad específica de lluvia, la cual tiene una duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es directamente proporcional a la intensidad de la lluvia.
- d. La frecuencia de la ocurrencia de la descarga máxima, es la misma que la de la intensidad de la lluvia con la cual se calculó
- e. La descarga máxima por área unitaria disminuye conforme aumenta el área de drenaje y la intensidad de la lluvia disminuye conforme aumenta la duración.

En la fórmula racional, la estimación del coeficiente de escorrentía es la mayor fuente de incertidumbre. Los valores de este coeficiente se obtienen normalmente de tablas. En realidad, el coeficiente de escorrentía depende en gran medida de las condiciones de humedad antecedente de la cuenca, que a su vez dependen de las tormentas ocurridas antes. Una interpretación probabilística del método racional fue hecha en 1936 por Horner y Flynt; en ella los coeficientes de escorrentía variaban con el período de retorno de la tormenta.

El gasto pico o máximo se define con la expresión:

$$Q_p = 0.278 CiA$$

Donde:

Q_p = gasto máximo (m^3/s)

C = coeficiente de escurrimiento

i = intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (mm/h)

A = área de la cuenca drenada (Km^2)

3.1.5.1.1 Secuencia de aplicación del método racional

A. Estimación del tiempo de concentración (tc)

Ahora bien, existen varios métodos para estimar el tiempo de concentración en las superficies naturales (tc), para lo cual se utilizaron las siguientes formulas (1):

Según Kirpich:

$$tc = 0.0078 (L^{0.77} / S^{0.38})$$

Según Bransby Williams:

$$tc = 21.3 (L/1610)(1/A^{0.1} S^{0.2})$$

Donde:

tc = tiempo de concentración sobre la superficie natural (min)

L = Longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce principal (m/m)

Según Chow:

$$tc = 0.01 (L / (S)^{0.5})^{0.64}$$

donde:

tc = tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce (%)

B. Evaluación del coeficiente de escurrimiento

Tradicionalmente, se ha determinado con el auxilio de valores estimados para diferentes tipos de áreas por drenar, con el auxilio de tablas (ver cuadros 1 y 2). Si la cuenca de estudio esta integrada por diferentes tipos de superficie, se calcula un coeficiente de escurrimiento promedio.

C. Estimación de la intensidad de la lluvia (i)

La intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y asociada al periodo de retorno de diseño, se puede estimar con alguno de los métodos descritos, métodos probabilísticos o de regresión lineal múltiple.

D. Determinación del gasto pico o máximo

Definidas las magnitudes de las variables involucradas en la fórmula racional, se procede a calcular el gasto pico o máximo con la ecuación del método racional.

Cuadro 1. Valores de coeficientes de escorrentía (C)

Tipo de área	Coefficiente "C"
Residencial	
Áreas unifamiliares	0.30 - 0.50
Unidades múltiples separadas	0.40 - 0.60
Unidades múltiples conectadas	0.60 - 0.75
Áreas departamentales	0.50 - 0.70
Techos	0.75 - 0.95
Casa habitacion	0.50 - 0.70
Comercial	
Centro de la Ciudad	0.70 - 0.95
Fuera del centro de l ciudad	0.50 - 0.70
Techos	0.75 - 0.95
Cementerios y parques	0.10 - 0.25
Campos de juego	0.20 - 0.35
Pacios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20 - 0.40
Zonas suburbanas	0.1 - 0.30
Industrial	
Ligera	0.50 - 0.80
Pesada	0.60 - 0.90
Techos	0.75 - 0.95
Calles	
Asfalto	0.70 - 0.95
Concreto	0.80 - 0.95
Adoquín	0.70 - 0.75
Aceras y andadores	0.75 - 0.85
Terracerías	0.25 - .060
Parques, jardines y prados	
Suelo arenoso plano < 2 %	0.05 - 0.10
Suelo arenoso pendiente de 2 a 7 %	0.10 - 0.15
Suelo arenoso pendiente de 7% o mayor	0.15 - 0.20
Suelo arcilloso plano < 0 = a 2%	0.13 - 0.17
Suelo arcilloso pendiente de 2 a 7 %	0.18 - 0.22
Suelo arcilloso pendiente de 7 % o mayor	0.25 - 0.35
Áreas no urbanizadas	0.10 - 0.30
Áreas Agrícolas	
Planas arcillosas cultivadas	0.5
Planas arcillosas bosque	0.4
Planas arenosas cultivadas	0.2
Planas arenosas bosque	0.1
Colinas arcillosas cultivadas	0.5
Colinas arcillosas bosque	0.4
Colinas arenosas cultivadas	0.4
Colinas arenosas bosque	0.3

Tomado de: Fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, Editorial Limusa. p.p 183

Cuadro 2. Valores del coeficiente C de la escorrentía

Topografía y vegetación	Textura del suelo		
	Arenosa	Franca	Arcillosa
Bosques			
Llano, 0-5% de pendiente	0,10	0,30	0,40
Ondulado, 5-10% de pendiente	0,25	0,35	0,50
Montañoso, 10-30% de pendiente	0,30	0,50	0,60
Pastizales			
Llanos	0,10	0,30	0,40
Ondulados	0,16	0,36	0,55
Montañosos	0,22	0,42	0,60
Tierras cultivadas			
Llanas	0,30	0,50	0,60
Onduladas	0,40	0,60	0,70
Montañosas	0,52	0,72	0,82
Zonas urbanas	30% impermeable	50% impermeable	70% impermeable
Llanas	0,40	0,55	0,65
Onduladas	0,50	0,65	0,80

Tomado de: Hudson. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía (en línea). Italia (Boletín de Suelos de la FAO - 68). FAO.

3.1.5.2 Método del USSCS (Curva Número)

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, USSCS, desarrolló un método, denominado número de curva de escorrentía CN, para calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. En este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación, y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1-100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográfica: (1) tipo de suelo hidrológico, (2) utilización y tratamiento del suelo, (3) condiciones de la superficie del terreno, y (4) condición de humedad antecedente del suelo (1).

El método del número de curva de escorrentía fue desarrollado basado en datos de precipitación y escorrentía de 24 horas. Esto mismo limita el cálculo de la profundidad de escorrentía, y no toma explícitamente en consideración las variaciones temporales de intensidad de lluvia. La distribución temporal de precipitación puede ser introducida en una etapa posterior, durante la generación del hidrograma de escorrentía.

Cuando los datos de precipitación y escorrentía acumuladas de larga duración y alta densidad sobre pequeñas cuencas de drenaje son plotados, ellos muestran que la escorrentía solamente empieza después de que alguna precipitación se ha acumulado, y que las curvas se aproximan asintóticamente a una línea recta con una pendiente de 45 grados. El método del Número de Curva esta basado en estos dos fenómenos. La acumulación inicial de la precipitación representa intercepción, almacenamiento en depresiones, e infiltración antes del inicio de la escorrentía y es llamado abstracción inicial. Después que la escorrentía ha iniciado, alguna de la lluvia adicional se pierde, principalmente en la forma de infiltración; esta es llamada retención real. Con precipitaciones crecientes, la retención real también incrementa un valor máximo: la retención potencial máxima real (1).

Para describir esta curva matemáticamente, SCS asume que el índice de retención potencial máxima real fue igual al índice de la escorrentía real o escorrentía potencial máxima, lo ultimo es lluvia menos abstracción inicial. En forma matemática, esta relación empírica es:

$$F/S = Q/P - I_a \quad (1)$$

Donde:

F = retención actual en mm

S = retención potencial máxima en mm

Q = Profundidad acumulada de la escorrentía en mm

P = Profundidad acumulada de la precipitación en mm

I_a = Abstracción inicial en mm

Después de que la escorrentía ha iniciado, toda la lluvia adicional llega a ser escorrentía o retención real (la retención real es la diferencia entre la lluvia menos la abstracción inicial y escorrentía)

$$F = P - I_a - Q \quad (2)$$

Combinando las ecuaciones 1 y 2, y resolviendo para Q se encuentra

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S) \quad (3)$$

La cual es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método del SCS. Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad (4)$$

Con base en esto la ecuación resultante es:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (5)$$

La ecuación 5 es la relación de precipitación – escorrentía usada en el método del Número de Curva. Esto permite la estimación de la profundidad de la escorrentía a partir de la profundidad de lluvia, dando el valor de la retención máxima potencial de S. Esta retención potencial máxima representa principalmente la infiltración que ocurre después que la escorrentía ha ocurrido. Esta infiltración es controlada por el índice de transmisión en el perfil del suelo o por la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil, cualquiera que sea el factor limitante.

La retención potencial máxima S ha sido convertida al método del Numero de Curva CN en orden de efectuar operaciones de interpolación, promedio y ponderación lo mas lineal posible. Esa relación es:

$$CN = 25400 / (254 + S)$$

$$S = (25400 / CN) - 254 \quad (6)$$

3.1.5.2.1 Estimación del número de Curva de Escurrimiento CN

El CN es un parámetro adimensional e indica las características de la respuesta de escorrentía de una cuenca de drenaje. En el método de Número de Curva, este parámetro es relacionado con el uso de la tierra, practicas de tratamiento, condiciones hidrológicas, grupo hidrológico de suelos, y condiciones antecedentes de la humedad del suelo en la cuenca de drenaje (13, 26).

Los complejos de cubierta hidrológica del suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial, y las condiciones de humedad antecedente. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una cuenca hidrográfica. El grupo hidrológico de suelos describe el tipo de suelo.

El uso tratamiento del suelo describe el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca hidrográfica para aumentar o impedir la escorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una media de la cantidad almacenada por la cuenca (13, 26).

A. Clasificación hidrológica de los suelos

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planteamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos "desnudos", luego de un humedecimiento prolongado que son consideradas para estimar la tasa mínima de infiltración son: profundidad del nivel freático en época de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego de un humedecimiento prolongado, y la profundidad hasta el estrato de permeabilidad muy lenta. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente (13, 26).

Los suelos han sido clasificados en cuatro A, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

- a. (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien ó excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
- b. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasa de transmisión de agua moderada.
- c. (moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).
- d. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente, suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o

álcali, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lenta.

B. Uso y tratamiento del suelo

El efecto de la condición superficial sobre la cuenca hidrográfica se evalúa por medio de las clases de tratamiento y uso del suelo. El uso del suelo pertenece a la cobertura de la cuenca, incluyendo todo tipo de vegetación, humus vegetal, tierras en descanso (suelo limpio), así como usos no agrícolas, como superficies de agua (lagos, ciénegas y otras) superficies impermeables (camino, techos, etc.) y áreas urbanas. El tratamiento del suelo se aplica principalmente a los usos agrícolas del suelo y éste incluye prácticas mecánicas, como perfilado de curvas de nivel o terraceo y prácticas de manejo, como control de pastoreo y rotación de cultivos. Una clase de tratamiento/uso es la combinación frecuentemente encontrada en una cuenca hidrográfica (13, 26).

El método del número de curva de escorrentía distingue entre suelos cultivados, prado y bosques. Para suelos cultivados, identifica los siguientes usos y tratamientos del suelo. Tierras en descanso, prados, cultivos de hilera, cultivos de granos, vegetales sembrados cercanamente, rotaciones (de pobre a buena), cultivos en hileras rectas, campos sembrados a lo largo de curvas de nivel, y cultivos terraceados.

C. Condición hidrológica

Los prados son evaluados con una condición hidrológica de pasto natural. El porcentaje del área cubierta con pasto natural y la intensidad de pastoreo son estimados visualmente. Una condición hidrológica pobre corresponde a menos del 50% de área cubierta y alta intensidad de pastoreo. Una condición hidrológica aceptable corresponde al 50 a 75 por ciento del área cubierta y media intensidad de pastoreo. Una condición hidrológica buena corresponde a más del 75 por ciento del área cubierta y ligera intensidad de pastoreo (13, 26).

Los bosques son pequeñas arboledas aisladas o árboles que han sido sembrados para fincas o para usar en granjas. La condición hidrológica para los bosques se determina visualmente como sigue: 1) pobre- densamente pastado o bosques regularmente quemados, con pocos arbustos y muy pequeña cantidad de humus vegetal, 2) aceptable- con pastos pero no quemados, con algunos arbustos y moderada cantidad de

humus vegetal, 3) buena- protegidos con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie (13, 26).

D. Condición de humedad antecedente

El método del número de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta, según se presenta en el cuadro 3. La condición de humedad antecedente seca (AMC I) tiene el menor potencial de escorrentía con los suelos estando lo suficientemente secos para un arado satisfactorio o para que una siembra se lleve a cabo. La condición de humedad antecedente promedio (AMCII) tiene un potencial de escorrentía promedio. La condición de humedad antecedente húmeda (AMCIII) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la cuenca hidrográfica prácticamente saturada de precipitaciones anteriores. La condición de humedad antecedente puede ser determinada a partir de la información del cuadro 3 (13, 26).

E. Estimando el valor de CN

Para determinar el valor apropiado de CN, varias tablas pueden utilizarse. Primeramente, hay tablas que relacionan el valor de CN al uso de la tierra o cobertura, prácticas de manejo, condiciones hidrológicas, y grupos hidrológicos de suelos, como se muestra en los cuadros 4, 5 y 6. Estas cuatro categorías juntas, son llamadas el complejo hidrológico de suelo – cobertura (13, 26).

La relación entre el valor CN y las diversas coberturas de suelo del complejo hidrológico suelo -cobertura son usualmente dadas por condiciones promedio (condiciones antecedentes de suelos clase II). Posteriormente se utiliza la información del cuadro 7, para convertir el valor de CN cuando sobre la base de los datos de 5 días de lluvia antecedente la condición de humedad antecedente debe ser clasificada como clase I o III.

Cuadro 3. Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente

Condición de humedad antecedente (AMC)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (cm)
I	0 – 3.30
II	3.50 – 5.25
III	más de 5.25

Nota: este cuadro fue desarrollado utilizando datos del occidente de los Estados Unidos. Por consiguiente, se recomienda tener cautela al emplear los valores suministrados en este cuadro para determinar la condición de humedad antecedente en otras regiones geográficas o climáticas. La precipitación acumulada de los cinco días previos al evento en consideración es para épocas de crecimiento de las plantas.

Tomado de: Fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, Editorial Limusa. p.p 183

Cuadro 4. Número de curva de escorrentía para áreas urbanas¹

Tipo de cobertura y condición hidrológica	% Promedio de área impermeables ²	Número de curva para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida)					
Espacios abiertos (prados parques, campos de golf, cementerios, etc.) ³					
Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto)		68	79	86	89
Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto)		49	69	79	84
Condición buena (más del 75% cubierto de pasto)		39	61	74	80
Áreas impermeables					
Parqueadores pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Calles y caminos					
Pavimentados		98	98	98	98
Pavimentadas ; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)		83	89	92	93
Grava (incluyendo derecho de vía)		76	85	89	91
Tierra (incluyendo derecho de vía)		72	82	87	89
Áreas desiertas urbanas occidentales:					
Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ⁴		63	77	85	88
Paisajes desérticos artificiales (barrera impermeable de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg. de diámetro; cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas).		96	96	96	96
Áreas urbanas:		89	92	94	95
Comercial y de negocios	85	81	88	91	93
Industrial	72				
Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote		77	85	90	92
1/8 de acre o menos	65	61	75	83	87
1/4 acre	38	57	72	81	86
1/3 acre	30	54	70	80	85
1/2 acre	25	51	68	79	84
1 acre	20	46	65	77	82
2 acre	12				
Áreas urbanas desarrolladas					
Áreas recientemente conformadas (solamente áreas permeables sin vegetación)		77	86	91	94

- ¹ Promedio de la condición de humedad antecedente $AMC II e I_a = 0.2S$
- ² El porcentaje promedio de área impermeable muestreada fue empleado para desarrollar el conjunto CNs. Otras suposiciones son las siguientes: áreas impermeables están directamente conectadas con el sistema de drenaje, áreas impermeables tienen un CN = 98, y áreas permeables son consideradas equivalentes a espacios abiertos con una condición hidrológica buena.
- ³ CNs mostrados son equivalentes a aquellos pastos. CNs compuestos pueden ser calculados para otras combinaciones de tipo de cobertura de espacios abiertos.
- ⁴ los CNs de áreas permeables se suponen equivalentes a arbustos de desierto con una condición hidrológica pobre.

Cuadro 5. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas

Uso de la tierra	COBERTURA Tratamiento ó practica	Condición Hidrológica	GRUPO DE SUELOS			
			A	B	C	D
	Número de Curva					
Rastrojo	Hileras rectas	-	77	86	91	94
Cultivo en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80
Pastos de pastoreo	Hileras rectas	Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
		Regular	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Pastos de corte	Hileras rectas	Buena	30	58	71	78
Bosque	Hileras rectas	Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Patios	Hileras rectas	Buena	59	74	82	86
Caminos de tierra ²	Hileras rectas	Buena	72	82	87	89
Pavimentos	Hileras rectas	Buena	71	84	90	92

- ¹ siembra tupida al voleo
- ² incluyendo derecho de vía

Tomado de: Fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, Editorial Limusa. p.p 183

Cuadro 6. Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas¹

Descripción y tipo de cobertura	Condición hidrológica	Número de curvas para grupos de suelos hidrológicos			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo ²	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segado para heno		30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla, con la maleza como principal elemento ³	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ⁴	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁵	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques ⁶	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes		59	74	82	86

- ¹ Condición de humedad antecedente promedio AMC II e I_a 0.2S
- ² Mala: menos del 50% del uso del suelo cubierto con pastoreo intensivo sin maleza.
- Regular: 50 a 75% del suelo cubierto y un pastoreo no muy intensivo.
- Buena: más del 75% del suelo cubierto y un pastoreo ocasional a ligero.
- ³ Mala: menos del 50% del suelo cubierto.
- Regular: 50 a 75% de suelo cubierto.
- Buena: más del 75% del suelo cubierto.
- ⁴ Número de curva actual menor a 30. emplear CN = 30 para cálculos de escorrentía
- ⁵ Los CNs mostrados se calcularon para áreas con 50% bosques y 50% cubiertas por pastos. otras combinaciones pueden ser calculadas de CNs para bosques y pastos.
- ⁶ Mala: Humus vegetal, pequeños árboles y maleza destruida por pastoreo intensivo y quemas regulares.
- Regular: Bosques con pastoreo pero no quemados, suelo cubierto por humus vegetal.
- Buena: bosques protegidos del pastoreo y el suelo cubierto adecuadamente por humus vegetal.

Tomado de: Fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, Editorial Limusa. p.p 183

Cuadro 7. Números de curva de escorrentía correspondientes a tres condiciones de AMC

AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
100	100	100	60	40	78
99	97	100	59	39	77
98	94	99	58	38	76
97	91	99	57	37	75
96	89	99	56	36	75
95	87	98	55	35	74
94	85	98	54	34	73
93	83	98	53	33	72
92	81	97	52	32	71
91	80	97	51	31	70
90	78	96	50	31	70
89	76	96	49	30	69
88	75	95	48	29	68
87	73	95	47	28	67
86	72	94	46	27	66
85	70	94	45	26	65
84	68	93	44	25	64
83	67	93	43	25	63
82	66	92	42	24	62
81	64	92	41	23	61
80	63	91	40	22	60
79	62	91	39	21	59
78	60	90	38	21	58
77	59	89	37	20	57
76	58	89	36	19	56
75	57	88	35	18	55
74	55	88	34	18	54
73	54	87	33	17	53
72	53	86	32	16	52
71	52	86	31	16	51
70	51	85	30	15	50
69	50	84			
68	48	84	25	12	43
67	47	83	20	9	37
66	46	82	15	6	30
65	45	82	10	4	22
64	44	81	5	2	13
63	43	80	0	0	0
62	42	79			
61	41	78			

Tomado de: Fundamentos de Hidrología de superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. México. 2001, Editorial Limusa. p.p 183

3.1.5.3 Formula empírica de Mac Math

Se recomienda el uso de fórmulas empíricas en el caso de que no sea posible hacer cualquier otra estimación por alguno de los métodos aquí descritos. La fórmula de Mac Math Calcula el caudal máximo o caudal pico de escorrentía utilizando la expresión:

$$Q = 0.0091 * C * I * A^{0.8} * S^{0.2}$$

Donde:

Q = Caudal máximo con un periodo de retorno de t años (m³/s)

C = Factor de escorrentía de Mac Math, representa las características de la cuenca

$$C = C1 + C2 + C3$$

Donde:

C1 = Coeficiente de cobertura (ver cuadro 8)

C2 = Coeficiente de textura (ver cuadro 8)

C3 = Coeficiente de Pendiente (ver cuadro 8)

I = intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración tc, y un periodo de retorno de t años (mm/h)

A = área de la cuenca (has.)

S = Pendiente media del cauce principal (m/km)

Cuadro 8. Coeficientes para formula de Mac Math, para cálculo de escorrentía

C1 (% de cobertura)		C2 (Tipo de textura)		C3 (% Pendiente)	
< 20 %	0.30	Arenoso	0.08	0 - 0.2	0.04
20 - 50 %	0.22	Franco Arenoso	0.12	0.2 - 0.5	0.06
50 - 70 %	0.16	Franco	0.16	0.5 - 2	0.08
70 - 90 %	0.12	Franco Arcilloso	0.22	2 - 5	0.10
90 - 100 %	0.08	Rocoso	0.30	5 - 10	0.15

Tomado de: Manual de usuario de HidroEsta (38)

3.2. Marco Referencial

3.2.1 Localización del área de estudio

Las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, forman parte de la subcuenca del río Villalobos la que a su vez forma parte de la subcuenca del Lago de Amatitlán, que constituye la parte alta de la cuenca del Río María Linda, la cual se encuentra en la vertiente del Océano Pacífico. Geográficamente se ubica en la hoja topográfica escala 1:50,000 Ciudad de Guatemala, (2959-I), se ubica en las coordenadas UTM de 750000 m a 761000 m Este y de 1609000 m a 1617000 m Norte; y en coordenadas geográficas de 14°33'19" a 14°37'23" de latitud Norte y 90°34'21" a 90°40'00" de longitud Oeste (ver Figura 1) (8).

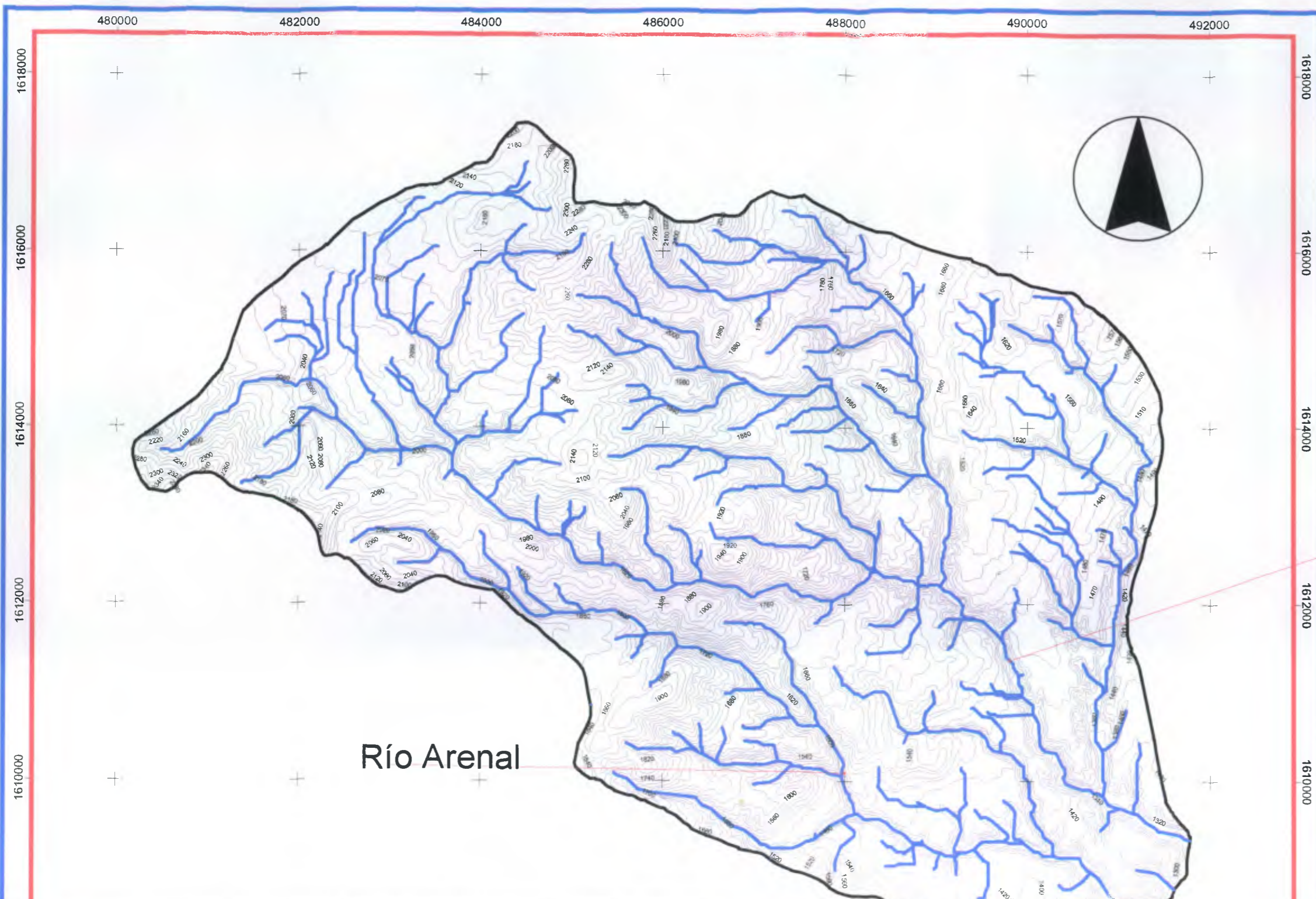
El lago Amatitlán se encuentra ubicado en el Departamento de Guatemala, a sólo 25 km de la capital, rodeado de los Municipios de Villanueva, Villa Canales, San Miguel Petapa y Amatitlán, y a él fluye el río Villalobos. Está situado a una altura de 1,188 metros sobre el nivel del mar (8).

La microcuenca del río San Lucas tiene un área aproximada de 44.75 km², mientras que la microcuenca del río Arenal tiene un área aproximada de 16.87 km², lo cual en total hacen un área 61.62 km² aproximadamente para el área de estudio. Esto constituye aproximadamente el 15% del área de la subcuenca del Lago de Amatitlán (8).

3.2.2 Hidrografía


El área de estudio esta constituido por las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, las cuales desembocan en el río Villalobos. En la figura 2, se observa la red hidrográfica de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal.

La densidad de drenaje es de 2.53 km de drenaje por cada km² de cuenca en el caso de la microcuenca del río San Lucas y de 4.44 km de drenaje por cada km² de cuenca en el caso de la microcuenca del río Arenal, suponiendo mejores características de drenaje en caso del la microcuenca del río Arenal que en las del río San Lucas. Debido a la baja densidad de drenaje se puede determinar que el agua es lentamente evacuada del área de influencia, lo cual puede provocar un proceso de erosión laminar si se conjuga con bajas capacidades de infiltración de los suelos (8).



LEYENDA

 Corrientes Principales

 Curvas de Nivel
cada 20 metros.

 Perimetro del
área de estudio

Río San Lucas

Río Arenal



3.2.3 Relieve

Las pendientes de los cauces son de aproximadamente 12% de pendiente máxima, el punto mas alto del cauce dentro de la cuenca es de 2200 m.s.n.m. y el punto de aforo se ubica a aproximadamente 1350 m.s.n.m. En Figura 2, se observa la topografía de la cuenca.

Mientras que las pendientes medias de la cuenca están arriba del 16%. En la microcuenca San Lucas, presentan en las laderas de los cauces terrenos con pendientes de 50 a 60% mientras que las áreas con pendientes de 0-8 % se pueden localizar al este y oeste de la microcuenca, además existen terrenos con pendientes intermedias que se localizan en la parte central de la microcuenca. El Arenal es la microcuenca donde el 46.18 % de su área se encuentran en terrenos con pendientes que van de 40-60 %, los cuales forman las laderas del cauce, el 44.74 % de su área se encuentra ocupada por terrenos que poseen pendientes que van de 0-20 % en estos los que tienen una inclinación de 0-8% son los que aportan mayor área y se pueden localizar al centro y oeste de las microcuencas (8).

3.2.4 Geología

La orografía y morfología del Valle de Guatemala es resultado de deformaciones causadas por agentes naturales de meteorización (destrucción de rocas) y erosión sobre depósitos volcánicos, sedimentos y cuerpos plutónicos (rocas profundas) existentes antes del vulcanismo.

El valle esta limitado al oeste por la falla de Mixco, que va desde San Juan Sacatepequez hasta el borde oeste del Lago de Amatitlán. Al norte los límites están dados por bloques levantados de calizas cretácicas delimitadas por rocas intrusivas y metamórficas del Paleozoico (8).

En la cuenca se distinguen dos unidades geológicas:

- a. Depósitos volcánicos del cuaternario
- b. Lavas volcánicas del terciario

Siendo de mayor importancia los depósitos volcánicos del cuaternario (Qp), incluyendo rellenos y cubiertas gruesas de cenizas volcánicas tipo pómez de origen diverso. La microcuenca del Río San Lucas posee el 70% de su área constituido por sedimentos eólicos de cenizas de origen volcánicos, al igual que la microcuenca del río Arenal (8).

3.2.5 Suelos

Los suelos de las microcuencas han sido desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medias a excepción de las partes altas de las microcuencas las cuales se han desarrollados sobre cenizas volcánicas pero a elevaciones altas retrabajadas o retransportadas. Los suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medias son poco profundos, de textura franca y franca arcillosa hasta los 30 cm luego son de texturas franco arcillosas de color café oscuro o café amarillento ligeramente ácidos, que promedian hasta un metro de profundidad (8).

Los suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones altas, son de color café, pseudo alpinos, de textura franca a franco arcillosa para las capas superficiales siendo ligeramente ácidos y de un espesor que varia de 25 a 50 cms, las capas inferiores son de color café rojizo que llegan a mas de un metro de profundidad.

De acuerdo a la clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala realizada por el Dr. Simmons (1954), y como se observa en la figura 3, indica que los suelos de las microcuencas corresponden a las siguientes series de suelos (8).

A. *Suelos de la Altiplanicie Central*

Se caracterizan por pendientes escarpadas con pequeñas áreas de suelo casi planos o valles ondulados. Se han desarrollado sobre ceniza volcánica pomáceas débilmente cementada en su mayoría son poco profundos, no se adaptan para la producción de cultivos limpios intensivos dentro de este grupo se encuentran dos subgrupos, como lo son los suelos Guatemala y Cauqué.

B. *Suelos Guatemala (Gt)*

Son suelos profundos, bien drenados, desarrollados sobre ceniza volcánica débilmente cementadas, en un clima húmedo y seco. Ocupan un relieve que es casi plano, con algunas partes onduladas o suavemente onduladas.

Los suelos Guatemala están asociados con los suelos Cauqué, pero se distinguen de éstos porque se encuentran en planicies y los otros, en relieve de ondulado a inclinado. Además, porque los suelos Guatemala son más profundos que Cauqué.

En las microcuencas se encuentra también una variación de los suelos Guatemala, que son los suelos Guatemala en pendiente que se representan con el símbolo Gt, con las mismas características que los suelos Guatemala pero ubicados en pendientes (8).

El suelo superficial es de color café muy oscuro, con textura franco arcillosa, consistencia friable y espesor de 30 a 50 centímetros. El subsuelo es de color café rojizo, con textura arcillosa, consistencia friable y espesor de 50 a 100 cms (8).

C. Suelos Cauque (Cq)

Son suelos profundos bien drenados, desarrollados en un clima húmedo seco sobre ceniza volcánica pomácea firme y gruesa. Ocupan relieves de ondulados a inclinados, con altitudes de 1500 metros. Están asociados a los suelos Guatemala, pero ocupan un relieve más ondulado que éstos y no son de textura tan pesada.

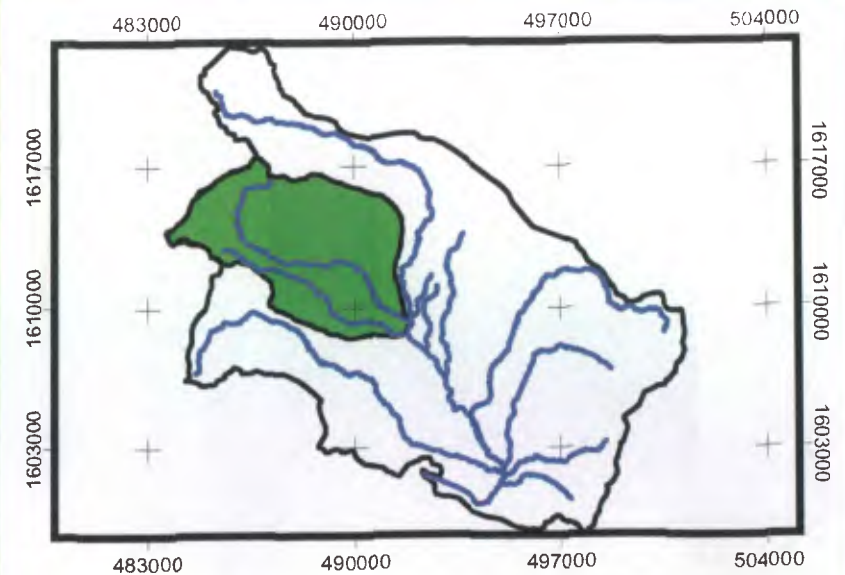
El suelo superficial es de color café muy oscuro, con textura franca, consistencia friable y espesor entre 20 y 40 cms. El subsuelo es de color café amarillento oscuro, con textura franco arcillosa, consistencia friable y espesor aproximado de 60 a 70 cms.

D. Suelos Aluviales (SA)

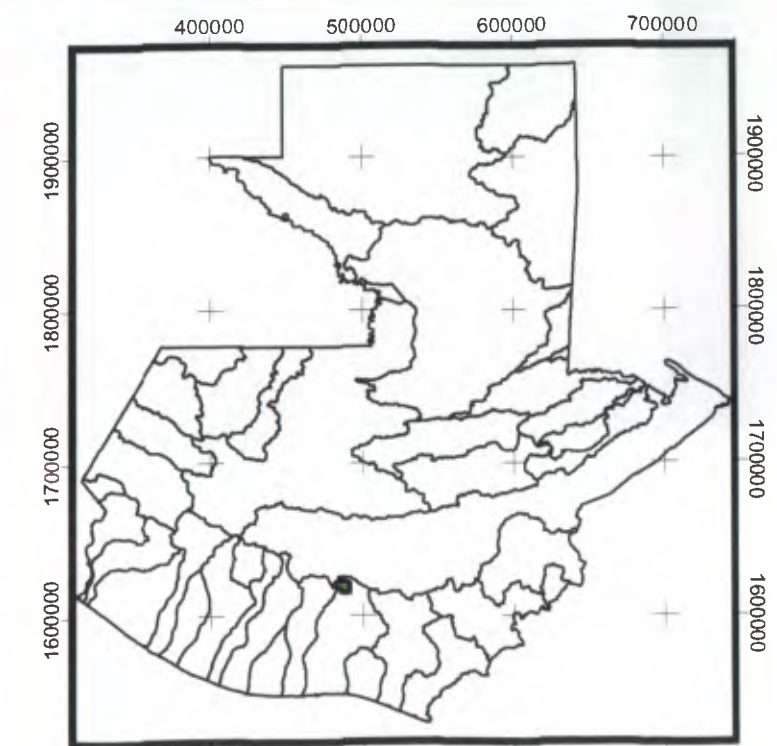
Dentro de ellos se encuentran agrupados suelos aluviales jóvenes de diferentes características. Áreas de magnitudes variables, discontinúas, se encuentran a lo largo de arroyos. En muchos lugares están bien drenados con arenas de reacción neutra a alcalina moderadamente oscura. En otras están pobremente drenados, pesados y oscuros.

E. Áreas Fragosas (AF)

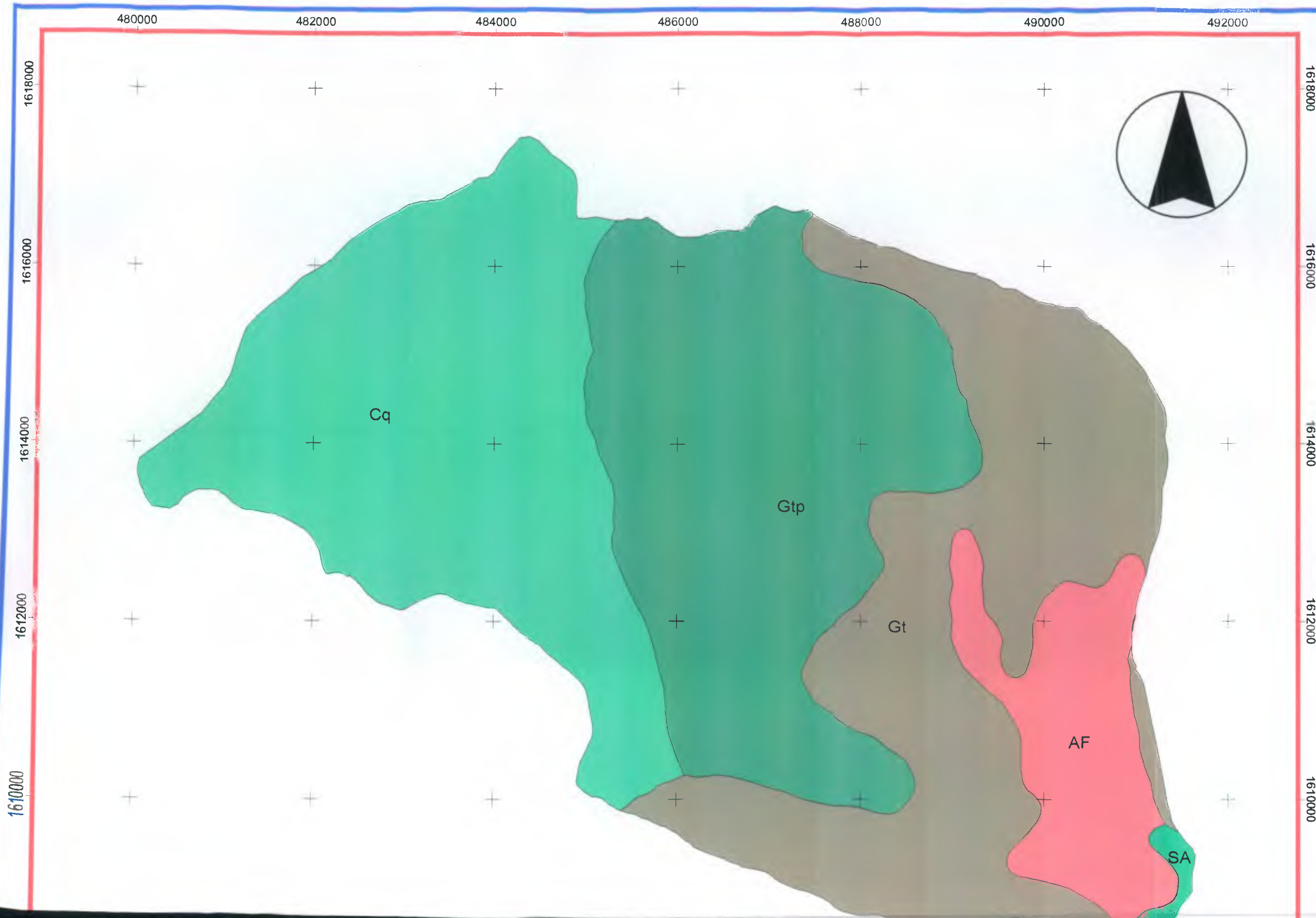
Las áreas fragosas corresponden a una buena parte de las microcuencas y no tienen características bien definidas y son zonas de transición entre los suelos Guatemala y Cauque. Las características por lo tanto son una combinación de los dos tipos de suelos y además se encuentran localizados en la parte media de las microcuencas donde se dan los cambios de pendiente más significativos (8).



CUENCA RÍO VILLALOBOS



CUENCAS PRINCIPALES



LEYENDA

- AF Areas Fragasas
- Cq Cauqué
- Gt Guatemala
- Gtp Guatemala fase pendiente
- SA Suelos Aluviales

SERIE	ÁREA Has.	%
AF	551.8	8.95
Cq	1960.1	31.81
Gt	1745.3	28.32
Gtp	1874.8	30.43
SA	30.1	0.49
TOTAL	6162.1	100.00



3.2.6 Fisiografía

La región fisiográfica donde se encuentran las microcuencas corresponde a las tierras altas volcánicas. La fisiografía local de las microcuencas en general presenta cauces de ríos altamente erosionados, lo cual da lugar a taludes de cauces con pendientes pronunciadas uniformes, lo cual genera planicies altas dentro de las microcuencas principalmente en la del río San Lucas circundadas por barrancos que alcanzan en algunos lugares mas de 100 metros de profundidad (8).

3.2.7 Clima

Los parámetros climáticos de esta área se encuentran monitoreadas principalmente por dos estaciones meteorológicas de las cuales se encuentran registros en el INSIVUMEH siendo ellas la Estación INSIVUMEH ubicada en la Zona 13 de la Ciudad Capital y la estación Suiza Contenta ubicada en San Lucas Sacatepequez. A continuación en los cuadros 9 y 10 se presentan los parámetros climáticos registrados en las estaciones mencionadas (23).

Cuadro 9. Registros climáticos de la estación Observatorio Central, INSIVUMEH

ESTACION INSIVUMEH (OBSERVATORIO CENTRAL), Años de registro 1992 - 2005													
ALTITUD 1502 m.s.n.m.													
UBICACION 14 Grados 35 Minutos 11 Segundos Latitud Norte y 90 Grados 31 Minutos 58 Segundos Longitud Oeste													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Temperatura Media (°C)	17.73	18.73	19.82	21.03	20.98	20.08	20.10	20.02	19.47	19.49	18.57	17.96	19.41
Humedad Relativa (%)	75.69	74.15	74.08	75.31	67.77	83.38	81.00	82.15	85.62	83.46	81.85	77.92	79.19
Lluvia (mm)	3.35	6.05	4.38	31.52	108.48	249.48	168.05	179.43	222.29	128.28	64.42	7.55	1173.28
Evapotranspiración (mm)	90.35	96.56	115.10	105.40	94.15	73.38	80.31	76.15	64.90	67.85	74.25	69.56	1007.97

Fuente: INSIVUMEH, 2006

Cuadro 10. Registros climáticos de la estación Suiza Contenta, San Lucas Sacatepequez

ESTACION SUIZA CONTENTA, SAN LUCAS SACATEPEQUEZ, Años de registro 1992 - 2005													
ALTITUD 2105 m.s.n.m.													
UBICACION 14 Grados 37 Minutos 08 Segundos Latitud Norte y 90 Grados 39 Minutos 40 Segundos Longitud Oeste													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Lluvia (mm)	4.21	3.50	19.21	24.51	112.55	294.44	235.79	262.05	211.03	132.20	54.29	4.53	1358.30
Temperatura Media (°C)	17.90	20.33	20.90	21.66	19.98	19.12	19.20	19.48	18.30	17.10	16.43	17.93	19.12
Evapotranspiración (mm)	57.35	52.70	63.55	58.13	57.35	45.73	52.70	41.08	55.03	47.28	61.23	61.23	653.33

Fuente: INSIVUMEH, 2006

3.1.1 Población

La población asentada en las microcuencas, pertenece a los municipios de San Lucas Sacatepéquez, Mixco y Villanueva. De forma general, en el norte se encuentra la población perteneciente a Mixco, en el noroeste se encuentra la población de San Lucas Sacatepéquez y en el sur la población perteneciente al municipio de Villa Nueva (21).

Los principales centros poblados que se encuentran en el área son: Ciudad Satélite, El Campanero, El Aguacate, Pinares de San Cristóbal, Balcones de San Cristóbal, Lo de Coy, Hamburgo, La Libertad, Labor de Castilla, Valle Dorado, San Lucas Sacatepéquez, Choacorrál, La Embaulada, Zorzoya, Los Alpes, San José, Chicaman, Granjas Swiss, Villas de Sevilla, El Calvario, El Gran Mirador, Roldán, San José de Villa Nueva, Villalobos, Residenciales Villa Lobos, La Selva (21).

Según información del Instituto Nacional de Estadística –INE –, recopilada en los censos de población de los años 1994 y 2002, la población dentro de las microcuencas alcanza los 31,895 habitantes para el año 1994 y un total de 53,799 habitantes para el año 2002. De esta manera se observa un crecimiento de 21,904 personas para el área en un lapso de 8 años. Esto representa un incremento de 68.68% de la población para este periodo (21).

Este fenómeno de crecimiento demográfico es el reflejo de lo que sucede en toda la región metropolitana, que corresponde al departamento de Guatemala en su conjunto, el cual ha tenido históricamente tasas de crecimiento poblacional por encima de las presentadas en el resto del país (21).

Para calcular la población de la cuenca para el año de 1966 por ejemplo, se pueden utilizar las tasas de crecimiento reportadas para los periodos anteriores, las cuales son: de 1964 a 1973, tasa de 3.51%; de 1973 a 1981, tasa de 2.1 %; de 1981 a 1994, tasa de 2.5%. Realizando los descuentos a la población reportada para el año 1994 que es de 31895 personas, tenemos que la población para el año 1966 era de 14,900 personas aproximadamente. Al comparar la población estimada para el año 1966 (14,900 personas), con la población para el año 2002 (53,799 personas) tenemos un aumento del 261% (21).

3.2.9 Antecedentes

Un hecho histórico que marcó un rumbo decadente para el área fue el traslado de la capital, en 1776, a su actual enclave. Esto dio origen a una irracional explosión demográfica, con el consiguiente desorden en la utilización de los recursos: deforestación, mala utilización del suelo con fines agrícolas, distribución desordenada en el régimen de tenencia de la tierra e instalación dentro de la cuenca que desemboca en el lago de más de 700 industrias de diversa índole, sin plantas de tratamiento funcionando (22).

Se ha deforestado el 45% de los bosques originales y los restantes se encuentran en estado de explotación y deterioro, provocando problemas de erosión, sedimentación y disminución en la recarga de acuíferos. Como resultado, el lago ha perdido cada año cerca de 4,000 metros cuadrados de superficie y su profundidad ha disminuido progresivamente. De no adoptarse medidas urgentes, se prevé que en unos 20 años el lago podría transformarse en un pantano (22).

El huracán Mitch hizo su aparición en los últimos días del mes de Octubre de 1998, intensificando sus lluvias en los días 1 y 2 de Noviembre, con la consiguiente sobresaturación del suelo y la formación de grandes aludes de tierra, lodo y árboles, que cayeron a los cauces de los ríos (22).

3.2.9.1 Usos del suelo

Los municipios de la periferia de la ciudad de Guatemala han soportado un crecimiento urbano incontrolado, y a diferencia del crecimiento de la capital, la ocupación del espacio no vino acompañada de la extensión de las redes de abastecimiento de agua y alcantarillado. En los municipios conurbanos con la Ciudad de Guatemala (situada al norte y aguas arriba de la Cuenca del Lago de Amatitlán), los nuevos desarrollos habitacionales se dispersan en islas urbanas con ubicaciones definidas por los urbanizadores y por las condiciones geomorfológicas (existencia de barrancos profundos que drenan hacia la red de ríos y crean discontinuidades difíciles de salvar para la red sanitaria) y son forzadas a resolver de forma semi-autónoma sus necesidades de servicios básicos (agua, alcantarillado, tratamiento) e infraestructura urbana (2).

La extracción incontrolada de materiales de construcción de los ríos, principalmente en la zona baja del río Villalobos, está ocasionando problemas severos de estabilidad en las laderas de los mismos, incrementando la carga de sedimentos en las aguas y puede potencialmente afectar zonas habitadas al generar procesos de erosión remontante hacia las partes altas del río. Asimismo, el proceso de urbanización acelerado ha ocasionado que áreas de suelos frágiles, particularmente en zonas de barrancos con pendientes muy elevadas

hayan sido desprovistas de su cobertura boscosa originando procesos erosivos acelerados, alimentados en parte también por la disposición inadecuada de aguas residuales en las partes altas (2).

Alta concentración de población en el área, alta explotación de los Recursos Naturales, escasez de agua; todo esto es parte de un triste proceso: El deterioro del lago de Amatitlán y sus Cuencas tributarias, que hoy está en camino de ser una pérdida inminente como recurso y como patrimonio nacional (2).

El lago de Amatitlán, es uno de los lagos con mayor historia en el mundo. En sus alrededores se encuentran vestigios arqueológicos que datan desde el año 2,000 A.C. de sus profundidades se han rescatado piezas de gran valor histórico, elaboradas en jade, hueso y arcilla (2).

Estudios realizados por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán - AMSA-, una institución del Gobierno, confirman que en el año 1,800 el lago tenía una profundidad promedio de 33 metros; para el año 1,996 esa profundidad se redujo a 18 m. y para el 2,016, si no se toman acciones para rescatarlo será un pantano de 7.5 metros (2).

Un dato alarmante, es que el río Villalobos arrastra alrededor de 500 mil toneladas de sedimentos al lago, lo cual hace que pierda 70 cms de profundidad cada año (2).

Las causas del proceso de degradación del lago de Amatitlán son tanto industriales, como demográficas y geográficas. Una de ellas es el llamado asolvamiento, ocasionado por la erosión y que provoca una pérdida en la capacidad de retención del agua (2).

El deterioro nutritivo en el lago se debe principalmente al crecimiento demográfico de la ciudad de Guatemala y de otros municipios vecinos; a la explotación indiscriminada de agua y al crecimiento industrial (2).

3.2.9.2 Cuencas Hidrográficas y desastres naturales

La pérdida de vidas humanas y los daños a la infraestructura ocasionados por el Mitch en algunos países de la región, pasados los 100 días de emergencia y rehabilitación, conducen a reflexionar sobre qué medidas hubiesen podido prevenir, reducir y contrarrestar los efectos negativos ocasionados por este fenómeno natural. Las posibilidades prácticas de integrar medidas de gestión ambiental para prevenir, mitigar y

compensar los impactos negativos de los desastres naturales, sobre todo los de origen hídrico, caen dentro de lo que se conoce como el manejo integral de las cuencas hidrográficas (4).

Las características biofísicas y socioeconómicas de las cuencas hidrográficas permiten analizar los aspectos ambientales relacionados con las causas que originan el agravamiento de los daños ocasionados por desastres naturales, como el reciente Mitch. El manejo inadecuado de la tierra, en áreas vulnerables de importancia para la captación y regulación del agua, es de gran relevancia en las cuencas hidrográficas de la región. Los recursos naturales de la cuenca proveen otros servicios ambientales, como captura de carbono y biodiversidad. Sin embargo, aprovechar todos los servicios requiere avanzar hacia la gestión integrada de cuencas, ordenamiento del uso del suelo, reducción de la pobreza de la población (4).

La planificación de los recursos hídricos se realiza a nivel de cuenca hidrográfica debido a que lo que llueve en ésta área y escurre superficialmente se concentra y tiene un punto de salida en la red hidrográfica. En otras palabras el buen o mal manejo de las actividades productivas dentro de una cuenca repercute aguas abajo de donde se llevan a cabo dichas acciones (4).

Entre las características biofísicas relevantes a evaluar para predecir los posibles efectos de un fenómeno natural como el Mitch están: Los tipos de material parental (geología), suelos y pendientes. Estas condiciones, conjuntamente con la cantidad e intensidad de las precipitaciones y el uso actual del suelo contribuyen al proceso de erosión, transporte y sedimentación de sólidos. Los efectos se agravan cuando se presentan fenómenos naturales como el Mitch y hay un manejo inadecuado del suelo. Es decir, la incompatibilidad entre la capacidad de uso y el uso actual de la tierra favorece los procesos de erosión, con sus consecuentes efectos negativos sobre el ambiente y la infraestructura (4).

Una cuenca que tenga un alto porcentaje de su área con pendientes altas o que su capacidad de uso de la tierra sea para conservación, y que un alto porcentaje de ésta cuenca no tenga cobertura vegetal, se infiere que ante un evento extremo, como el Mitch, los procesos de erosión, transporte y sedimentación serán mayores a los promedios, con las consecuencias conocidas (asolvamiento de sistemas de agua para abastecimiento de consumo humano y riego, daños a la infraestructura vial, etc.) (4).

Las actividades productivas y la construcción y mantenimiento de la infraestructura de servicios, incluyendo la vial, derivadas de la intervención humana de no tomar en cuenta las características biofísicas de las cuencas, puede contribuir a agravar el efecto de los desastres naturales (4).

En Prensa Libre (6), del 21 de noviembre del 2004 se publicó el artículo “Los responsables de salvar el lago se encuentran en emergencia; están impulsando la canalización del río Villalobos para que no le lleve más basura”. Donde se manifiesta que en los próximos cinco años, Guatemala podría quedarse sin el lago de Amatitlán. Ese es el pronóstico fatal del director de la Estación Acuática de la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Amatitlán (AMSA), Jorge Chacón. La tarea más fuerte la esperan con la entrada en ejecución del denominado Megaproyecto, cuyo trabajo pretende llevar a cabo la canalización de todo el río Villalobos para que sus desechos no lleguen al lago. Esto incluye la instalación de desarenadores, trampas para basura y puentes protegidos, así como la adecuación de áreas protegidas y deportivas en las riveras del río, lo cual tendría un costo aproximado de Q232 millones. Ese trabajo se lleva cabo debido a que más de un millón 500 mil toneladas de sedimentos llegan anualmente al lago, a través del río Villalobos, lo que hace que pierda cerca de 70 centímetros de profundidad en ese mismo período. Estudios de la AMSA señalan que Amatitlán está sometido a una muerte lenta por el asolvamiento provocado por la explotación minera irracional de la zona, aparte del crecimiento desordenado de poblaciones de la cuenca y por la deforestación descontrolada. En la cuenca del lago (381 km²) hay más de 2.5 millones de habitantes, provenientes del departamento de Guatemala”.

Desborde de río Villalobos fue noticia el 07 de julio del 2003, cuando toneladas de lodo arrasaron con vehículos y autobuses en el Km. 12 de la carretera al Pacífico. La noticia menciona que a causa de las fuertes lluvias, el caos volvió a varios puntos de la capital, lo que provocó congestionamientos en accesos a la metrópoli. Tras el desborde del río Villalobos, Villa Nueva fue el área más afectada. A partir de las 14 horas, comenzó a tejerse en la ruta al Pacífico lo que pudo haber sido una tragedia. Entre los kilómetros 12 y 13, en Villa Nueva, el río Villalobos se desbordó. Afortunadamente, decenas de personas que fueron atrapadas en viviendas y vehículos resultaron ilesos o con lesiones leves (6).

El 14 de junio del 2000 en Prensa Libre se publicó la noticia “Los aguaceros, generados por una onda tropical, provocaron problemas”. El río se creció, y la correntada alimentada por lodo y arena, se llevó a su paso todo lo que encontró, desde basura hasta automóviles. Según reportaron los Bomberos Voluntarios, 15 viviendas se inundaron, y 30 vehículos y cuatro buses extraurbanos. Por si fuera poco, varios automóviles quedaron soterrados debajo del lodo y la basura. Una a una, todas las personas pudieron ser evacuadas. Los pasajeros de las camionetas atrapadas fueron “liberados” con ayuda de escaleras. A primeras horas de la tarde, el panorama era desolador. “Hay una gran suciedad. Hay más de 150 metros de basura acumulada, arena y árboles”, dijo el arquitecto Salvador Hernández, de la comuna de Villa Nueva. Largas colas de

vehículos que habían quedado varados al ingreso a la capital por la ruta al Pacífico retornaron por Antigua y San Miguel Petapa. Otros esperaron impacientes el restablecimiento del paso. Los carriles, que usualmente son de ingreso a la ciudad, empezaron a funcionar: uno para entrar a la capital y el otro de salida. “Se está habilitando un carril de norte a sur, y otro de sur a norte. La maquinaria va a estar toda la noche, esperamos que a primeras hora de la mañana esté solucionado el problema”, señaló Sergio Cabañas, oficial nacional de coordinación de Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, (Conred). En coordinación, la Policía Municipal de Tránsito (PMT) y la Policía Nacional Civil guiaban y controlaban el flujo vehicular” (6).

Según el Perfil Ambiental para Guatemala, publicado por la Universidad Rafael Landívar (37), se puede afirmar que los mantos acuíferos del Valle de la Ciudad de Guatemala están siendo explotados con un incremento en el nivel de profundidad de 1 a 2 metros anuales, en algunos lugares se han reportado caídas del nivel de hasta 10 metros. Esto está causado por la tasa alta de urbanización de las zonas de recarga, que restringe las zonas de infiltración y por la falta de regulación en la perforación de pozos; en promedio los acuíferos descienden 1.18 metros por año.

Monzón (27), en su estudio “Dinámica de cobertura forestal y urbana 1990-2001 en la región metropolitana del departamento de Guatemala, menciona que “El crecimiento poblacional en la ciudad de Guatemala y sus alrededores se ha acelerado en las últimas décadas lo cual ha provocado un aumento en la cobertura de concreto y pérdida de las áreas verdes. En el periodo de 1988 al 2000 la ciudad capital ocupa más espacio para suelo urbano que el que se ocupó en los anteriores 224 años desde su fundación. Actualmente las áreas verdes se ubican en barrancos que están sirviendo como protectores ambientales al evitar erosiones y atraer lluvias. Según el estudio la región metropolitana aumento 60 km² de área urbana. En conclusión los municipios de Mixco y Villa Nueva y Guatemala son los que cuentan con mayor superficie de concreto, la cual ha aumentado en la última década. A la vez que recomienda realizar un estudio con fotografía aérea para confirmar dicha información que fue elaborada a partir de imágenes satelares”.

4. Objetivos

4.1 General

Determinar el impacto del cambio del uso del suelo en el comportamiento del ciclo hidrológico, en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal.

4.2 Específicos

- A. Comparar el comportamiento de los balances hídricos de suelos de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, en condiciones de uso a capacidad del suelo y en las condiciones existentes de uso del suelo para los años 1966 y 2006.

- B. Evaluar el impacto del cambio de uso y cobertura del suelo, en la magnitud de los caudales máximos de esorrentía para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, bajo condiciones de uso a capacidad del suelo y en las condiciones existentes de uso del suelo para los años 1966 y 2006

5. Metodología

El estudio se desarrolló a una escala de semidetalle (1:50,000), debido a que esta es la información cartográfica de más fácil acceso y manejo. Para cumplir con los objetivos propuestos en la presente investigación se utilizó la siguiente metodología:

Objetivo 1. Comparar el comportamiento de los balances hídricos de suelos de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, en condiciones de uso correcto del suelo y en las condiciones existentes de uso del suelo

Para realizar este análisis en primera instancia se establecieron los escenarios bajo los cuales se realizó la comparación y en este caso fueron:

1. Uso correcto (Capacidad de uso del suelo)
2. Uso actual del suelo (año 2006)
3. Uso anterior del suelo (año 1966)

Esto requirió lo siguiente:

5.1. Elaboración de escenarios

5.1.1 Determinación de la Capacidad de uso del suelo (escenario 1)

Para la capacidad de uso del suelo se utilizó la metodología del Instituto Nacional de Bosques (INAB), para la clasificación de tierras por Capacidad de Uso, la cual comprende de forma resumida lo siguiente:

5.1.1.1 Recopilación y análisis de información biofísica sobre el área

Se realizó con el fin de tener un conocimiento general del área. Interesaba conocer: localización geográfica, ubicación política, acceso, extensión, información relevante sobre clima y sus principales variables tales como: precipitación pluvial, temperatura, vientos y otras características del área como zonas de vida, formas de la tierra y origen de los suelos, clasificaciones existentes sobre el sitio.

5.1.1.2 Elaboración del mapa de unidades fisiográficas

Mediante técnicas de interpretación cartográfica, se definieron y delimitaron unidades de mapeo, las cuales constituyeron la base de muestreo en la fase de campo. La definición de estas unidades estuvo basada en una interpretación fisiográfica de las tierras, es decir, en un análisis del paisaje.

El análisis por el cual se definen las unidades de mapeo, tomó en cuenta los componentes de geología, clima, topografía, suelos, hidrografía.

5.1.1.3 Elaboración del mapa de pendientes

En este mapa se clasificaron las unidades por pendiente con base en el mapa cartográfico (curvas de nivel). Se elaboró en forma manual por separación visual y utilización de plantillas.

5.1.1.4 Verificación de los límites de las unidades de mapeo

Esta actividad se realizó por caminamientos, observaciones visuales y barrenamientos. Se llegó a homogenizar las distintas unidades de tierra con base en criterios fisiográficos, cuya base principal es el relieve.

5.1.1.5 Determinación de profundidades de suelos y factores modificadores

Sobre el mapa de unidades de tierra (unidades fisiográficas) y en boletas de campo, se anotaron las profundidades efectivas de los suelos de cada unidad cartográfica previamente delimitada en gabinete y verificada en campo. Adicionalmente en cada unidad se realizaron las anotaciones del nivel en que se manifiestan los factores modificadores (pedregosidad y drenaje).

La profundidad efectiva de suelos se medirá con barrenamientos y, en el caso de los factores modificadores (pedregosidad y drenaje), en función de la manifestación de los mismos se separaron, sobre el mapa de unidades fisiográficas, áreas limitantes que posteriormente se utilizaron en la asignación de categorías de capacidad de uso.

5.1.1.6 Integración del mapa de unidades de la tierra

El mapa base de unidades inicialmente fisiográficas, se convirtió en unidades cartográficas y con la información del factor profundidad del suelo, se convirtió en un mapa temático sobre profundidades de suelos. Esto implicó que algunas unidades tuvieron que unirse o bien desagregarse en otras.

Posteriormente, este mapa se sobrepuso en el mapa de pendientes, en este proceso se separaron nuevas unidades definidas por los límites de ambos mapas. Cada nueva unidad se caracteriza por un rango de pendiente y una clase de profundidad, según la región donde se ubica el sitio en estudio. A este mapa resultante se le denominó, para efectos del sistema adoptado por el INAB, mapa de unidades de tierra.

5.1.1.7 Elaboración del mapa de Capacidad de Uso

A cada unidad de tierra identificada en el mapa resultante del proceso anterior, con base en los niveles adoptados por cada factor limitante, se le asignó una categoría de capacidad de uso. Posteriormente, esta categoría se analizó a la luz de los factores modificadores pedregosidad y drenaje a efecto de determinar la categoría de capacidad de uso definitiva. El producto resultante fue el Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra. Finalmente, se siguieron los procedimientos técnicos normales de vaciado (rectificación fotogramétrica, reducción o ampliación, rotulación, otros) de la información generada al mapa base según la escala de publicación que el nivel del levantamiento semidetallado requiere. Se cuantificaron las extensiones de cada unidad de capacidad y se definieron los otros elementos que acompañan a un mapa temático (leyenda, orientación norte, escala, nombre del mapa temático, otros).

5.1.2 Mapa de uso actual del suelo (escenario 2)

Se elaboró un mapa preliminar de uso de la tierra, en términos de cobertura, utilizando para el efecto la leyenda de uso de la tierra propuesta por la Unión Geográfica Internacional (UGI), adecuada para el medio guatemalteco por el Ing. Agr. Gilberto Alvarado. Dicho mapa incluye las siguientes categorías: Centros urbanos o poblados, Tierras con cultivos (anuales o permanentes), Tierras con pastos (naturales o cultivados), Tierras con bosque (puro o mixto, de coníferas latifoliar), que son las categorías de interés para el estudio.

Como base para este mapa se utilizaron mosaicos de fotografías aéreas georreferenciadas en formato digital (ortofotos), con las cuales se delimitó el uso actual para luego verificarlo en el campo mediante caminamientos y observaciones posteriores.

5.1.3 Mapa de uso anterior del suelo (año 1966) (escenario 3)

Con la ayuda de un mapa de uso del año 1966, elaborado en formato papel para el área del río Villalobos, por el Instituto Geográfico Nacional, utilizando fotografía aérea, se logró separar el área de estudio y obtener la información del uso del suelo para esa época.

Luego de haber elaborado los mapas de Uso de la Tierra y Capacidad de uso de la tierra, estos servirán de base para la realización del balance hídrico de suelos, mediante el cual se separarán y analizarán los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

5.2 Balances hídricos de suelos

Se realizaron los balances hídricos de suelos para los tres escenarios que se identificaron anteriormente, que son:

Escenario 1. Capacidad de Uso de la Tierra (Uso Correcto)

Escenario 2. Uso actual del suelo (año 2006)

Escenario 3. Uso anterior del suelo (año 1966)

Los pasos generales para la realización de los balances hídricos de suelos fueron las siguientes:

5.2.1 Caracterización del clima

Utilizando las estaciones del INSIVUMEH, Suiza Contenta, ubicada en San Lucas, Sacatepéquez, y el Observatorio Central, ubicada en la Zona 13 de la Ciudad Capital, se analizaron básicamente los componentes de clima a utilizar en los balances hídricos de suelos tales como: Precipitación Pluvial mensual promedio, Precipitación efectiva mensual (con base en los coeficientes de escurrimiento), Evapotranspiración Potencial mensual promedio (esta se obtuvo a través de formulas empíricas basadas en la evaporación de tanque tipo "A").

5.2.2 Caracterización del suelo

Los datos que se obtuvieron del suelo son: constantes de humedad y densidad aparente. Se obtuvo una muestra compuesta por cada serie de suelos presente en el área para determinar su punto de marchites permanente y capacidad de campo y densidad aparente, con el objetivo de determinar el rango de agua disponible en el suelo.

5.2.3 Cálculo de balances hídricos de suelos

Utilizando los datos de clima, suelo y cobertura de cada una de las áreas identificadas en los tres escenarios se realizó un balance hídrico por cada unidad de mapeo, para lo cual se utilizó una hoja electrónica, para facilitar el cálculo.

Luego de tener los balances por cada una de las áreas se realizaron cuadros resúmenes que mostraran cual es la situación del balance en cada uno de los escenarios.

Objetivo 2. Evaluar el impacto del cambio de uso y cobertura del suelo, en la magnitud de los caudales máximos de escorrentía para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal

Un aspecto interesante a tener en cuenta en la dinámica del ciclo hidrológico y que es de gran interés en el presente estudio es la escorrentía y especialmente los caudales máximos de la misma, para la estimación de estos caudales máximos de escorrentía se procedió de la siguiente forma:

5.3. Estimación de los caudales máximos de escorrentía

Para este propósito se utilizaron 3 métodos o formulas empíricas, estos fueron elegidos en función de que son métodos que han sido diseñados para estos fines, con variables en el requerimiento de información, cada uno con sus ventajas y desventajas, por lo cual los datos obtenidos son estimaciones, por lo que se considera adecuado la utilización de ellos y al final presentar datos promedio, para su análisis.

Los métodos utilizados fueron:

5.3.1 Método Racional

Esta metodología se utilizó para calcular caudales máximos esperados en función de características de suelo y cobertura e intensidad de lluvia. Según este método el caudal pico o máximo se define con la expresión:

$$Q_p = 0.278 C_i A$$

Donde:

Q_p = gasto o caudal máximo (m^3/s)

C = coeficiente de escurrimiento;

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

A = es el área de la cuenca drenada, en km^2 .

La intensidad de lluvia se calculó para un periodo igual al tiempo de concentración de la cuenca, por lo se realizó una estimación del tiempo de concentración de la cuenca. Estos métodos de estimación se basan fundamentalmente en la pendiente y longitud del cauce principal, para obtener un dato promedio de tiempo de concentración se realizó el cálculo con ayuda de las formulas de Kirpich, Bransby Williams y de Chow, las cuales son ampliamente utilizadas y el dato final utilizado fue el promedio de los tres métodos.

La intensidad de lluvia se obtuvo de las ecuaciones correspondientes a las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (Curvas IDF), elaborados por el INSIVUMEH, dentro del estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala en el año 2002, en donde se incluye el análisis de la estación del observatorio central, la cual se tomó de base para el cálculo de la intensidad probable para la duración estimada de concentración de la cuenca y en diferentes períodos de tiempo o periodos de retorno.

Los coeficientes de escorrentía fueron obtenidos de valores de tabla y a la vez comprobados a través del software HidroEsta. (38)

5.3.2 Método Mac Math

Para este método se calcularon los coeficientes promedios para la cobertura, suelo y pendiente para cada uso de la tierra y se utilizaron las intensidades de lluvia para los periodos de retorno que se utilizaron en el método racional. Los coeficientes de escorrentía para este método toma en cuenta pendiente, cobertura y textura de suelos, como condiciones propias de la cuenca con influencia en la escorrentía y fue calculado a través de tablas y comparadas con valores obtenidos del software HidroEsta (38)

5.4 Estimación del volumen de escorrentía esperado

5.4.1. Método de USSCS o Curva Número

Para la utilización de este método se determinaron las características de cobertura y condición hidrológica de las áreas basadas en los tipos de suelo presentes en el área, con lo cual se estimó para cada área homogénea en condiciones de suelo y cobertura, el número de curva de escorrentía correspondiente, con la ayuda de tablas. Luego se estimó el número de curva promedio y se aplicaron las siguientes expresiones para calcular la lamina de escorrentía:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S), \quad S = (25400/CN) - 254$$

Donde

Q = Profundidad acumulada de la escorrentía en mm

S = retención potencial máxima en mm

P = Profundidad acumulada de la precipitación en mm

CN = Curva número en base a la situación del complejo suelo - cobertura

6 Resultados

Los resultados obtenidos son los siguientes:

6.1 Establecimiento de escenarios

Se determinaron los escenarios sobre los cuales se realizó el análisis del comportamiento siendo estos:

- a. Capacidad de uso
- b. Uso del año 1966
- c. Uso del año 2006

6.1.1 Capacidad de uso (Uso correcto)

La capacidad de uso del lugar comprende la mayoría de categorías de uso posibles según la metodología para clasificación de tierras por capacidad de uso del Instituto Nacional de Bosques, con excepción de los sistemas silvopastoriles, como se puede observar en la figura 4, que corresponde al mapa de capacidad de uso de la tierra de las microcuencas en estudio.

Las tierras forestales para producción con un 41%, es la principal categoría de uso en el área, situándose principalmente en la parte media y baja de la cuenca. Luego la categoría de uso de agricultura con cultivos anuales con un 38%, se sitúa en segundo lugar, encontrándose aptitud para esta categoría de uso en la parte norte de la cuenca principalmente.

Las otras categorías alcanzan aproximadamente el 21% del área únicamente, destacando entre ellas, la categoría de uso de agricultura con mejoras.

En resumen en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, un 47.43% del área tiene capacidad de uso para actividades forestales, mientras que el restante 52.57%, tiene capacidad para desarrollar actividades de cultivos agrícolas, desde agricultura limpia sin limitaciones, hasta agroforestería con cultivos permanentes.

6.1.2 Uso de la tierra del año 1966

Con la ayuda de un mapa de uso de la tierra elaborado por el Instituto Geográfico Nacional, para el área de la cuenca del río Villalobos con escala 1:50,000; con base en fotografías aéreas del año 1966, se obtuvo el mapa para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, como se puede observar en la figura 5.

Para el año 1966, el principal uso que se le daba al área en estudio era bosques con el 52.5% del área total, el detalle del mapa no permite precisar que tipo de bosque (disperso, ralo, denso, latifoliada, mixto, confiera, etc.), este uso se encontraba principalmente en la parte media de la cuenca. Los demás usos encontrados fueron ligados a actividades agrícolas entre los que destacan el Maíz y pastos con el 31.2% y en menor escala el café (1.42%), hortalizas (5.07%), y arbustos o matorrales de poco valor (1.30%).

Una característica importante del uso de la tierra para el año 1966, es que se encontraba un 8.5% del área total utilizada para centros poblados, los cuales se encontraban dispersos en todo el área, dentro de los cuales resalta la cabecera municipal de San Lucas Sacatepéquez.

6.1.3 Uso de la tierra del año 2006

Con la ayuda de mosaico de fotografías aéreas georeferenciadas, rectificadas y en formato digital (ortofotos), que se construyeron con fotografía aérea del año 2002 y mediante recorridos de campo para rectificar las áreas identificadas, se obtuvo el mapa de uso para el año 2006, como se puede observar en la figura 6.

Para el año 2006, el principal uso de la tierra para las cuencas de los ríos San Lucas y Arenal, es el uso en centros poblados o uso urbano con un 42.5% del área. Estos centros poblados son grupos de colonias que se han expandido principalmente desde los municipios de San Lucas Sacatepéquez, Mixco y Villa Nueva. Los bosques en el área tienen el segundo lugar en área con un 36.25%, dentro de este rubro destaca el bosque mixto denso de encino y pino, con un 22.76% del área de las microcuencas, y el bosque mixto disperso con el 8.55% del área; los otros tipos de bosques presentes son de coníferas denso (0.93%), latifoliado denso (2%) y latifoliado disperso (2.01%).

La agricultura está presente en el área, donde destacan las tierras para cultivos anuales con un 15.89% del área, y en menor escala la fruticultura (0.38%) y los pastos naturales no mejorados (0.30%). Un uso de la tierra que es importante mencionar son las extracciones de arena pómez que se realizan en el área las cuales

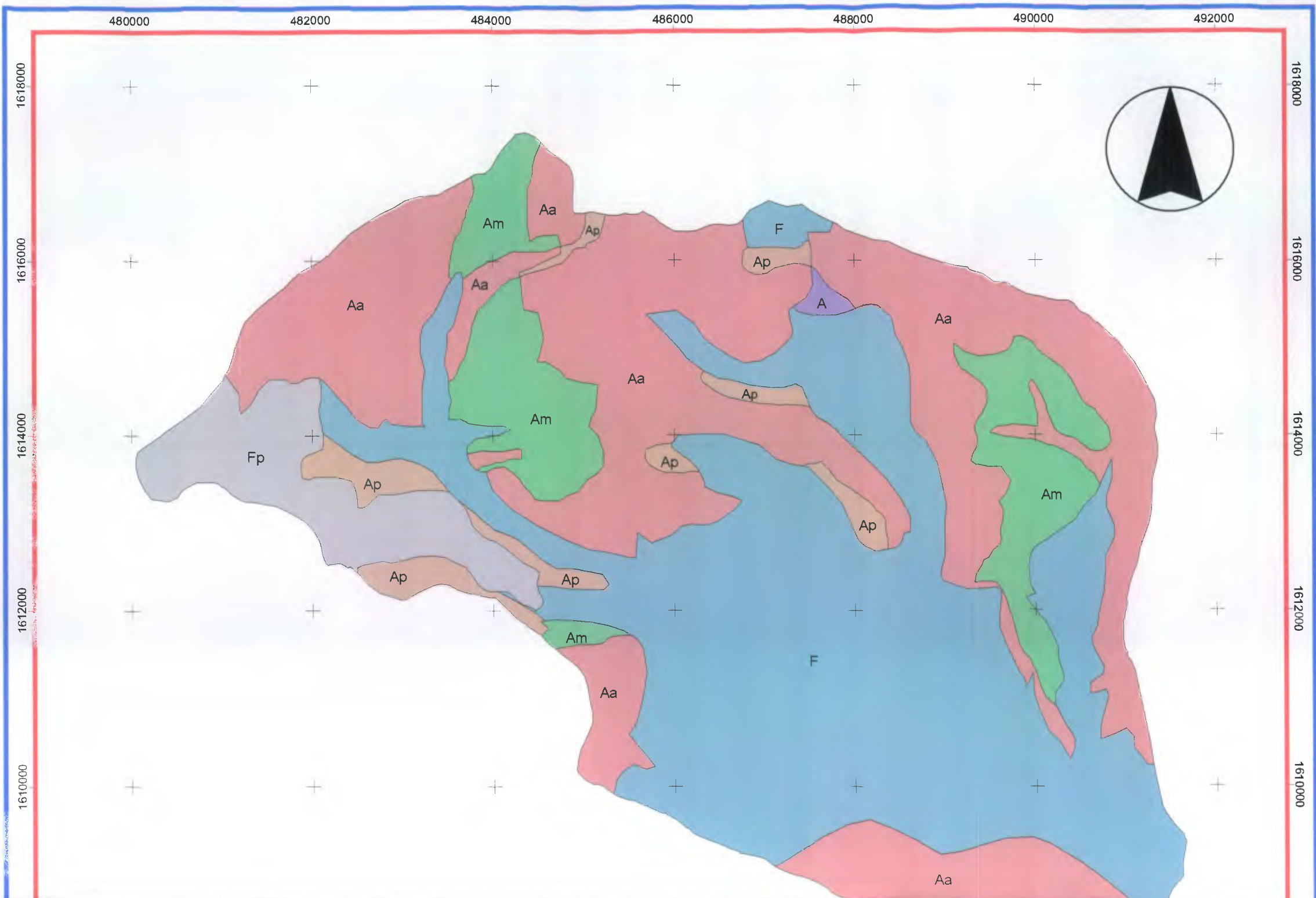
comprenden el 4.69% del área, situadas en la parte media-baja de las microcuencas. Estas áreas se consideran degradadas y con alto riesgo de erosión.

En el cuadro 11, se analizan los cambios de uso de la tierra de los años 1966 al 2006, encontrando que los cambios más interesantes en cuanto a la cobertura de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal son, de un cambio de uso hacia lo urbano (centros poblados), donde se encuentra un incremento al 34% del área urbanizada de las microcuencas. Otro cambio significativo en lo referente a la cobertura del área boscosa, la cual disminuyó en un 16.29% del área total. Las áreas destinadas a la agricultura disminuyeron en un 21.10% del área de las microcuencas.

Esto nos indica que los bosques y las tierras de cultivo han sido desplazados, para darle lugar a un proceso de urbanización en el área, ya que existe una alta correspondencia entre las áreas hacia donde se ha expandido la urbanización y una disminución de los usos antes mencionados.

Cuadro 11. Cambios del uso de la tierra en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, en el período 1966-2006.

Uso	Área de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal (%)		
	Año 1966	Año 2006	Cambio de uso
Bosques	52.54	36.25	-16.29
Agricultura	37.66	16.56	-21.10
Centros poblados	8.50	42.50	+34.00
Otros	1.30	4.69	+3.39

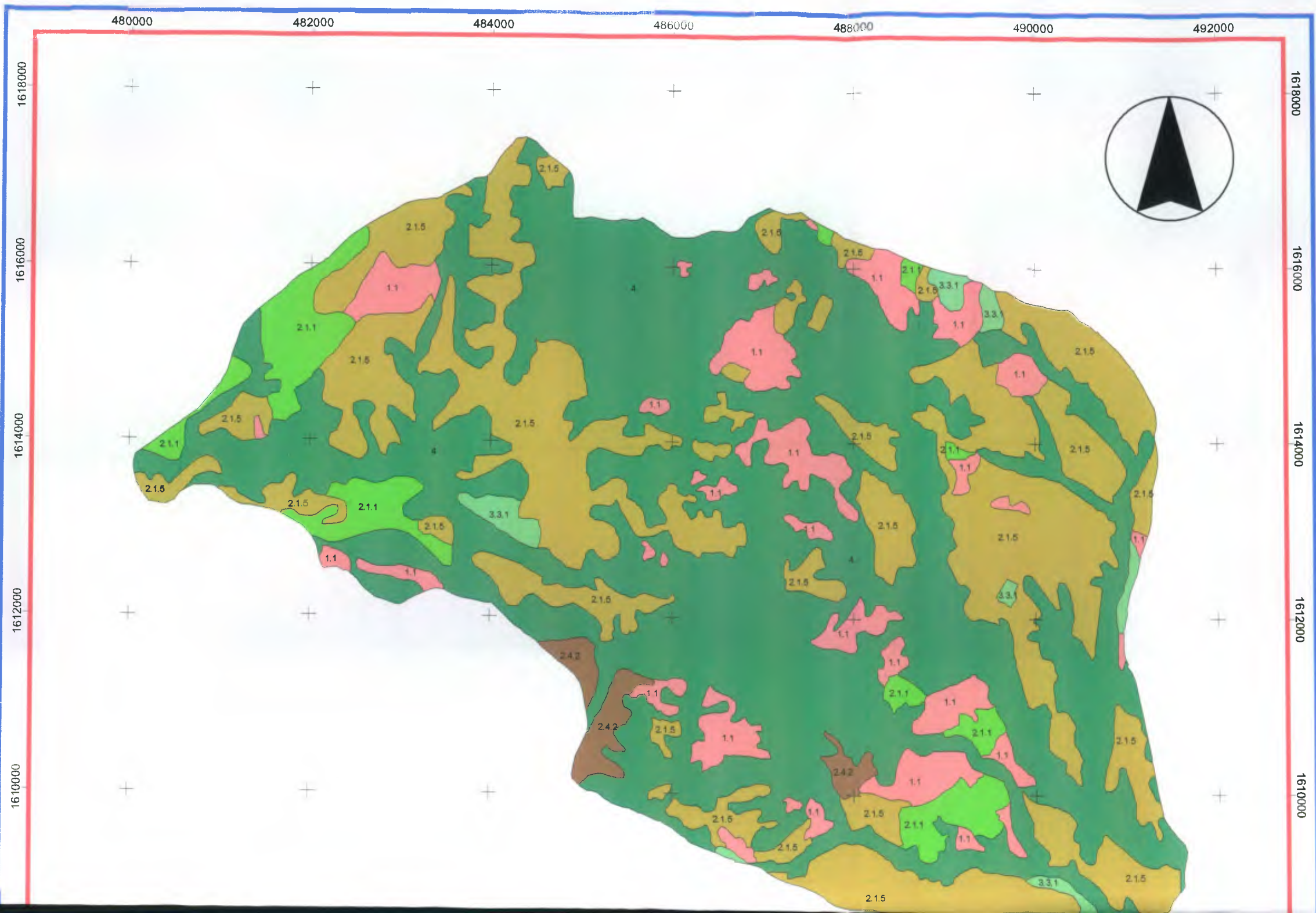


LEYENDA

- A** Agricultura sin limitaciones
- Aa** Agroforestería con cultivos Anuales
- Am** Agricultura con mejoras
- Ap** Agroforestería con cultivos permanentes
- F** Tierras forestales para producción
- Fp** Tierras forestales para protección

CATEGORÍA	ÁREA Has.	%
A	17.3	0.28
Aa	2345.7	38.07
Am	641.2	10.41
Ap	235.0	3.81
F	2526.7	41.00
Fp	396.2	6.43
TOTAL	6162.1	100.00



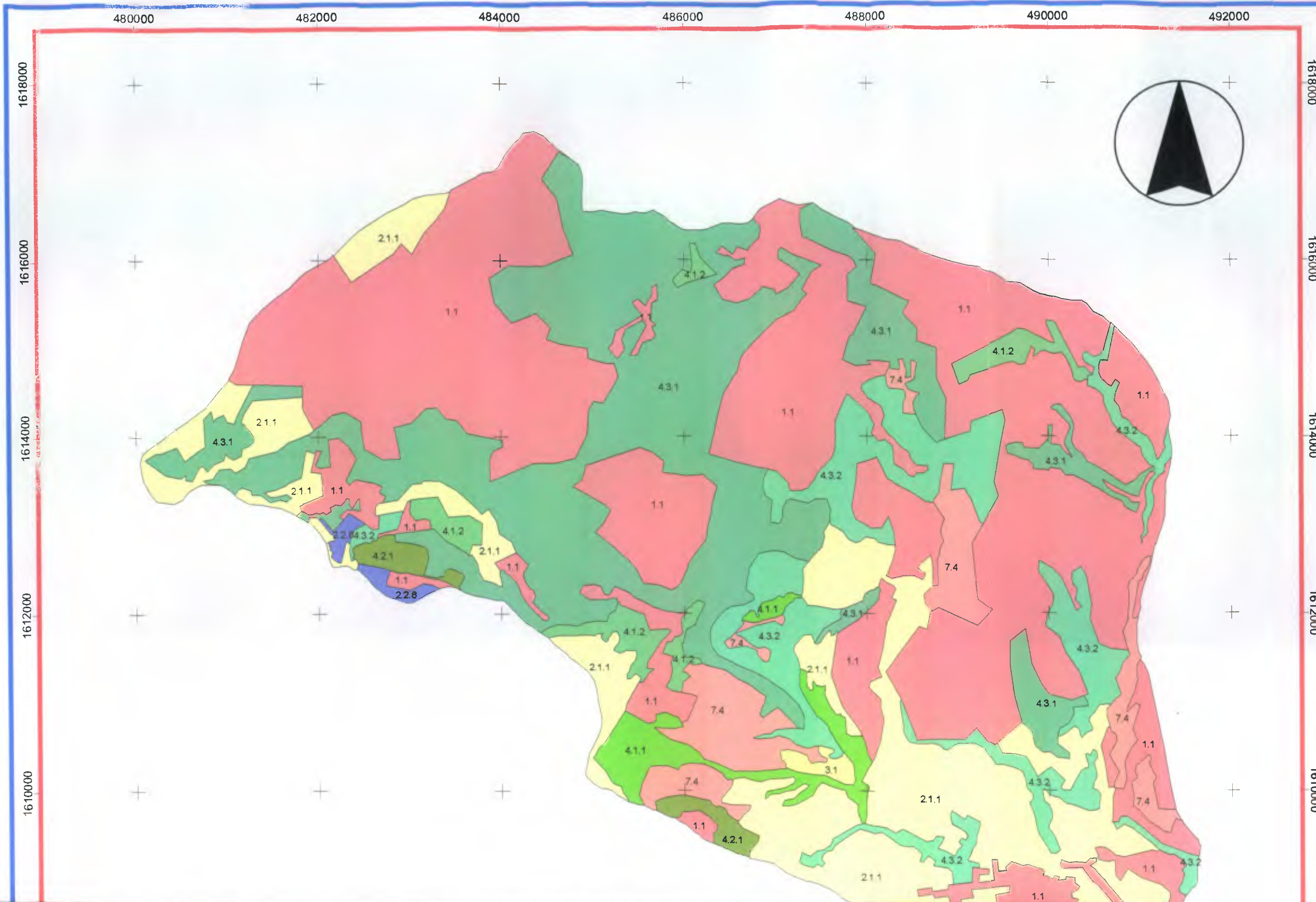


LEYENDA

- 2.1.1 Hortalizas
- 2.4.2 Café
- 2.1.5 Maíz y Pastos
- 1.1 Centros poblados
- 4 Bosques
- 3.3.1 Arbustos de poco valor

CLASE	ÁREA Has.	%
2.1.1	312.7	5.07
2.4.2	87.5	1.42
2.1.5	1920.6	31.17
1.1	523.8	8.50
4	3237.5	52.54
3.3.1	80.1	1.30
TOTAL	6162.1	100.00





LEYENDA

- 4.2.1 Bosque de coniferas denso
- 4.1.1 Bosque latifoliado denso
- 4.1.2 Bosque latifoliado disperso
- 4.3.1 Bosque mixto denso
- 4.3.2 Bosque mixto disperso
- 1.1 Centros poblados
- 2.2.6 Frutales de clima frio
- 3.1 Pastos naturales no mejorados
- 7.4 Superficie degradadas (Areneras)
- 2.1.1 Tierras con cultivos anuales

CATEGORÍA	ÁREA Has.	%
4.2.1	57.1	0.93
4.1.1	123.1	2.00
4.1.2	124.0	2.01
4.3.1	1402.2	22.76
4.3.2	527.1	8.55
1.1	2619.1	42.50
2.2.6	23.2	0.38
3.1	18.2	0.30
7.4	289.0	4.69
2.1.1	979.1	15.89
TOTAL	6162.1	100.00

6.2 Balances hídricos de suelos

A continuación se detallan y analizan los resultados de los balances hídricos de suelos para los 3 escenarios de uso de la tierra:

6.2.1 Balance hídrico de suelos en condiciones de capacidad de uso de la tierra

El resumen de los resultados del balance hídrico de suelos para las condiciones de capacidad de uso de la tierra se observa en el cuadro 12. Las láminas de recarga promedio son de 371.41 mm para las diferentes áreas, donde la agroforestería con cultivos permanentes aporta una lámina de 478.57 y las tierras forestales de producción 261.71. El caudal medio de la cuenca bajo estas condiciones debería de ser de 0.17 m³/s. Mientras, que la recarga potencial de las microcuencas bajo estas condiciones sería capaz de abastecer de agua a 235,000 personas (calculando un consumo per cápita de 0.2 m³/s y la utilización del 75% de la disponibilidad, aquí se incluyen los aprovechamientos a través de pozos o manantiales).

Cuadro 12. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Capacidad de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Categorías De Uso	Recarga Potencial (mm)	Escorrentía Superficial (mm)	Área (m ²)	Volumen Recarga Potencial (Mm ³)	% De Recarga Potencial	Caudal Potencial Recarga (m ³ /s)	Caudal Potencial De Escorrentía En (m ³ /s)
Agricultura Sin Limitaciones	396	182.17	173000	0.07	0.30	0.00	0.00
Agroforestería Con Cultivos Anuales	441.84	149.17	23457000	10.36	45.29	0.33	0.11
Agricultura Con Mejoras	444.65	125.86	6412000	2.85	12.46	0.09	0.03
Agroforestería Con Cultivos Permanentes	478.57	15.91	2350000	1.12	4.91	0.04	0.00
Tierras Forestales De Producción	261.71	34.92	25267000	6.61	28.89	0.21	0.03
Tierras Forestales De Protección	470.82	48.57	3962000	1.87	8.15	0.06	0.01
Totales	371.41	87.93	61621000	22.89	100.00	0.73	0.17

6.2.2 Balance hídrico de suelos bajo condiciones de uso de la tierra del año 1966

El resumen de los resultados del balance hídrico de suelos para las condiciones de uso de la tierra para el año 1966, se observa en el cuadro 13. Las láminas de recarga promedio son de 352.71 mm anuales para las diferentes áreas, donde el maíz y pastos aporta una lámina de 490.52 mm anuales, el café 300.01 mm anuales y los centros poblados se presentan como zonas con alto grado de impermeabilización que causan que en dichas áreas no se presente recarga; sin embargo, las láminas de escorrentía alcanzan los 250.28 mm anuales para esta categoría de uso, sin embargo el impacto es mínimo debido a que el porcentaje de área con este uso es bajo.

El caudal medio de la cuenca bajo estas condiciones debería de ser de 0.21 m³/s. Mientras, que la recarga potencial de las microcuencas bajo estas condiciones sería capaz de abastecer de agua a 220,000 personas (calculando un consumo per cápita de 0.2 m³/s y la utilización del 75% de la disponibilidad, aquí se incluyen los aprovechamientos a través de pozos o manantiales).

Cuadro 13. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Uso de la tierra para el año 1966, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Categorías de uso	Recarga Potencial (mm)	Escorrentía Superficial (m ³ /s)	Área (m ²)	Volumen de recarga potencial (Mm ³)	% de recarga potencial	Caudal potencial de recarga (m ³ /s)	Caudal potencial de escorrentía superficial (m ³ /s)
Hortalizas	441.09	187.59	3127000	1.38	6.34	0.04	0.02
Café	300.01	159.96	875000	0.26	1.21	0.01	0.00
Maíz y Pastos	490.52	93.09	19206000	9.42	43.32	0.30	0.06
Centros Poblados	0	250.28	5238000	0.00	0.00	0.00	0.04
Bosques	320.4	87.69	32375000	10.37	47.70	0.33	0.09
Arbustos de poco valor	387.57	110.61	801000	0.31	1.43	0.01	0.00
Totales	352.71	109.45	61622000	21.75	100.00	0.69	0.21

6.2.3 Balance hídrico de suelos bajo condiciones de uso de la tierra del año 2006

El resumen de los resultados del balance hídrico de suelos para las condiciones de uso de la tierra para el año 2006, se observa en el cuadro 14. Las láminas de recarga promedio son de 204.70 mm anuales para las diferentes áreas, donde las tierras con cultivos anuales aportan una lámina de 433.31 mm anuales, los pastos naturales no mejorados aportan 304.4 mm anuales y los centros poblados se presentan como zonas con alto grado de impermeabilización que causan que en dichas áreas no se presente recarga; sin embargo, las láminas de escorrentía alcanzan los 252.84 mm anuales para esta categoría de uso. El impacto de esta categoría es grande en la disminución de la recarga potencial y en el aumento de la escorrentía, debido a que la presencia de esta categoría es de 42.5% del área.

El caudal medio de la cuenca bajo estas condiciones debería de ser de 0.34 m³/s. Mientras, que la recarga potencial de las microcuencas bajo estas condiciones sería capaz de abastecer de agua a 130,000 personas (calculando un consumo per cápita de 0.2 m³/s y la utilización del 75% de la disponibilidad, aquí se incluyen los aprovechamientos a través de pozos o manantiales).

Cuadro 14. Resumen de los balances hídricos de las diferentes categorías de uso en condiciones de Uso de la tierra para el año 2006, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Categorías De Uso	Recarga potencial (mm)	Escorrentía superficial (mm)	Área (m ²)	Volumen recarga potencial (Mm ³)	% de recarga potencial	Caudal potencial recarga (m ³ /s)	Caudal potencial escorrentía (m ³ /s)
Tierras Con Cultivos Anuales	433.31	130.01	9791000	4.24	33.64	0.13	0.04
Pastos Naturales No Mejorados	304.4	191.15	182000	0.06	0.44	0.00	0.00
Frutales De Clima Frio	406.16	113.82	232000	0.09	0.75	0.00	0.00
Centros Poblados	0	252.84	26191000	0.00	0.00	0.00	0.21
Bosque	320.4	87.69	22335000	7.16	56.75	0.23	0.06
Superficies Degradadas	368.67	282.24	2890000	1.07	8.45	0.03	0.03
Totales	204.70	174.14	61621000	12.61	100.03	0.40	0.34

Como se observa los impactos del cambio de uso del suelo, son considerables a la recarga potencial y a la escorrentía, el principal factor responsable como ya se mencionó es la impermeabilización de las áreas a partir de la urbanización de centros poblados y la expansión de los mismos.

Como se observa en el cuadro 15, las variaciones de los caudales de escorrentía esperados son de 23.5% al comparar las condiciones de Capacidad de uso de la tierra y Uso de la tierra para el año 1966; las diferencias aumentan al comparar las condiciones de capacidad de uso de la tierra con las de uso de la tierra para el año 2006, alcanzando un 100% de variación, o sea que los caudales medios esperados se duplican.

Además, los volúmenes de recarga disminuyen en un 5% en el uso de la tierra para el año 1966 al compararla con las condiciones de capacidad de la tierra; y, disminuyen en un 44.9% cuando se compara la capacidad de uso de la tierra con el uso de la tierra para el año 2006. Los cambios en el tiempo se pueden evidenciar al comparar el uso de la tierra para los años 1966 y 2006, donde hay una disminución del 42%.

En resumen podemos observar como el uso de la tierra a capacidad favorece la infiltración y por ende la recarga profunda y disminuye la escorrentía; mientras que los usos de los años 1966 y 2006, al contrario aumentan la escorrentía superficial y van en detrimento de la recarga potencial a los acuíferos del área.

Cuadro 15. Resumen general de los balances hídricos de suelos para las diferentes condiciones de uso de la tierra de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala.

Escenarios evaluados	Recarga Potencial (mm)	Escorrentía Superficial (mm)	Volumen Recarga Potencial (Mm ³)	Caudal Potencial Recarga (m ³ /s)	Caudal Potencial de Escorrentía En (m ³ /s)
Capacidad de Uso	371.41	87.93	22.89	0.73	0.17
Uso de la tierra del año 1966	352.71	109.45	21.75	0.69	0.21
Uso de la tierra del año 2006	204.70	174.14	12.61	0.40	0.34

6.3 Estimación de los caudales máximos de escorrentía

6.3.1 Método Racional

Para el cálculo de caudales máximos se utilizo el método racional:

$$Q_p = 0.278 CiA$$

Donde:

Q_p = gasto o caudal máximo (m^3/s)

C = coeficiente de escurrimiento;

i = intensidad media de la lluvia, con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h;

A = es el área de la cuenca drenada (km^2)

Los valores de área de la cuenca y la intensidad de las lluvias que se utilizan para el análisis se consideran constantes para las 3 condiciones bajo las cuales se están evaluando las microcuencas, por lo que la única variable dentro de este método, derivada de la cobertura es el coeficiente de escurrimiento.

A continuación se detallan los coeficientes de escurrimiento asignados a cada una de las coberturas bajo las 3 condiciones de uso de la tierra:

6.3.1.1 Capacidad de uso de la tierra

Los coeficientes de escurrimiento de las áreas agrícolas se consideran como agricultura limpia con coeficientes para condiciones medias, mientras que los sistemas de agricultura con mejoras se considera bajo sistema de manejo con practicas de conservaciones de suelos, que mejoran las condiciones de absorción y retardan el escurrimiento. La agroforestería por ser un sistema de combinación de especies forestales con cultivos se considera valores medios de las dos coberturas. Los coeficientes de los bosques se consideran incluyendo factores de manejo forestal, por lo cual el escurrimiento se considera por encima de los bosques de protección con mayores densidad y sotobosques bien desarrollado. En el cuadro 16, se observa la ponderación de los valores de coeficientes de escurrimientos en función del área dentro de las microcuencas, y al final se obtiene un coeficiente ponderado para la condición de capacidad de uso de la tierra de 0.36118.

Cuadro 16. Coeficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de capacidad de uso en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Uso de la tierra	Coeficiente de escurrimiento	Área (%)	Coeficiente ponderado
Agricultura sin limitaciones	0.55	0.28	0.00154
Agroforestería con cultivos anuales	0.40	38.07	0.15228
Agricultura con mejoras	0.30	10.41	0.03123
Agroforestería con cultivos permanentes	0.35	3.81	0.01334
Tierras Forestales para producción	0.35	41.00	0.14350
Tierras Forestales para protección	0.30	6.43	0.01929
Total		100.00	0.36118

6.3.1.2 Uso de la tierra del año 1966

Bajo estas condiciones se siguen considerando usos de la tierra como las hortalizas a las cuales se les asignó un valor de coeficiente de escurrimiento igual al de la agricultura sin limitaciones o agricultura limpia. El café es considerado como un cultivo con características de bosque, debido a su cobertura y a la sombra que generalmente utiliza, sin embargo debido a que es menos denso que un bosque se le coloca un valor ligeramente superior. Los centros poblados se les colocó un valor promedio en condiciones de techos impermeables, calles con un bajo porcentaje de asfalto y/o concreto, además se considera que por la época aun no eran centros poblados con alto grado de urbanización. Los bosques se consideran en promedio como bosques heterogéneos, en pendientes medias. En el cuadro 17, se observa la ponderación de los valores de coeficientes de escurrimientos en función del área dentro de las microcuencas, y al final se obtiene un coeficiente ponderado para la condición de uso de la tierra en el año 1966 de 0.44976.

Cuadro 17. Coeficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de uso de la tierra del año 1966, en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Uso de la tierra	Coeficiente de escurrimiento	Área (%)	Coeficiente ponderado
Hortalizas	0.55	5.07	0.02789
Café	0.40	1.42	0.00568
Maíz y pastos	0.50	31.17	0.15585
Centros poblados	0.85	8.50	0.07225
Bosques	0.35	52.54	0.18289
Arbustos de poco valor	0.4	1.30	0.00520
Total		100.00	0.44976

6.3.1.3 Uso de la tierra del año 2006

Considerando los usos de la tierra para el año 2006, los cuales no difieren en gran medida de los usos de los usos del año 1966, se considero que algunas características debían se evaluadas con el mismo detalle, en la medida de lo posible. Tal es el caso, de los bosques los cuales tienen un detalle mayor para el año 2006, sin embargo se agruparon todas las categorías de bosques y se les asignó un valor de coeficiente de escurrimiento promedio. Las superficies degradadas que corresponde a las areneras se consideraron como superficies limpias, y se les asignó un valor por debajo del asignado a la agricultura limpia debido a la capacidad de infiltración del material geológico predominante en el área que es ceniza volcánica de tipo pomáceo. Los frutales de clima frío fueron considerados como arbustos con valores intermedios entre agricultura limpia y bosques. En el cuadro 18, se observa la ponderación de los valores de coeficientes de escurrimientos en función del área dentro de las microcuencas, y al final se obtiene un coeficiente ponderado para la condición de uso de la tierra para el año 2006 de 0.56359.

Cuadro 18. Coeficientes de escurrimientos de las coberturas del uso de la tierra, bajo condiciones de uso de la tierra del año 2006, en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Uso de la tierra	Coeficiente de escurrimiento	Área (%)	Coeficiente ponderado
Tierra con cultivos anuales	0.55	5.07	0.02789
Frutales de clima frío	0.40	0.38	0.00152
Pastos naturales no mejorados	0.45	0.30	0.00135
Centros poblados	0.90	42.50	0.38250
Bosques	0.35	36.25	0.12688
Superficies degradadas	0.50	4.69	0.02345
Total		100.00	0.56359

Los valores de intensidad de la lluvia como se menciona en la formula son considerados para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de concentración se utiliza debido a que lo que la formula estima es un caudal máximo o sea el punto máximo de la crecida cuando en el punto de aforo de la cuenca en estudio se este reflejando el escurrimiento del área mas lejana.

Para calcular el tiempo de concentración de la cuenca se utilizo la formula de Kirpich, Bransby Williams y de Chow, para obtener un promedio de los tiempos obtenidos por las tres formulas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Según Kirpich:

$$t_c = 0.0078 (L^{0.77} / S^{0.38})$$

Según Bransby Williams:

$$t_c = 21.3 (L/1610)(1/A^{0.1} S^{0.2})$$

donde:

t_c = tiempo de concentración sobre la superficie natural, en minutos;

L = longitud del cauce principal, en metros;

S = pendiente media del cauce principal, m/m.

Según Chow:

$$t_c = 0.01 (L / (S)^{0.5})^{0.64}$$

donde:

t_c = tiempo de concentración, en horas;

L = Longitud del cauce principal, en metros;

S = pendiente media del cauce, en porcentaje.

Utilizando una pendiente del cauce de 8.5%, calculada por el método analítico, una longitud del cauce principal de 15.25 km y un área de 61.62 km², se obtienen los siguientes resultados: Método de Kirpich: 83.7 minutos; Método de Bransby Williams: 240.7 minutos y Método de Chow 143.88 minutos. Por lo cual utilizando el promedio aritmético encontramos que el tiempo de concentración de la cuenca es de 156 minutos.

Entonces, utilizando el tiempo de concentración de las microcuencas se obtiene las intensidades de lluvia para este periodo de tiempo durante diferentes periodos de retorno. Para esto se utilizaron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia elaborados por el INSIVUMEH para la estación del Observatorio Central, en el año 2002.

En el cuadro 19, se observan las intensidades probables para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, para el tiempo de concentración de promedio de la cuenca que es de 156 minutos, tomando en cuenta diferentes periodos de retorno. Se observa además como los valores van creciendo en función de que el periodo de probabilidad utilizado aumenta.

Cuadro 19. Intensidades de lluvia (mm/h), para el tiempo de concentración promedio de las microcuencas San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, para diferentes periodos de retorno.

Periodo de Retorno (años)	Ecuación de intensidad de lluvia	Tiempo de concentración (min)	Intensidad (mm/h)
2	$i = 1970 / (t + 15)^{0.958}$	156	14.29
5	$i = 7997 / (t + 30)^{1.161}$	156	18.53
10	$i = 1345 / (t + 9)^{0.791}$	156	23.7
25	$i = 820 / (t + 2)^{0.656}$	156	29.61
100	$i = 890 / (t + 2)^{0.649}$	156	33.3

Fuente: INSIVUMEH (Instituto de Sismología, Vulcanología, meteorología e hidrología). 2002. Estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala. Guatemala, Guatemala. Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda. Departamento de investigación y servicios hídricos. s.p.

Habiendo calculado todas las variables necesarias para la estimación del caudal máximo de escorrentía, se utilizan estos valores para el cálculo en los diferentes escenarios. Los caudales máximos esperados para los diferentes escenarios, se observan en el Cuadro 20, donde se resumen los cálculos realizados con la fórmula racional ($Q_p = 0.278 C_i A$), para una intensidad de lluvia uniforme durante el tiempo equivalente al tiempo de concentración de las microcuencas.

Se observan las diferencias entre los tres escenarios, donde el escenario de uso a capacidad de la tierra muestra los valores mas bajos de escorrentía máxima esperada para los diferentes periodos de retorno evaluados, los caudales van desde 88.41 hasta 206.03 m³/s. El escenario de uso de la tierra para el año 1966 muestra un incremento con relación al uso a capacidad que va en el orden de 24.52%, los valores de escorrentía esperados bajo este escenario de uso de la tierra son desde 110.10 hasta 256.56 m³/s. Los cambios más grandes se observan cuando se evalúan el escenario de uso de la tierra para el año 2006, existen variaciones con relación al uso de la tierra para el año 1966 del orden de 25.30%, y al comparar este escenario con relación al de capacidad de uso de la tierra se obtiene variaciones de 56%, con valores de escorrentía que van desde 137.96 hasta 321.49 m³/s.

Cuadro 20. Caudales máximos esperados, bajo diferentes escenarios de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método racional.

Escenario	Periodo de retorno (años)	Coefficiente de escorrentía (C)	Intensidad de lluvia (mm/h)	Área de la cuenca (Km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)
Capacidad de uso de la tierra	2	0.361	14.29	61.62	88.41
	5	0.361	18.53	61.62	114.65
	10	0.361	23.7	61.62	146.64
	25	0.361	29.61	61.62	183.20
	100	0.361	33.3	61.62	206.03
Uso de la tierra del año 1966	2	0.450	14.29	61.62	110.10
	5	0.450	18.53	61.62	142.77
	10	0.450	23.7	61.62	182.60
	25	0.450	29.61	61.62	228.13
	100	0.450	33.3	61.62	256.56
Uso de la tierra del año 2006	2	0.564	14.29	61.62	137.96
	5	0.564	18.53	61.62	178.90
	10	0.564	23.7	61.62	228.81
	25	0.564	29.61	61.62	285.87
	100	0.564	33.3	61.62	321.49

6.3.2 Fórmula de Mac Math

Para la utilización de esta fórmula se procedió a calcular en primera instancia los valores de coeficiente C promedio para los coeficientes de cobertura, textura de suelos y pendiente. Los valores utilizados son valores medios para cada uno de las categorías de uso en los escenarios identificados, como se observa en el cuadro 21. Los valores de pendientes tienen rangos muy pequeños, por lo cual no fue posible asignar un valor adecuado a las condiciones de pendientes pronunciadas de la cuenca. Para facilitar la presentación de los cálculos se obtuvo un coeficiente ponderado por el área de influencia para cada escenario.

Cuadro 21. Coeficientes de escorrentía promedio para el método Mac Math, de cálculo de escorrentía máxima de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Escenario	Categoría de Uso	Coeficiente de Cobertura (C1)	Coeficiente de Textura (C2)	Coeficiente Pendiente (C3)	Coeficiente Promedio (C)
Capacidad de uso de la tierra	Agricultura sin limitaciones	0.22	0.22	0.1	0.54
	Agroforestería con cultivos anuales	0.12	0.22	0.1	0.44
	Agricultura con mejoras	0.16	0.22	0.15	0.53
	Agroforestería con cultivos permanentes	0.120	0.22	0.15	0.49
	Tierras Forestales para producción	0.080	0.22	0.15	0.45
	Tierras Forestales para protección	0.080	0.22	0.15	0.45
	Coeficiente ponderado en función del área de influencia de la categoría de uso: 0.4563				
Uso de la tierra del año 1966	Hortalizas	0.220	0.22	0.1	0.54
	Café	0.120	0.22	0.1	0.44
	Maíz y pastos	0.160	0.22	0.15	0.53
	Centros poblados	0.300	0.22	0.15	0.67
	Bosques	0.080	0.22	0.15	0.45
	Arbustos de poco valor	0.120	0.22	0.15	0.49
	Coeficiente ponderado en función del área de influencia de la categoría de uso: 0.4986				
Uso de la tierra del año 2006	Tierra con cultivos anuales	0.220	0.22	0.1	0.54
	Frutales de clima frío	0.120	0.22	0.1	0.44
	Pastos naturales no mejorados	0.160	0.22	0.15	0.53
	Centros poblados	0.300	0.22	0.15	0.67
	Bosques	0.080	0.22	0.15	0.45
	Superficies degradadas	0.300	0.22	0.15	0.67
	Coeficiente ponderado en función del área de influencia de la categoría de uso: 0.5683				

Los resultados de la aplicación de la fórmula de Mac Math, para intensidad de lluvia que corresponde al tiempo de concentración de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, para diferentes periodos de retorno, se muestran en el cuadro 22, donde se observa al igual que en el método racional caudales menores en el escenario de capacidad de uso de la tierra, y en su orden le siguen los caudales del uso de la tierra para el año 1966 y uso de la tierra para el año 2006. Las diferencias entre los escenarios son del orden de 9.26% entre el uso de la tierra a capacidad y el uso de la tierra para el año 1966; mientras que la diferencia entre el uso de la tierra a capacidad y el uso de la tierra para el año 2006 hay un 24.54% de diferencia; la diferencia entre el uso de la tierra para el año 1966 y el uso de la tierra para el año 2006 es de 13.98%.

Cuadro 22. Caudales máximos esperados, bajo diferentes escenarios de uso de la tierra para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método de Mac Math.

Escenario	Periodo de retorno (años)	Coefficiente de escorrentía (C)	Intensidad de lluvia (mm/h)	Área de la cuenca (Has)	Pendiente del cauce (m/km)	Caudal máximo (m ³ /s)
Capacidad de uso de la tierra	2	0.4563	14.29	6162.1	85	155.65
	5	0.4563	18.53	6162.1	85	201.81
	10	0.4563	23.7	6162.1	85	258.13
	25	0.4563	29.61	6162.1	85	322.50
	100	0.4563	33.3	6162.1	85	362.71
Uso de la tierra del año 1966	2	0.4986	14.29	6162.1	85	170.07
	5	0.4986	18.53	6162.1	85	220.67
	10	0.4986	23.7	6162.1	85	282.06
	25	0.4986	29.61	6162.1	85	352.39
	100	0.4986	33.3	6162.1	85	396.30
Uso de la tierra del año 2006	2	0.5683	14.29	6162.1	85	193.84
	5	0.5683	18.53	6162.1	85	251.37
	10	0.5683	23.7	6162.1	85	321.50
	25	0.5683	29.61	6162.1	85	401.68
	100	0.5683	33.3	6162.1	85	451.70

6.3.3 Método de USSCS o Curva Número

El cálculo del volumen de escorrentía por el método de USSCS o Curva número, se base en el cálculo de un número de curva para las condiciones cobertura y condición hidrológica de las áreas, como las áreas dentro de una cuenca son heterogéneas, se calculó un número de curva promedio para el área. Como la cuenca tiene suelos Franco arcillosos y arcillosos, se considera que su grupo hidrológico es del Grupo C, con bajas tasas de infiltración cuando esta humedecido y baja transmisividad del agua. Los valores de número de curva se obtuvieron de diversas tablas y en algunos casos hubo necesidad de promediar valores para obtener un valor medio.

Los valores de número de curva, para cada categoría de uso de la tierra en cada uno de los escenarios, se ponderaron sobre la base del área de influencia en las microcuencas, como se observa en el cuadro 23. Para el uso de la tierra a capacidad el número de curva ponderado es de 75.66; en el caso del uso de la tierra para el año 1966 el valor es de 76.61 y en el caso del uso de la tierra para el año 2006, el valor es de 85.16.

Cuadro 23. Ponderación de los valores de número de curva para las diferentes categorías de uso de las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Escenario	Categoría de Uso	CN	Área (Has)	Ponderación
Capacidad de uso de la tierra	Agricultura sin limitaciones	88	17.3	0.247
	Agroforestería con cultivos anuales	82	2345.7	31.215
	Agricultura con mejoras	79	641.2	8.220
	Agroforestería con cultivos permanentes	76	235.0	2.898
	Tierras Forestales para producción	70	2526.7	28.703
	Tierras Forestales para protección	68	396.2	4.372
	Total			75.66
Uso de la tierra del año 1966	Hortalizas	88	312.7	4.466
	Café	72	87.5	1.022
	Maíz y pastos	82	1920.6	25.558
	Centros poblados	92	523.8	7.820
	Bosques	70	3237.5	36.777
	Arbustos de poco valor	74	80.1	0.962
	Total			76.61
Uso de la tierra del año 2006	Tierra con cultivos anuales	88	979.1	13.982
	Frutales de clima frío	76	23.2	0.286
	Pastos naturales no mejorados	71	18.2	0.210
	Centros poblados	96	2619.1	40.803
	Bosques	70	2233.5	25.372
	Superficies degradadas	96	289.0	4.502
	Total			85.16

El método de la Curva número, calcula un equivalente de la lámina de precipitación que se convierte en escorrentía, sin embargo es posible calcular con esos datos un caudal equivalente para el área de la cuenca y el tiempo en el cual precipitó esa lámina que es igual al tiempo de concentración de las microcuencas (2.6 horas = 156 minutos), como se observa en el cuadro 24. Las diferencias entre los 3 escenarios son evidentes, pero la magnitud de las diferencias es variable y en el caso de comparar el escenario de capacidad de uso de la tierra con el de uso de la tierra para el año 1966, es una diferencia mínima de aproximadamente un 7%. Donde las diferencias se hacen más grandes es al comparar el escenario de capacidad de uso de la tierra y el de uso de la tierra para el año 2006, donde las diferencias son de hasta el 52%.

Cuadro 24. Caudales de escorrentía calculados por el método de la curva número para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala, calculados por el método de la curva número.

Escenario	Periodo de retorno (años)	CN	Capacidad máxima de retención en mm (S) $S = (25400/CN) - 254$	Intensidad de lluvia (mm/h)	Tiempo (h)	Profundidad acumulada de la precipitación (mm)	Profundidad acumulada de la escorrentía (mm) $Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S)$	Caudal equivalente (m ³ /s)
Capacidad de uso de la tierra	2	75.66	81.71	14.29	2.6	37.15	4.22	27.81
	5	75.66	81.71	18.53	2.6	48.18	8.93	58.76
	10	75.66	81.71	23.7	2.6	61.62	16.14	106.28
	25	75.66	81.71	29.61	2.6	76.99	25.83	170.08
	100	75.66	81.71	33.3	2.6	86.58	32.47	213.74
Uso de la tierra del año 1966	2	76.61	77.55	14.29	2.6	37.15	4.72	31.09
	5	76.61	77.55	18.53	2.6	48.18	9.68	63.75
	10	76.61	77.55	23.7	2.6	61.62	17.19	113.19
	25	76.61	77.55	29.61	2.6	76.99	27.18	178.97
	100	76.61	77.55	33.3	2.6	86.58	33.99	223.74
Uso de la tierra del año 2006	2	85.16	44.26	14.29	2.6	37.15	11.04	72.67
	5	85.16	44.26	18.53	2.6	48.18	18.50	121.80
	10	85.16	44.26	23.7	2.6	61.62	28.70	188.92
	25	85.16	44.26	29.61	2.6	76.99	41.30	271.91
	100	85.16	44.26	33.3	2.6	86.58	49.53	326.05

De forma general los caudales máximos de escorrentía calculados por el método racional son menores que los caudales de escorrentía calculados por el método Mac Math, como se observa en el cuadro 25. Las diferencias son aproximadamente del 43.20% de disminución en los caudales calculados por el método de Racional con relación a los caudales calculados por el método Mac Math. También, los caudales calculados

por el método de la curva número (USSCS), son diferentes a los dos métodos antes mencionados, mostrando una mayor diversidad de valores por lo cual no pueden hacerse generalizaciones en cuanto a la magnitud de sus diferencias, sin embargo, si son menores a los calculados por los métodos anteriores. Por lo tanto, se considero adecuado realizar un promedio de los métodos utilizados para presentar valores medios de caudales máximos de escorrentía para la cuenca en los diferentes escenarios.

Los rangos de los caudales máximos esperados son variable según el periodo de retorno y el método utilizado pero cabe mencionar que bajo las condiciones de uso para el año 2006 se esperarían caudales desde 72.67 m³/s para un periodo de retorno de 2 años, hasta 451.70 m³/s para un periodo de retorno de 100 años. Mientras, que con las condiciones de uso del año 1966 los caudales oscilarían entre 31.09 y 396.30 m³/s, para los mismos periodos de retorno. Y en condiciones de uso de la tierra a capacidad, los caudales serían de 27.81 y 362.71 m³/s, para los mismos periodos de retorno.

Cuadro 25. Comparación de los caudales máximos calculados por los métodos Racional, Mac Math y Curva Número, para las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, Guatemala, Guatemala.

Escenario	Periodo de retorno (años)	Intensidad de lluvia (mm/h)	Caudales máximos calculados por el método racional (m ³ /s)	Caudales máximos calculados por el método Mac Math (m ³ /s)	Caudales máximos calculados por el método de la Curva Número (m ³ /s)	Caudales máximos calculados promedio (m ³ /s)
Capacidad de uso de la tierra	2	14.29	88.41	155.65	27.81	90,62
	5	18.53	114.65	201.81	58.76	125,07
	10	23.7	146.64	258.13	106.28	170,35
	25	29.61	183.2	322.50	170.08	225,36
	100	33.3	206.03	362.71	213.74	260,83
Uso de la tierra del año 1966	2	14.29	110.1	170.07	31.09	103,75
	5	18.53	142.77	220.67	63.75	142,26
	10	23.7	182.6	282.06	113.19	192,62
	25	29.61	228.13	352.39	178.97	253,17
	100	33.3	256.56	396.30	223.74	292,20
Uso de la tierra del año 2006	2	14.29	137.96	193.84	72.67	134,82
	5	18.53	178.9	251.37	121.8	184,02
	10	23.7	228.81	321.50	188.92	246,41
	25	29.61	285.87	401.68	271.91	319,82
	100	33.3	321.49	451.70	326.05	366,41

7. Conclusiones

- 7.1 En los usos de la tierra para los años 1966 y 2006, se evidencia que la cobertura boscosa ha disminuido de 52.54 % a 36.25%; sin embargo, las áreas agrícolas también han disminuido de un 37.66% a 16.57%. Por lo cual se descarta un avance de la frontera agrícola dentro de las microcuencas. Un cambio significativo es el que corresponde al proceso de urbanización; donde los bosques y tierras de cultivos han sido desplazados para dar lugar a centros poblados, los cuales de un 8.5% del área para el año 1966 aumenta a un 42.5% en el año 2006.
- 7.2 Los balances hídricos de las microcuencas muestran diferencias en los componentes de la recarga hídrica y la escorrentía. Existe una disminución del 42% en la recarga hídrica para el año 2006, en relación con el año 1966 (352.71 mm/año), mientras que las diferencias entre el año 1966 y las condiciones de uso a capacidad de las microcuencas es de un 5%. En el caso de la escorrentía, los caudales medios esperados para las microcuencas aumentan un 23.5% al comparar las condiciones de capacidad de uso de la tierra (87.93 mm/año ó 0.17 m³/s), y el uso de la tierra para el año 1966; mientras que las diferencias aumentan al comparar las condiciones de capacidad de uso de la tierra con las de uso de la tierra para el año 2006, alcanzando un 100% de variación. Por lo tanto, se considera que para el año 1966, las condiciones de las microcuencas no habían sufrido impactos tan severos como los que presentan para el año 2006.
- 7.3 Los caudales máximos de escorrentía esperados para las microcuencas, en las condiciones de uso a capacidad son de 90.62 a 260.83 m³/s, para periodos de retorno de 2 y 100 años respectivamente. Estos caudales esperados aumentan en un 13% en promedio para las condiciones de uso del suelo del año 1966; mientras que para las condiciones de uso del suelo del año 2006, los caudales aumentan en un 44% en promedio, alcanzando valores de 134.82 y 366.41 m³/s, para periodos de retorno de 2 y 100 años respectivamente.
- 7.4 El cambio del uso del suelo que se presenta en las microcuencas causa impactos al ciclo hidrológico natural, alterando básicamente la relación entre el agua superficial y el agua subterránea, esto como resultado de la impermeabilización en los centros poblados, las cuales han ido en aumento. Esto trae como consecuencia la reducción de las tasas de infiltración, aumentos de la escorrentía y reducciones de la infiltración profunda o recarga hídrica. En resumen, los impactos están determinados por la impermeabilización de las áreas, lo cual aumenta los índices de escorrentía y disminuye los índices de infiltración, como efecto de la compactación de calles, captación de la lluvia en los techos que es conducido rápidamente a través de drenajes sin dar oportunidad a ser infiltrada.

8 Recomendaciones

- 8.1 La información generada en este estudio puede ser utilizada para planificación estratégica en las microcuencas de los ríos San Lucas y Arenal, siendo la información de carácter general, generada a través de estimaciones, mediante métodos empíricos, los cuales no conllevan ninguna comprobación de los resultados a nivel de campo, por lo que sus resultados deben de ser tomados como indicadores solamente.
- 8.2 Implementar un sistema de monitoreo de caudales de agua superficial y de niveles de agua subterránea para determinar con mayor exactitud las variaciones estacionales de estas variables, lo cual permitirá obtener información más detallada sobre el comportamiento anual de las mismas.
- 8.3 Realizar un estudio similar a nivel de la subcuenca del río Villalobos, para poder cuantificar los impactos del proceso del cambio del uso del suelo en los centros poblados causa en el lago de Amatitlán; y complementariamente estudios del impacto del cambio de uso del suelo sobre los procesos de erosión y vulnerabilidad a desastres naturales, los cuales se encuentran íntimamente relacionados con el comportamiento del ciclo hidrológico. Y, sobre los impactos a la calidad del agua superficial y subterránea.
- 8.4 Establecer un programa de hidrología urbana, que permita básicamente, disminuir los volúmenes y la velocidad de la escorrentía, favorecer el proceso de infiltración y evitar la rápida concentración de la escorrentía en los cauces. Esto es factible mediante el manejo de las aguas pluviales en los sistemas de drenajes.
- 8.5 Elaborar un plan de ordenamiento territorial para las microcuencas, que permita regular el proceso de urbanización, para que este sea desarrollado de una forma sostenible con el ambiente.

9 Bibliografía

1. Aparicio Mijares, FJ. 2001. Fundamentos de hidrológica de superficie. México, Limusa. 303 p.
2. AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán, GT). 2000. Programa de saneamiento y manejo sustentable de la cuenca del lago de Amatitlán (en línea). Guatemala. Consultado 17 oct 2005. Disponible en: <http://www.iadb.org/EXR/doc98/pro/ugu0066.pdf>.
3. ASIES (Asociación de Investigación y Estudios Sociales, GT). 1992. Monografía ambiental: región Metropolitana, Departamento de Guatemala. Guatemala. 209 p.
4. Basterrechea Díaz, M. 1999. Dinámica física y planificación en cuencas. In: Taller Regional. Sobre Gestión Ambiental y Disminución de Vulnerabilidad a Desastres Naturales (1999, EV). San Salvador, El Salvador, SIECA / BID. 30 p
5. Basterrechea Díaz, M. s.f. Enfoque global del lago de Amatitlán y su cuenca. Guatemala, PRMC / CATIE. 18 p
6. CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central, GT). Boletín informativo: recopilación de información un servicio del CEPREDENAC. 30/06/2003 (en línea). Guatemala. Consultado 25 oct 2005. Disponible en: <http://www.cepredenac.org>
7. Cerillo, A. 2002. Efectos de la tormenta: las causas del desastre la urbanización y el asfalto impermeabilizan el terreno y agravan las inundaciones (en línea). Barcelona, España, Amics21. Consultado 10 oct 2005. Disponible en línea: <http://www.amics21.com/chapuzas/efectos.htm>.
8. Chávcz, WR; Sagastume, RA; Basterrechea M. s.f. Caracterización y priorización de microcuencas en la subcuenca lacustre Amatitlán. Guatemala, PRMC / CATIE. 30 p.
9. Cifuentes Ochoa, M. 2004. Amenazas al bosque: ciudades para un futuro más sostenible (edición del 29 -04-2003) (en línea). Madrid, España, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Dirección General de Urbanismo y Política de Suelo del Ministerio de Vivienda. Consultado 25 nov 2005. Disponible en: <http://www.habitat.aq.upm.es>
10. Comisión Estatal de Aguas, MX. 2003. Manual para las instalaciones de agua potable agua tratada drenaje sanitario y drenaje pluvial de los fraccionamientos y condominios de las zonas urbanas del estado de Querétaro. México. 29 p.
11. Delgado, F. 1992. Algunas metodologías para clasificación y evaluación de tierras. Mérida, Venezuela, CIDIAT. 8 p.
12. Dourojeanni, A; Jouravlev, A. 1999. Gestión de cuenca y ríos vinculados con centros urbanos. Chile, CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. 88 p.
13. FAUSAC (USAC, Facultad de Agronomía, GT). 1997. IV Curso de postgrado drenaje agrícola. Guatemala. tomo 1, 51 p.
14. González Recinos, BE. 2002. Evaluación del efecto del crecimiento urbano en la cobertura vegetal y el uso del suelo en la subcuenca del río platanitos. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 84 p.
15. González, A; Illescas O. s.f. Diagnostico preliminar de los usos del suelo y sus impactos ambientales en la subcuenca del lago del Amatitlán. Guatemala, Instituto Geográfico Militar. 25 p.

16. Green Cities, Environmental Solutions. US. 2000. Ciudades verdes (en línea). Global Issues Electronic Journal 5(1)18-23. US, USDS (en línea). Consultado el 15/dic/2005. Disponible en: <http://usinfo.state.gov/journals>.
17. Gutiérrez Ramírez, HR. 1994. Crecimiento urbano y su efecto sobre el uso del suelo y el área boscosa en la subcuenca del río Villalobos. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 75 p.
18. Gutiérrez, MA; Ayala, AR. 1998. Hidrología urbana: efectos de la impermeabilización en las cuencas urbanas de la ciudad de Posadas. Argentina, La Rioja, Entidad Binacional Yacyretá. 125 p.
19. Hudson, NW. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía (en línea). Italia, FAO. (Boletín de Suelos de la FAO – 68). Consultado 10 mar 2005. Disponible en: <http://www.fao.org>.
20. INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT). 1999. Manual de clasificación de tierras por capacidad de uso. Guatemala, Guatemala. 81 p. Consultado 15 oct 2005. Disponible en línea: <http://www.inab.gob.gt>
21. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2002. X, XI Censo de población y vivienda en Guatemala. Guatemala. s.p.
22. Infancia con Futuro, US. 2003. Situación actual del lago de Amatitlán después del paso del huracán Mitch (en línea). Madrid, España. Consultado 25 nov 2005. Disponible en: <http://www.infanciaconfuturo.org>
23. INSIVUMEH (Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT). 2002. Estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala. Guatemala, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos. s.p.
24. Inzunza, M. 2001. Los ríos: procesos erosivos [texto del curso de manejo de suelos] (en línea). Chile, Universidad de Chile. 135 p. Consultado 14 oct 2005. Disponible en www.inzunza.uc.ac.cl/textos.
25. Molina Terrén, J. 2000. Criterios para reducir el impacto ambiental asociado a la urbanización (en línea). Segovia, España, Instituto Juan de Herrera. Consultado 12 nov 2005. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n14/ajmol.html>
26. Monsalve Sáenz, G. 1998. Hidrológica en la ingeniería. 2 cd. Colombia, Alfaomega / Escuela Colombiana. 377 p.
27. Monzón, CM. 2004. Dinámica de cobertura forestal y urbana 1990-2001 en la región metropolitana del departamento de Guatemala. Guatemala, Revista Universidad del Valle de Guatemala no. 13:6-11.
28. Mumford, L. 1999. Historia natural de la urbanización (en línea). Madrid, España, Instituto Juan de Herrera, Dirección General de Urbanismo y política del Suelo del Ministerio de la Vivienda. Consultado 12 sep 2005. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n21/almum.html>
29. Narcís, P. 1999. La urbanización nos ahoga (en línea). Barcelona, España, Universidad de Barcelona. Consultado 15 oct 2005. Disponible en: <http://www.amics21com/chapuzas/urbanizacion.html>
30. ONU, US. 1972. Declaración de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente humano (en línea). US. Consultado 11 nov 2005. Disponible en: <http://www.jmarcano.com/educa/docs/estocolmo.htm>
31. ONU, US. 1999. Estado de la población mundial (en línea). US, Fondo de Naciones Unidas para la Población. Consultado 15 ene 2005. Disponible en: <http://www.ansa.it/ansalatina/html>
32. ONU, US. 2004. Crecimiento poblacional, riesgo para el medio ambiente (en línea). US. Consultado 15 ene 05. Disponible en: <http://www.ansa.it/ansalatina/html>

33. Peña Llopis, J. 2001. Análisis de los cambios de usos del suelo (1946-1999) en una cuenca semiárida (Agost, Alicante). España. Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas: Revista de Ecología y Medio Ambiente 10(3): 47-58.
34. Ramírez, A; Rodríguez, PM. 2004. Lago de Amatitlán está en agonía: responsables de salvarlo se encuentran en emergencia; impulsan canalización del río Villalobos (en línea). Guatemala, Guatemala, noviembre, 21:9. Consultado 11 oct 2005. Disponible en: <http://www.prensalibre.com/pl/2004/noviembre/21/102008.html>
35. Reyna, EI. 1998. Las interrelaciones de la presión demográfica. Guatemala, Guatemala, The World Bank. 12 p.
36. Silva Medina, GA. 1998. Transporte de sedimentos en ríos. Bogotá, Colombia. 125 p.
37. URL (Universidad Rafael Landívar, GT). 2004. Perfil ambiental de Guatemala: Informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática. Guatemala, URL, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente. 461 p.
38. Villón Béjar, M. 2004. HidroEsta: manual de usuario. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 295 p.



Rolando Barrios.

10. Anexos

ANEXO 1. BALANCES HIDRICOS DE SUELOS

Simbología utilizada

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchites.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	
HSf: Humedad de Suelo Final.	
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	
CC: Déficit de Capacidad de Campo.	Kp: Factor por pendiente
Rp: Recarga Potencial	Kv: Factor por vegetación
NR: Necesidad de Riego.	
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	
Ret: Retención de lluvia	

**CUADRO 26 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE AGRICULTURA SIN LIMITACIONES
(CAPACIDAD DE USO)**

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,12
Kfc [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,831183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,12

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	129,6	64,4	7,6	3,6	6,1	9,2	31,5	109,8	264,2	190,3	206,6	222,3	1245,2
Ret [mm]	15,55	7,73	5,00	3,63	5,00	5,00	5,00	13,18	31,71	22,83	24,79	26,68	166,1
Pi (mm)	94,77	47,12	2,12	0,00	0,88	3,53	22,04	80,33	193,28	139,19	151,09	162,59	896,9
ESC (mm)	19,25	9,57	0,43	0,00	0,18	0,72	4,48	16,31	39,26	28,27	30,69	33,02	182,2
ETP (mm)	61,1	70,0	66,8	79,5	82,2	98,2	89,9	82,1	64,3	71,2	64,6	61,7	891,5
HSi (mm)	203,13	203,13	192,57	165,62	148,80	142,38	140,03	145,51	181,24	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,87	0,42	0,18	0,12	0,37	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	61,09	57,67	29,08	16,81	7,30	5,88	16,55	44,60	64,30	71,24	64,64	61,66	500,83
HSf (mm)	203,13	192,57	165,62	148,80	142,38	140,03	145,51	181,24	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	10,55	37,51	54,32	60,75	63,09	57,61	21,88	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	33,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,09	67,94	86,45	100,93	396,10
NR (mm)	0,00	22,85	75,25	117,02	135,61	155,39	130,93	59,35	0,00	0,00	0,00	0,00	696,41

CUADRO 27 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE AGROFORESTERIA CON CULTIVOS ANUALES (CAPACIDAD DE USO)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,15
Kfc [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,861183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,15

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	19,53	9,66	5,00	3,77	5,00	5,00	5,00	16,57	40,76	30,23	33,04	33,34	206,91
Pi (mm)	95,32	47,16	2,20	0,00	0,91	5,78	22,83	80,88	198,89	147,52	161,23	162,72	925,43
ESC (mm)	15,36	7,60	0,35	0,00	0,15	0,93	3,68	13,04	32,06	23,78	25,99	26,23	149,17
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	609,2
HSi (mm)	203,13	203,13	193,24	166,59	150,38	143,70	141,65	147,85	182,19	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,88	0,44	0,20	0,17	0,41	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	57,04	28,85	16,21	7,58	7,83	16,64	46,54	59,72	66,66	58,82	60,02	483,59
HSf (mm)	203,13	193,24	166,59	150,38	143,70	141,65	147,85	182,19	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	9,88	36,54	52,75	59,42	61,47	55,27	20,93	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	37,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,24	80,85	102,41	102,70	441,84
NR (mm)	0,00	20,66	73,12	110,58	126,73	143,27	120,68	50,36	0,00	0,00	0,00	0,00	645,38

**CUADRO 28 "A". BALANCE HIDRICO DE AGRICULTURA CON MEJORAS
(CAPACIDAD DE USO)**

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,12
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,883371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
N° de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.12

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	129,6	64,4	7,6	3,6	6,1	9,2	31,5	109,8	264,2	190,3	206,6	222,3	1245,2
Ret [mm]	15,55	7,73	5,00	3,63	5,00	5,00	5,00	13,18	31,71	22,83	24,79	26,68	166,09
Pi (mm)	100,72	50,08	2,26	0,00	0,93	3,75	23,42	85,37	205,42	147,92	160,57	172,80	953,25
ESC (mm)	13,30	6,61	0,30	0,00	0,12	0,50	3,09	11,27	27,12	19,53	21,20	22,81	125,86
ETP (mm)	61,1	70,0	66,8	79,5	82,2	98,2	89,9	82,1	64,3	71,2	64,6	61,7	550,4
HSi (mm)	203,13	203,13	193,94	166,35	149,08	142,50	140,12	145,97	183,27	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,89	0,43	0,18	0,13	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	61,09	59,27	29,85	17,26	7,52	6,14	17,57	48,07	64,30	71,24	64,64	61,66	508,60
HSf (mm)	203,13	193,94	166,35	149,08	142,50	140,12	145,97	183,27	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	9,19	36,78	54,04	60,62	63,01	57,16	19,86	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	39,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	121,26	76,68	95,94	111,14	444,65
NR (mm)	0,00	19,89	73,75	116,29	135,27	155,04	129,47	53,86	0,00	0,00	0,00	0,00	683,57

CUADRO 29 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE AGROFORESTERIA CON CULTIVOS PERMANENTES (CAPACIDAD DE USO)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	288,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,18
Kfc [0.01%]	0,744658
I [0.01%]	0,984658
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	1000,00
HSi (mm)	406,25
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,18

	%	mm
CC	32,50	406,25
PM	22,10	276,25
(CC-PM)	10,40	130,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	23,44	11,60	5,00	3,77	5,00	5,00	5,67	19,89	48,91	36,27	39,65	40,01	244,21
Pi (mm)	105,14	52,02	2,51	0,00	1,04	6,61	25,45	89,21	219,38	162,71	177,84	179,48	1021,39
ESC (mm)	1,64	0,81	0,04	0,00	0,02	0,10	0,40	1,39	3,42	2,54	2,77	2,80	15,91
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	597,5
HSi (mm)	406,25	406,25	394,57	351,57	320,89	303,19	294,64	301,15	343,17	406,25	406,25	406,25	
C1	1,00	1,00	0,93	0,58	0,35	0,26	0,34	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,88	0,46	0,25	0,15	0,08	0,12	0,36	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	63,69	45,52	30,68	18,73	15,16	18,94	47,20	59,72	66,66	58,82	60,02	542,82
HSf (mm)	406,25	394,57	351,57	320,89	303,19	294,64	301,15	343,17	406,25	406,25	406,25	406,25	
DCC (mm)	0,00	11,68	54,68	85,36	103,06	111,61	105,10	63,08	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	47,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,58	96,05	119,02	119,46	478,57
NR (mm)	0,00	15,80	74,60	128,72	159,21	186,07	168,20	91,85	0,00	0,00	0,00	0,00	824,45

CUADRO 30 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE TIERRAS FORESTALES DE PRODUCCION (CAPACIDAD DE USO)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,20
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,963371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	812,50
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,20

	%	mm
CC	32,50	812,50
PM	22,10	552,50
(CC-PM)	10,40	260,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	128,9	64,4	7,6	3,5	6,1	6,8	31,5	109,1	256,8	179,1	192,9	222,3	1208,9
Ret [mm]	25,78	12,88	5,00	3,49	5,00	5,00	6,30	21,83	51,36	35,81	38,57	44,46	255,49
Pi (mm)	99,35	49,65	2,46	0,00	1,02	1,72	24,29	84,12	197,91	138,00	148,64	171,32	918,47
ESC (mm)	3,78	1,89	0,09	0,00	0,04	0,07	0,92	3,20	7,52	5,25	5,65	6,51	34,92
ETP (mm)	64,5	72,1	68,2	85,0	89,4	106,7	97,7	88,2	68,9	75,8	70,5	63,3	588,6
HSi (mm)	812,50	812,50	793,14	740,19	688,87	650,75	619,86	616,18	658,67	790,98	812,50	812,50	
C1	1,00	1,00	0,93	0,72	0,53	0,38	0,35	0,57	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,91	0,69	0,49	0,35	0,23	0,22	0,38	0,90	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	64,50	69,01	55,41	51,32	39,13	32,61	27,97	41,62	65,60	75,82	70,45	63,30	656,76
HSf (mm)	812,50	793,14	740,19	688,87	650,75	619,86	616,18	658,67	790,98	812,50	812,50	812,50	
DCC (mm)	0,00	19,36	72,31	123,63	161,75	192,64	196,32	153,83	21,52	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	34,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,65	78,18	108,02	261,71
NR (mm)	0,00	22,48	85,11	157,30	212,05	266,74	266,07	200,38	24,81	0,00	0,00	0,00	1234,94

CUADRO 31 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE TIERRAS FORESTALES PARA PROTECCION (CAPACIDAD DE USO)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	288,00
K _p [0.01%]	0,01
K _v [0.01%]	0,20
K _{fc} [0.01%]	0,744658
I [0.01%]	0,954658
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	812,50
N° de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,20

	%	mm
CC	32,50	812,50
PM	22,10	552,50
(CC-PM)	10,40	260,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	131,5	64,4	7,6	4,1	6,1	16,6	31,5	111,8	286,6	224,0	247,7	222,3	1354,2
Ret [mm]	26,30	12,88	5,00	4,06	5,00	5,00	6,30	22,37	57,32	44,80	49,53	44,46	283,03
Pi (mm)	100,44	49,20	2,44	0,00	1,01	11,10	24,07	85,42	218,89	171,07	189,15	169,77	1022,55
ESC (mm)	4,77	2,34	0,12	0,00	0,05	0,53	1,14	4,06	10,40	8,12	8,98	8,06	48,57
ETP (mm)	50,9	63,5	62,7	63,1	60,3	72,5	66,4	63,8	50,5	57,5	47,2	56,7	773,9
HSi (mm)	812,50	812,50	799,95	749,41	707,42	676,44	655,13	650,99	696,84	812,50	812,50	812,50	
C1	1,00	1,00	0,96	0,76	0,60	0,52	0,49	0,71	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,95	0,73	0,57	0,46	0,37	0,36	0,53	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	50,86	61,75	52,98	41,99	31,99	32,42	28,21	39,57	50,54	57,51	47,18	56,75	551,73
HSf (mm)	812,50	799,95	749,41	707,42	676,44	655,13	650,99	696,84	812,50	812,50	812,50	812,50	
DCC (mm)	0,00	12,55	63,09	105,08	136,06	157,37	161,51	115,66	0,00	0,00	0,00	0,00	
R _p (mm)	49,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,69	113,56	141,96	113,03	470,82
NR (mm)	0,00	14,29	72,79	126,18	164,41	197,48	199,66	139,85	0,00	0,00	0,00	0,00	914,66

CUADRO 32 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE HORTALIZAS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,12
Kfc [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,831183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,12

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	15,63	7,73	5,00	3,77	5,00	5,00	5,00	13,26	32,60	24,18	26,43	26,68	170,28
Pi (mm)	95,25	47,12	2,12	0,00	0,88	5,58	22,04	80,82	198,73	147,40	161,11	162,59	923,64
ESC (mm)	19,34	9,57	0,43	0,00	0,18	1,13	4,48	16,41	40,36	29,94	32,72	33,02	187,59
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	656,3
HSi (mm)	203,13	203,13	193,23	166,54	150,36	143,68	141,58	147,53	182,04	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,88	0,44	0,20	0,17	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	57,02	28,81	16,18	7,55	7,68	16,09	46,32	59,72	66,66	58,82	60,02	482,54
HSf (mm)	203,13	193,23	166,54	150,36	143,68	141,58	147,53	182,04	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	9,90	36,58	52,77	59,44	61,54	55,59	21,09	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	37,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,93	80,74	102,29	102,57	441,09
NR (mm)	0,00	20,69	73,22	110,62	126,78	143,49	121,54	50,74	0,00	0,00	0,00	0,00	647,08

CUADRO 34 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE MAÍZ Y PASTOS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,06
Kv [0.01%]	0,15
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,913371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,15

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	19,53	9,66	5,00	3,77	5,00	5,00	5,00	16,57	40,76	30,23	33,04	33,34	206,91
Pi (mm)	101,09	50,02	2,33	0,00	0,96	6,13	24,22	85,78	210,94	156,46	171,00	172,58	981,51
ESC (mm)	9,59	4,74	0,22	0,00	0,09	0,58	2,30	8,14	20,01	14,84	16,22	16,37	93,09
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	550,4
HSi (mm)	203,13	203,13	194,61	167,33	150,70	143,86	141,81	148,42	184,47	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,90	0,45	0,21	0,18	0,43	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	58,53	29,61	16,64	7,80	8,18	17,61	49,74	59,72	66,66	58,82	60,02	491,00
HSf (mm)	203,13	194,61	167,33	150,70	143,86	141,81	148,42	184,47	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	8,51	35,79	52,43	59,26	61,31	54,71	18,66	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	43,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	132,57	89,79	112,18	112,56	490,52
NR (mm)	0,00	17,80	71,62	109,83	126,35	142,76	119,13	44,89	0,00	0,00	0,00	0,00	632,38

CUADRO 33 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE CAFE (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,18
Kfc [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,841183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	1000,00
HSi (mm)	406,25
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,18

	%	mm
CC	32,50	406,25
PM	22,10	276,25
(CC-PM)	10,40	130,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	129,6	64,4	7,6	3,6	6,1	9,2	31,5	109,8	264,2	190,3	206,6	222,3	1245,2
Ret [mm]	23,32	11,60	5,00	3,63	5,00	5,00	5,67	19,77	47,56	34,25	37,18	40,01	238,00
Pi (mm)	89,37	44,44	2,15	0,00	0,89	3,57	21,74	75,75	182,27	131,26	142,48	153,33	847,24
ESC (mm)	16,87	8,39	0,41	0,00	0,17	0,67	4,10	14,30	34,41	24,78	26,90	28,95	159,96
ETP (mm)	61,1	70,0	66,8	79,5	82,2	98,2	89,9	82,1	64,3	71,2	64,6	61,7	609,2
HSi (mm)	406,25	406,25	387,59	346,39	316,61	299,67	290,55	295,99	330,48	406,25	406,25	406,25	
C1	1,00	1,00	0,87	0,54	0,32	0,21	0,28	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,80	0,42	0,21	0,12	0,05	0,09	0,27	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	61,09	63,10	43,34	29,78	17,83	12,69	16,30	41,25	64,30	71,24	64,64	61,66	547,23
HSf (mm)	406,25	387,59	346,39	316,61	299,67	290,55	295,99	330,48	406,25	406,25	406,25	406,25	
DCC (mm)	0,00	18,66	59,86	89,64	106,58	115,70	110,26	75,77	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	28,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,20	60,01	77,84	91,67	300,01
NR (mm)	0,00	25,54	83,34	139,37	170,91	201,18	183,84	116,58	0,00	0,00	0,00	0,00	920,76

CUADRO 35 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE CENTROS POBLADOS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	0,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,01
Kfc [0.01%]	0
I [0.01%]	0,02
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	812,50
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,80

	%	mm
CC	32,50	812,50
PM	22,10	552,50
(CC-PM)	10,40	260,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	104,17	51,54	6,04	3,77	5,00	9,37	25,21	88,39	217,36	161,22	176,21	177,83	1026,12
Pi (mm)	0,52	0,26	0,03	0,00	0,02	0,05	0,13	0,44	1,09	0,81	0,88	0,89	5,11
ESC (mm)	25,52	12,63	1,48	0,00	1,03	2,29	6,18	21,66	53,25	39,50	43,17	43,57	250,28
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	597,5
HSi (mm)	812,50	761,68	714,44	678,83	647,98	624,45	603,96	590,38	581,26	576,28	571,59	568,46	
C1	1,00	0,81	0,62	0,49	0,37	0,28	0,20	0,15	0,11	0,09	0,08	0,06	
C2	0,78	0,60	0,47	0,35	0,26	0,18	0,14	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	
ETR (mm)	51,34	47,50	35,64	30,85	23,54	20,54	13,71	9,56	6,07	5,50	4,01	3,44	251,70
HSf (mm)	761,68	714,44	678,83	647,98	624,45	603,96	590,38	581,26	576,28	571,59	568,46	565,91	
DCC (mm)	50,82	98,06	133,67	164,52	188,05	208,54	222,12	231,24	236,22	240,91	244,04	246,59	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NR (mm)	57,16	118,37	163,48	207,71	239,39	277,62	290,45	297,65	289,87	302,08	298,85	303,17	2845,79

CUADRO 36 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE BOSQUES (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,20
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,913371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	812,50
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,20

	%	mm
CC	32,50	812,50
PM	22,10	552,50
(CC-PM)	10,40	260,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	26,04	12,88	5,00	3,77	5,00	5,00	6,30	22,10	54,34	40,30	44,05	44,46	269,26
Pi (mm)	95,15	47,07	2,33	0,00	0,96	6,13	23,03	80,74	198,53	147,25	160,94	162,43	924,56
ESC (mm)	9,02	4,46	0,22	0,00	0,09	0,58	2,18	7,66	18,83	13,97	15,26	15,41	87,69
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	588,6
HSi (mm)	812,50	812,50	794,47	743,05	696,51	661,73	634,95	629,95	671,22	810,32	812,50	812,50	
C1	1,00	1,00	0,94	0,73	0,56	0,44	0,41	0,61	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,92	0,70	0,52	0,40	0,29	0,28	0,43	0,99	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	65,11	53,75	46,54	35,74	32,91	28,03	39,47	59,43	66,66	58,82	60,02	604,16
HSf (mm)	812,50	794,47	743,05	696,51	661,73	634,95	629,95	671,22	810,32	812,50	812,50	812,50	
DCC (mm)	0,00	18,03	69,45	115,99	150,77	177,55	182,55	141,28	2,18	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	37,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,40	102,13	102,41	320,40
NR (mm)	0,00	20,74	81,14	143,49	189,91	234,26	236,56	177,78	2,47	0,00	0,00	0,00	1086,37

CUADRO 37 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE ARBUSTOS DE POCO VALOR (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 1966)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,18
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,893371
DS (g/cm ³):	1,35
PR (mm)	1000,00
HSi (mm)	438,75
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,18

	%	mm
CC	32,50	438,75
PM	22,10	298,35
(CC-PM)	10,40	140,40

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	23,44	11,60	5,00	3,77	5,00	5,00	5,67	19,89	48,91	36,27	39,65	40,01	244,21
Pi (mm)	95,39	47,19	2,28	0,00	0,94	5,99	23,09	80,94	199,04	147,63	161,36	162,84	926,70
ESC (mm)	11,39	5,63	0,27	0,00	0,11	0,72	2,76	9,66	23,76	17,62	19,26	19,44	110,61
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	773,9
HSi (mm)	438,75	438,75	423,11	379,98	348,28	329,32	319,25	324,14	362,96	438,75	438,75	438,75	
C1	1,00	1,00	0,90	0,58	0,36	0,26	0,31	0,76	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,85	0,48	0,27	0,17	0,10	0,13	0,35	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	62,83	45,42	31,70	19,90	16,07	18,19	42,13	59,72	66,66	58,82	60,02	539,13
HSf (mm)	438,75	423,11	379,98	348,28	329,32	319,25	324,14	362,96	438,75	438,75	438,75	438,75	
DCC (mm)	0,00	15,64	58,77	90,47	109,43	119,50	114,61	75,79	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	37,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63,53	80,96	102,54	102,82	387,57
NR (mm)	0,00	20,62	78,80	132,81	164,41	193,05	178,45	109,63	0,00	0,00	0,00	0,00	877,78

**CUADRO 38 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE TIERRAS CON CULTIVOS ANUALES
(USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)**

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
K _p [0.01%]	0,10
K _v [0.01%]	0,12
K _{fc} [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,871183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,12

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	129,6	64,4	7,6	3,6	6,1	9,2	31,5	109,8	264,2	190,3	206,6	222,3	1245,2
Ret [mm]	15,55	7,73	5,00	3,63	5,00	5,00	5,00	13,18	31,71	22,83	24,79	26,68	166,09
Pi (mm)	99,33	49,39	2,22	0,00	0,92	3,70	23,10	84,19	202,58	145,88	158,36	170,42	940,10
ESC (mm)	14,69	7,30	0,33	0,00	0,14	0,55	3,42	12,45	29,95	21,57	23,42	25,20	139,01
ETP (mm)	61,1	70,0	66,8	79,5	82,2	98,2	89,9	82,1	64,3	71,2	64,6	61,7	656,3
HSi (mm)	203,13	203,13	193,62	166,17	149,02	142,47	140,10	145,86	182,80	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,89	0,43	0,18	0,12	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	61,09	58,89	29,67	17,16	7,47	6,08	17,33	47,26	64,30	71,24	64,64	61,66	506,79
HSf (mm)	203,13	193,62	166,17	149,02	142,47	140,10	145,86	182,80	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	9,50	36,95	54,11	60,65	63,03	57,26	20,33	0,00	0,00	0,00	0,00	
R _p (mm)	38,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,95	74,64	93,72	108,76	433,31
NR (mm)	0,00	20,58	74,10	116,46	135,35	155,12	129,81	55,14	0,00	0,00	0,00	0,00	686,57

CUADRO 39 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE PASTOS NATURALES NO MEJORADOS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	192,00
K _p [0.01%]	0,01
K _v [0.01%]	0,15
K _{fc} [0.01%]	0,651183
I [0.01%]	0,811183
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	500,00
HSi (mm)	203,13
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,15

	%	mm
CC	32,50	203,13
PM	22,10	138,13
(CC-PM)	10,40	65,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	128,9	64,4	7,6	3,5	6,1	6,8	31,5	109,1	256,8	179,1	192,9	222,3	1208,9
Ret [mm]	19,34	9,66	5,00	3,49	5,00	5,00	5,00	16,37	38,52	26,86	28,93	33,34	196,51
Pi (mm)	88,89	44,42	2,07	0,00	0,85	1,45	21,51	75,26	177,06	123,46	132,98	153,27	821,22
ESC (mm)	20,69	10,34	0,48	0,00	0,20	0,34	5,01	17,52	41,21	28,74	30,95	35,68	191,15
ETP (mm)	64,5	72,1	68,2	85,0	89,4	106,7	97,7	88,2	68,9	75,8	70,5	63,3	609,2
HSi (mm)	203,13	203,13	190,79	164,14	147,13	141,20	138,94	143,67	174,84	203,13	203,13	203,13	
C1	1,00	1,00	0,84	0,40	0,15	0,07	0,34	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	64,50	56,76	28,72	17,01	6,79	3,72	16,78	44,09	68,89	75,82	70,45	63,30	516,81
HSf (mm)	203,13	190,79	164,14	147,13	141,20	138,94	143,67	174,84	203,13	203,13	203,13	203,13	
DCC (mm)	0,00	12,34	38,98	55,99	61,92	64,19	59,46	28,29	0,00	0,00	0,00	0,00	
R _p (mm)	24,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,88	47,64	62,52	89,97	304,40
NR (mm)	0,00	27,71	78,47	123,97	144,57	167,19	140,40	72,37	0,00	0,00	0,00	0,00	754,69

CUADRO 40 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE FRUTALES DE CLIMA FRIO (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,18
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,893371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	1500,00
HSi (mm)	609,38
N° de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,18

	%	mm
CC	32,50	609,38
PM	22,10	414,38
(CC-PM)	10,40	195,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,9	64,4	7,6	3,9	6,1	14,2	31,5	111,2	279,2	212,8	234,0	222,3	1317,8
Ret [mm]	23,56	11,60	5,00	3,92	5,00	5,00	5,67	20,01	50,25	38,30	42,11	40,01	250,42
Pi (mm)	95,87	47,19	2,28	0,00	0,94	8,19	23,09	81,44	204,50	155,86	171,39	162,84	953,59
ESC (mm)	11,44	5,63	0,27	0,00	0,11	0,98	2,76	9,72	24,41	18,60	20,46	19,44	113,82
ETP (mm)	54,3	65,7	64,1	68,6	67,6	81,1	74,2	69,9	55,1	62,1	53,0	58,4	550,4
HSi (mm)	609,38	609,38	594,02	546,36	508,11	481,91	465,16	465,49	507,94	609,38	609,38	609,38	
C1	1,00	1,00	0,93	0,68	0,49	0,39	0,38	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,91	0,63	0,44	0,32	0,23	0,23	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	54,27	62,55	49,95	38,25	27,14	24,94	22,76	38,98	55,13	62,09	53,00	58,38	547,43
HSf (mm)	609,38	594,02	546,36	508,11	481,91	465,16	465,49	507,94	609,38	609,38	609,38	609,38	
DCC (mm)	0,00	15,35	63,02	101,27	127,46	144,21	143,89	101,43	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	41,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,94	93,77	118,39	104,46	406,16
NR (mm)	0,00	18,46	77,13	131,59	167,94	200,34	195,32	132,31	0,00	0,00	0,00	0,00	923,09

CUADRO 41 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE CENTROS POBLADOS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	0,00
K _p [0.01%]	0,01
K _v [0.01%]	0,00
K _{fc} [0.01%]	0
I [0.01%]	0,01
DS (g/cm ³):	1,35
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	877,50
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,80

	%	mm
CC	32,50	877,50
PM	22,10	596,70
(CC-PM)	10,40	280,80

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	104,17	51,54	6,04	3,77	5,00	9,37	25,21	88,39	217,36	161,22	176,21	177,83	1026,12
Pi (mm)	0,26	0,13	0,02	0,00	0,01	0,02	0,06	0,22	0,54	0,40	0,44	0,44	2,55
ESC (mm)	25,78	12,76	1,50	0,00	1,04	2,32	6,24	21,88	53,80	39,90	43,61	44,01	252,84
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	597,5
HSi (mm)	877,50	825,98	777,39	740,20	707,35	681,79	658,98	643,49	632,71	626,31	620,43	616,34	
C1	1,00	0,82	0,64	0,51	0,39	0,30	0,22	0,17	0,13	0,11	0,09	0,07	
C2	0,80	0,62	0,49	0,38	0,29	0,21	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	
ETR (mm)	51,78	48,71	37,21	32,85	25,58	22,83	15,55	11,00	6,95	6,28	4,53	3,83	267,10
HSf (mm)	825,98	777,39	740,20	707,35	681,79	658,98	643,49	632,71	626,31	620,43	616,34	612,95	
DCC (mm)	51,52	100,11	137,30	170,15	195,71	218,52	234,01	244,79	251,19	257,07	261,16	264,55	
R _p (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NR (mm)	57,42	119,21	165,53	211,34	245,02	285,31	300,50	309,75	303,96	317,45	315,44	320,74	2951,67

CUADRO 42 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE BOSQUES (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	240,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,20
Kfc [0.01%]	0,703371
I [0.01%]	0,913371
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	2000,00
HSi (mm)	812,50
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.20

	%	mm
CC	32,50	812,50
PM	22,10	552,50
(CC-PM)	10,40	260,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	130,2	64,4	7,6	3,8	6,1	11,7	31,5	110,5	271,7	201,5	220,3	222,3	1281,5
Ret [mm]	26,04	12,88	5,00	3,77	5,00	5,00	6,30	22,10	54,34	40,30	44,05	44,46	269,26
Pi (mm)	95,15	47,07	2,33	0,00	0,96	6,13	23,03	80,74	198,53	147,25	160,94	162,43	924,56
ESC (mm)	9,02	4,46	0,22	0,00	0,09	0,58	2,18	7,66	18,83	13,97	15,26	15,41	87,69
ETP (mm)	57,7	67,8	65,4	74,0	74,9	89,6	82,0	76,0	59,7	66,7	58,8	60,0	588,6
HSi (mm)	812,50	812,50	794,47	743,05	696,51	661,73	634,95	629,95	671,22	810,32	812,50	812,50	
C1	1,00	1,00	0,94	0,73	0,56	0,44	0,41	0,61	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,92	0,70	0,52	0,40	0,29	0,28	0,43	0,99	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	57,68	65,11	53,75	46,54	35,74	32,91	28,03	39,47	59,43	66,66	58,82	60,02	604,16
HSf (mm)	812,50	794,47	743,05	696,51	661,73	634,95	629,95	671,22	810,32	812,50	812,50	812,50	
DCC (mm)	0,00	18,03	69,45	115,99	150,77	177,55	182,55	141,28	2,18	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	37,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,40	102,13	102,41	320,40
NR (mm)	0,00	20,74	81,14	143,49	189,91	234,26	236,56	177,78	2,47	0,00	0,00	0,00	1086,37

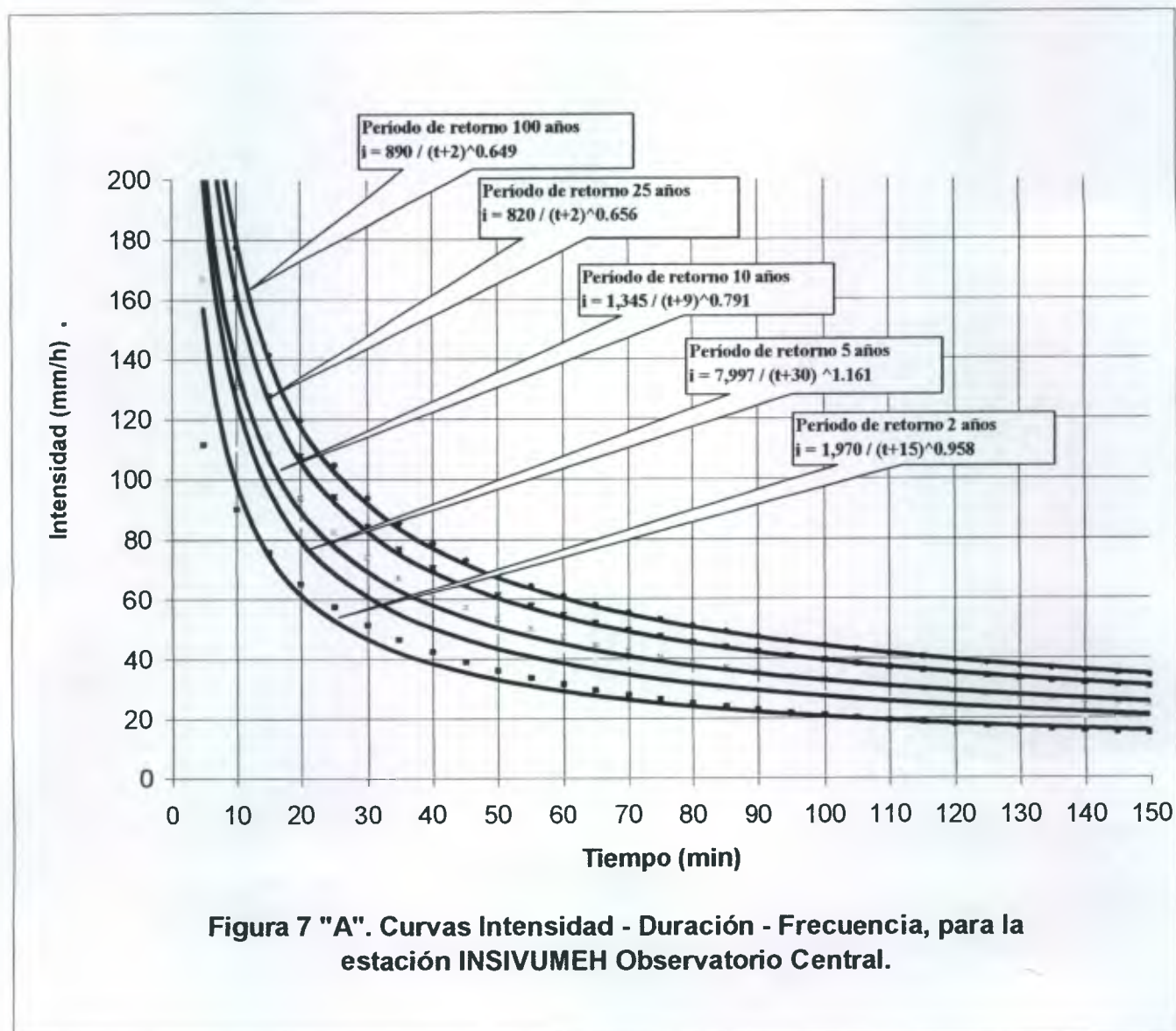
CUADRO 43 "A". BALANCE HIDRICO DE SUELOS DE SUPERFICIES DEGRADADAS (USO DE LA TIERRA DEL AÑO 2006)

Textura de Suelo:	FRANCO ARCILLOSA
fc [mm/d]	288,00
Kp [0.01%]	0,01
Kv [0.01%]	0,00
Kfc [0.01%]	0,744658
I [0.01%]	0,754658
DS (g/cm ³):	1,25
PR (mm)	1000,00
HSi (mm)	406,25
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	1
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0,00

	%	mm
CC	32,50	406,25
PM	22,10	276,25
(CC-PM)	10,40	130,00

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	128,9	64,4	7,6	3,5	6,1	6,8	31,5	109,1	256,8	179,1	192,9	222,3	1208,9
Ret [mm]	5,00	5,00	5,00	3,49	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	58,49
Pi (mm)	93,51	44,84	1,93	0,00	0,80	1,35	20,01	78,59	190,02	131,35	141,77	163,98	868,15
ESC (mm)	30,40	14,58	0,63	0,00	0,26	0,44	6,51	25,55	61,77	42,70	46,09	53,31	282,24
ETP (mm)	54,3	65,7	64,1	68,6	67,6	81,1	74,2	69,9	55,1	62,1	53,0	58,4	773,9
HSi (mm)	406,25	406,25	390,70	349,41	321,00	304,27	293,01	298,02	337,17	406,25	406,25	406,25	
C1	1,00	1,00	0,90	0,56	0,35	0,23	0,28	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,84	0,45	0,27	0,17	0,09	0,12	0,36	1,00	1,00	1,00	1,00	
ETR (mm)	54,27	60,40	43,22	28,41	17,53	12,60	15,00	39,44	55,13	62,09	53,00	58,38	499,46
HSf (mm)	406,25	390,70	349,41	321,00	304,27	293,01	298,02	337,17	406,25	406,25	406,25	406,25	
DCC (mm)	0,00	15,55	56,84	85,25	101,98	113,24	108,23	69,08	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp (mm)	39,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,81	69,27	88,77	105,60	368,69
NR (mm)	0,00	20,81	77,69	125,41	152,07	181,71	167,43	99,49	0,00	0,00	0,00	0,00	824,61

ANEXO 2. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia de la estación INSIVUMEH Observatorio Central



Fuente: INSIVUMEH (Instituto de Sismología, Vulcanología, meteorología e hidrología). 2002. Estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala. Guatemala, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Departamento de Investigación y Servicios Hídricos. s.p.



REF. Sem. 14/2006

LA TESIS TITULADA:

"IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DEL CICLO HIDROLOGICO DE LAS MICROCUENCAS DEL LOS RIOS SAN LUCAS Y ARENAL, GUATEMALA, GUATEMALA"

DESARROLLADA POR EL ESTUDIANTE:

ROMELIA MARGARITA ASTURIAS
 HERNANDEZ

CARNE:

9210139

HA SIDO EVALUADO POR LOS PROFESIONALES:

Ing. Agr. Tomás Antonio Padilla Cámara
 Ing. Agr. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Los Asesores y las Autoridades de la Facultad de Agronomía, hacen constar que ha cumplido con las Normas Universitarias y Reglamentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ing. Agr. Marvin Roberto Salguero Barahona
 ASESOR

Ing. Agr. Marino Barrientos García
 DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS

IMPRIMASE

Dr. Ariel Abderramán Ortiz López
 DECANO



DMS/nm
 c.c. Archivo
 IIA
 Control Académico